

В.Г. Комар, О.Б. Серов

ИЗОБРАЗИТЕЛЬНАЯ ГОЛОГРАФИЯ И ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КИНЕМАТОГРАФ



МОСКВА «ИСКУССТВО» 1987

В последние годы в СССР и в других странах успешно развивается и получает все большее практическое применение изобразительная голография. Благодаря присущему голографии свойству отображать объекты в трехмерном пространстве голограммы все чаще используют для экспонирования музейных редкостей, показа уникальных объектов на различного рода выставках, для информации и пропаганды достижений науки и техники, а также для учебных целей.

Во многих научно-исследовательских институтах, учебных заведениях, музеях организованы лаборатории, которые занимаются вопросами применения голографии и для изобразительных целей.

По мере развития изобразительной голографии, совершенствования голографических процессов и материалов, улучшения качества голографических изображений появляется новая область изобразительного искусства — художественная голография.

Голографическая диапроекция трехмерных изображений на большие экраны получит в будущем применение для иллюстрации докладов, информационных сообщений, рекламы.

В настоящее время уже развиты принципы голографического кинематографа и по завершению разработки технических средств его смогут применять на практике.

В книге приведены сведения по получению голограмм, воспроизведению голографических изображений, дана информация о создании голографического кинематографа. Эти данные явились результатом многолетней работы авторов во Всесоюзном научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ) в Москве.

Работы советских ученых в области изобразительной голографии и голографического кинематографа получили высокую оценку как в СССР, так и за рубежом. В газете «Правда» 13 июня 1984 г. сообщалось о создании первой установки, с помощью которой еще в 1976 г. был снят и показан участникам Международного конгресса по кинотехнике 30-секундный экспериментальный монохромный голографический фильм. Одновременно изображение предметов в трехмерном пространстве могло наблюдать четыре зрителя. В журнале английского общества кинематографии, звука и телевидения и в журнале американского Общества инженеров кино и телевидения в январе 1977 г. указывалось, что НИКФИ убедительно доказал возможность демонстрации короткого голографического фильма на экране шириной один метр и что в СССР найден ключ к решению проблемы голографического кинематографа.

За последнее время в НИКФИ под руководством В. Г. Комара и О. Б. Серова создана новая, экспериментальная съемочная камера с 200-миллиметровым объективом и специальным лентопротяжным механизмом, которой можно вести голографическую киносъемку при освещении объектов двумя лазерами — красного и зеленого излучения. Разработаны многослойные цветные фотоматериалы, созданы экспериментальные проекционная и копировальная установки, что позволило получить цветное голографическое киноизображение удовлетво-

Рецензент — доктор технических наук, профессор
О. Ф. Гребенников

рительного качества. Однако для более полного воспроизведения палитры красок требуется еще лазер с синим лучом. С помощью разработанной техники уже снят первый экспериментальный голографический цветной мультипликационный фильм.

Для проекции цветного голографического киноизображения создан специальный цветной множительный фокусирующий экран, представляющий собой голограмму зеркала. Важным шагом на пути практического применения голографического кино является увеличение размеров экрана и числа зрительских мест в зале.

Данная книга знакомит читателя с современным состоянием и тенденциями развития изобразительной голографии, новейшими достижениями, а также с перспективами создания голографического кинематографа. В ней приведены сведения о схемах и методах изготовления изобразительных голограмм, даны технологические указания, полезные для практической работы в области изобразительной голографии.

Разделы ее первой части — «Основы изобразительной голографии и голографического кинематографа» — позволяют читателям понять принципы регистрации и воспроизведения голографических изображений и приобрести знания, полезные для работы по получению изобразительных голограмм и по их практическому применению. Сведения, приводимые в книге, могут представить интерес не только для специалистов, работающих в области техники, но также и для художников, многие из которых проявляют большой интерес к изобразительной голографии и желают попробовать себя в этой новой области изобразительного искусства.

Разделы второй части книги — «Передача изображения в голографических системах» — рассчитаны на подготовленных специалистов, которые занимаются или собираются заниматься исследованием и разработкой новых процессов, аппаратуры, материалов для систем регистрации, передачи и воспроизведения голографических изображений.

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
зав. кафедрой РТУС МИРЭА, доктор техн. наук, профессор
Мировицкий Д. И.

Голография — одна из новых областей науки и техники. Она была открыта в 1947 г. английским ученым — профессором Д. Габором, — который предложил интерференционный метод регистрации световых волн. Слово *голография* происходит от греческих слов *holos* — полный и *grapho* — пишу, что означает полную запись изображения.

Голография, представляющая собою фотографический процесс в широком смысле этого слова, принципиально отличается от обычной фотографии тем, что в светочувствительном материале происходит регистрация не только интенсивности, но и фазы световых волн, рассеянных объектом и несущих полную видеoinформацию о нем. Как средство визуализации, голограмма обладает уникальным свойством: в отличие от обычного плоского фотографического голографическое изображение может воспроизводить точную трехмерную световую копию оригинального объекта. Такое изображение с множеством ракурсов, изменяющихся с изменением точки наблюдения, обладает удивительной реалистичностью и часто неотличимо от реального объекта.

Голография начала бурно развиваться и приобрела большое практическое значение после того, как в 1960 г. был создан первый лазер в результате фундаментальных исследований по квантовой электронике, выполненных советскими физиками — академиками Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым — и американским ученым Ч. Таунсом.

Начало изобразительной голографии было положено работами Э. Лейта и Ю. Упатниекса, получившими в 1962 г. первую объемную пропускающую голограмму, восстанавливаемую в лазерном свете.

Решающее значение для развития изобразительной голографии имели работы Ю. Н. Денисюка, выполненные в 1962—1965 гг. Он впервые получил *отражательные голограммы*, позволяющие воспроизводить объемные изображения в некогерентном свете.

Первые высококачественные голограммы по методу Ю. Н. Денисюка были выполнены Г. А. Соболевым в 1968 г. на особомелкозернистых «прозрачных» фотоматериалах, разработанных под руководством профессора Н. И. Кириллова.

Возможности голографии как изобразительного средства исследовались и продолжают развиваться в самых различных направлениях.

Первые голографические портреты были получены в США в 1968 г. Л. Зиббертом, а в СССР несколько позже Д. И. Стаселько и Г. А. Соболевым.

В 1969 г. С. Бентон (США) изготовил *радужную голограмму* щелевым методом, при котором регистрируется множество только горизонтальных ракурсов изображения. Такие голограммы воспроизводят трехмерное изображение в некогерентном свете. Однако в изобразительной голографии радужные голограммы занимают лишь ограниченное место, поскольку им принципиально присущи хроматизм и аберрации различных видов, а также невозможность правильно передавать цвета объекта.

В 1977 г. Л. Кросс получил *мультиплексную голограмму* из множества обычных фотографий объекта, снятых с множества точек зрения, лежащих в горизонтальной плоскости. Такую голограмму можно изготовить в виде голографического барабана, а изображение воспроизводить как изображение радужной голограммы в белом свете лампы накаливания. При вращении барабана изображение внутри него движется, если при съемке последовательных фотографий объект перемещался. В СССР голографический барабан был впервые продемонстрирован Ш. Д. Какичашвили.

Объемное голографическое изображение имеет некоторые общие свойства с многоракурсным стереоскопическим изображением, также передающим большое число ракурсов. В связи с этим возможен перевод многоракурсного стереоскопического изображения в голографическое. Такой процесс оказывается весьма важным для получения голограмм объектов, освещенных обычным некогерентным светом, например солнечным. Если объекты очень велики по своим размерам, такой способ получения их голограмм оказывается практически единственно возможным.

Авторами данной книги совместно с Г. Г. Голенко и В. А. Ваниным исследован и экспериментально опробован способ изготовления голографических портретов путем растровой съемки человека в обычном некогерентном свете с последующим переводом растрового изображения в голографическое.

Особенно значительные успехи в нашей стране достигнуты в области разработки методов и технологических процессов изготовления крупноформатных изобразительных голограмм высокого качества. В период 1970—1983 гг. в НИКФИ авторами совместно с Г. А. Соболевым были получены голографические монохромные изображения высокого качества размерами до 100×75 см.

В настоящее время под руководством авторов ведутся интенсивные исследования по цветной голографии и достигнуты значительные успехи. Получены цветные объемные изобразительные голограммы размером 30×40 см, изготовлены цветные голографические экраны размером 100×75 см, снят цветной голографический киноролик.

Для успешного развития изобразительной голографии и решения проблемы голографического кинематографа большое значение имели основополагающие работы Д. Габора, а в дальнейшем

Ю. Н. Денисюка, который разработал основы теории трехмерных голограмм. Теоретические положения как для двухмерных, так и для трехмерных голограмм были затем развиты рядом других авторов.

Г. Когельник (США) разработал теорию дифракции света на трехмерных голограммах с простой голограммной структурой, образованной двумя плоскими волнами, и не только качественно оценил, но и выразил количественно такие важные характеристики голограмм, как зависимость дифракционной эффективности от глубины модуляции коэффициентов преломления и поглощения света, толщины слоя голограммы, направления опорных и объектных пучков при получении голограммы. Он также вывел математические выражения для определения таких важных свойств голограмм, как угловая и спектральная селективность. При этом, в отличие от результатов многих исследований других авторов, полученных в кинематическом приближении, выражения Г. Когельника выведены для произвольных значений амплитуд дифрагированных волн, в том числе больших, чем амплитуда прошедшей волны нулевого порядка. Авторами был применен метод линеаризации процессов образования сложных голограммных структур и дифракции света на таких структурах, позволяющий распространить выражения, полученные для простейших структур, на случаи сложных структур реальных изобразительных голограмм.

Значительным этапом в развитии теории голографических процессов явилось создание модовой теории дифракции света на сложных голограммных структурах, характерных для изобразительных голограмм, которая была разработана Б. Я. Зельдовичем и В. Г. Сидоровичем. Следует отметить теоретические работы Л. М. Сороко, Н. М. Померанцева, А. О. Озолса, В. В. Аристова, Д. И. Миrowsкого, А. М. Смолевича, Р. Олфернесса, Л. Солимара, Р. Магньюсона.

Попытки создать голографический кинематограф с трехмерным изображением делались начиная с 1967 г. Г. Гейнс и Д. Брумм предложили *метод светорассеивающей пластинки*; Е. Лейт, Д. Брумм, С. Хсиао исследовали *метод большой сферической линзы*; Д. Джон предложил *метод больших цилиндрических линз*; Д. Габор изобрел *метод голографического экрана с зональным фокусированием*; Г. Куртц исследовал *метод кинотемки с движением объектов по эллипсу*; Т. Окоши предложил *метод большого числа зеркал*. Однако все эти методы имеют принципиальные недостатки, препятствующие создать на их основе практически приемлемые системы голографического кинематографа.

Кроме того, делались попытки применения голографических систем для тиражирования и хранения плоских киноизображений. Например, У. Хэнненом (США) была разработана *система «Голотейп»*, в которой телевизионный кинофильм, в том числе и цветной, записывается в виде голограмм на виниловой ленте и воспроизводится с помощью видеопроигрывателя на экране обычного телевизора с плоским изображением.

Американский ученый Чарльз И (Charles Ih) разработал голографический процесс перевода двухмерных цветных изображений кинофильмов на голографическую киноплёнку с целью долговременного хранения. Однако выбранные технические решения оказались чрезмерно дорогими, что препятствует практической реализации выполненной разработки. Благодаря исключительно высокой разрешающей способности голографической плёнки можно найти пути технического решения проблемы, дающие экономический эффект.

Успешное развитие стереоскопического кинематографа, основанного на одновременной съёмке и проекции двух ракурсов киноизображения и рассмотрении изображения с помощью очков, поляризующих свет, подтвердило жизнеспособность и перспективность трехмерного изображения в кинематографии.

Несомненно, был прав выдающийся кинорежиссер С. М. Эйзенштейн, который утверждал, что трехмерное изображение придет в кинематограф, и это так же неизбежно, как и то, что придет завтрашний день.

Более широкому развитию современных систем стереоскопического кинематографа (с поляризацией света), а среди этих систем наиболее совершенной является система, разработанная НИКФИ и «Мосфильмом», препятствует ряд принципиальных недостатков: необходимость применения очков; повышенное зрительное напряжение из-за несоответствия аккомодации и конвергенции зрения; условность изображения вследствие ограниченного количества ракурсов — только двух. Ранее разработанная в НИКФИ под руководством С. П. Иванова система стереоскопического кинематографа, не требующая применения очков, обладает также серьезным недостатком — необходимостью соблюдения зрителем неподвижного положения.

В 1976 г. в НИКФИ авторами книги были разработаны и экспериментально проверены принципы голографического кинематографа, предусматривающие использование съёмочных и проекционных объективов с широким зрачком, точно-фокусирующих множительных голографических экранов, голографических киноплёнок с толстым слоем, обладающих высокой спектральной и угловой селективностью, а также использование двух методов киносъёмки: с помощью лазеров в когерентном свете и с помощью растров в некогерентном свете с последующим переводом растрового изображения в голографическое. Было экспериментально подтверждено, что на основе указанных принципов в будущем возможно создать систему голографического кинематографа с цветным трехмерным изображением, обладающую большими преимуществами по сравнению с применяемыми системами кинематографа. В этих работах участвовал Г. А. Соболев.

В 1984 г. авторами книги была впервые в мире произведена киносъёмка на цветную голографическую киноплёнку и осуществлена кинопроекция на голографический экран цветного трехмерного изображения. В этой работе участвовали: Л. Г. Дударева, Н. М. Широкова, И. К. Любавская, Н. Ю. Филиппук.

В создании оптики и аппаратуры для съёмки, копирования и проекции голографических изображений, статических и динамических, следует отметить работы Ф. С. Новика, А. И. Гана, А. Л. Кривовяза, Б. М. Ардашникова, Р. И. Барник, В. И. Омелина, Л. П. Заруцкого, Л. Д. Кривошея, Э. В. Бойм.

Принципы голографического кинематографа, разработанные в НИКФИ, реализуются также и в случае съёмки и проекции сменных статических трехмерных голографических диапозитивов и диафильмов. Вместе с авторами в этой работе участвуют И. П. Налимов, Л. П. Заруцкий, И. У. Федчук.

С каждым годом все более широкое практическое применение находит изобразительная голография как эффективное средство информации. На многочисленных выставках, в музеях с большим успехом демонстрируют голограммы различного рода исторических, художественных ценностей, голограммы, рекламирующие разные изделия для продажи. Начинает развиваться особое направление в изобразительной голографии — *художественная голография*, представляющая собою новый вид изобразительного искусства, которое, подобно скульптуре, формирует пространственные образы. Нет сомнения в том, что в будущем изобразительной голографии предстоит занять в жизни людей еще более значительное место.

Следует ожидать также достаточно широкого практического применения проекционной голографии — проекции статических трехмерных голографических изображений на большие экраны для одновременного наблюдения большим числом зрителей.

После разработки технических средств по уже известным и проверенным принципам, вероятно начнется практическое применение голографического кинематографа. Это обусловлено тем, что трехмерное изображение является жизненной необходимостью кинематографии, которая с первых дней своего возникновения развивается, следуя объективному закону непрерывного приближения условий восприятия в кинематографе к условиям восприятия в жизни, который определил переход кино от немого к звуковому, от черно-белого к цветному и определяет переход в будущем от двухмерного к трехмерному изображению.

Уже выполненные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что голографические методы регистрации и воспроизведения трехмерных изображений на основе разработанных принципов голографического кинематографа позволяют снимать и демонстрировать кинофильмы с трехмерным изображением без тех недостатков, которые присущи современным системам стереоскопического кинематографа.

Приход в кинематографию голографических методов не означает отрицание методов стереоскопии. Наоборот, кинематограф с трехмерным изображением должен комплексно использовать голографию и многоракурсную стереоскопию.

Наряду с применением голографического кинематографа как кинозрелища с трехмерным изображением следует ожидать, что разработанные принципы будут положены и в основу создания тех-

нических киноголографических средств интерференционного исследования процессов вибрации и неразрушающего контроля прочности узлов и деталей различных устройств.

Создание систем цветного объемного голографического кинематографа, обладающих огромными изобразительными возможностями, позволит одновременно достигнуть высоких экономических показателей за счет очень высокой разрешающей способности голографических фотоматериалов и использования специальных физических процессов. Например, применение щелевой оптики с регистрацией и воспроизведением только горизонтальных ракурсов изображения позволяет наряду с большими изобразительными возможностями получить и высокоэкономичные технические решения.

Авторы книги поставили целью наиболее полно осветить направления научных поисков и результаты своих работ и надеются на полезность своевременной передачи накопленного опыта в таких быстро развивающихся областях науки и техники, как изобразительная голография и голографический кинематограф.

Авторы выражают благодарность И. П. Налимову за полезные советы при работе над рукописью, а также Л. Г. Дударевой за помощь при подготовке рукописи к печати.

Часть I.

ОСНОВЫ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИИ И ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КИНЕМАТОГРАФА

Глава 1.1. ПРИНЦИПЫ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИИ

Отличительная особенность изобразительных голограмм — реалистичность воспроизводимых ими трехмерных изображений, которые часто трудно отличить от оригинальных объектов. Эта особенность обусловлена тем, что при специальном освещении голограмма не только передает объем предметов с большим диапазоном яркостей, высоким контрастом и четкостью, но также дает возможность наблюдать точное изменение бликов и теней при изменении угла наблюдения при рассматривании этих предметов.

Голограмма образуется в светочувствительном материале (фотопластинке или фотопленке) в процессе его экспонирования в голографическом световом поле и дальнейшей фотохимической обработки. Голографическое световое поле образуется в результате когерентного сложения опорной волны света, направляемой непосредственно от лазера, и объектной волны, отраженной от объекта, освещенного тем же лазером. Возникающая интерференционная картина регистрируется в виде голограммной структуры. При этом каждый малый элемент фотоматериала регистрирует интенсивность объектных лучей света, падающих на этот элемент, независимо для каждого направления в виде изменения оптической плотности и показателя преломления слоя. Зарегистрированная в слое голограмма обладает свойствами дифракционной решетки.

При освещении полученной голограммы восстанавливающим пучком каждый малый ее элемент направляет дифрагированные волны с разной интенсивностью для различных направлений, что приводит к воспроизведению голографического изображения в виде световой копии оригинального объекта.

Опорная волна может иметь плоский или сферический фронт. Формирование световых волн с плоскими фронтами, особенно при больших диаметрах пучков, связано с техническими трудностями и требует применения оптических элементов (зеркал, линз, объективов) с большими диаметрами. Имеющиеся технические средства позволяют формировать волны со сферическими фронтами, близкими к теоретически необходимым. Поэтому в первой части данной книги, посвященной практическим вопросам голографии, рассуждения ведутся применительно к работе со сферическими волнами света.

На рис. 1 показана схема изготовления отражательных голограмм, предложенная Ю. Н. Денисюком, которая получила широкое практическое применение в изобразительной голографии. Пучок света лазера 1 расширяется линзой 2, проходит через

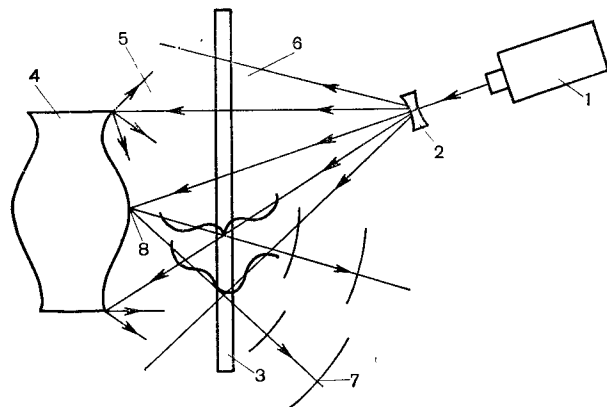


Рис. 1. Схема изготовления отражательных голограмм, предложенная Ю. Н. Денисюком

почти прозрачную голографическую фотопластинку 3 и освещает объект 4. Свет, отраженный от объекта 4, падает на фотопластинку с противоположной стороны. Таким образом, фотопластинка освещается двумя пучками света: объектным пучком 5, отраженным от объекта, и опорным пучком 6, идущим непосредственно от лазера через формирующую линзу 2.

В светочувствительном слое фотопластинки объектный и опорный пучки интерферируют, образуются стоячие волны; возникающая в пространстве неподвижная интерференционная картина регистрируется в светочувствительном слое.

Объектный пучок удобно рассматривать состоящим из множества элементарных объектных волн 7, каждая из которых отражается от одного малого, считаемого точечным, элемента поверхности объекта 8. Результирующая интерференционная картина, возникающая в светочувствительном слое, может быть представлена как множество наложенных друг на друга элементарных интерференционных картин, каждая из которых получается в результате интерференции волны света опорного пучка с элементарной объектной волной. При этом в первом приближении можно пренебречь интерференцией между элементарными объектными волнами.

Голограммную структуру, образующуюся в слое фотопластинки в процессе ее экспонирования и обработки, можно рассматри-

вать как множество наложенных друг на друга элементарных голограммных структур, каждая из которых соответствует точечному элементу поверхности объекта. Справедливость такого допущения обусловлена тем, что при малых интенсивностях пучков элементарных структур зависимость оптических свойств элементарной голограммной структуры от амплитуды интенсивности света в элементарной интерференционной структуре может быть приближенно принята линейной, т. е. соблюдается принцип суперпозиции.

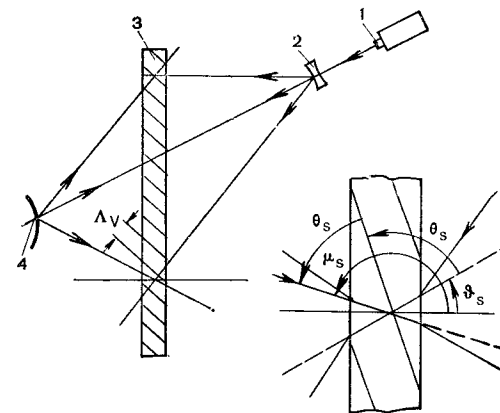


Рис. 2. Элементарная голограммная структура отражательной голограммы, соответствующая точечному элементу поверхности объекта:
1 — лазер; 2 — расширительная линза; 3 — фотопластинка; 4 — точечный элемент поверхности объекта

Направление опорного пучка определяется нормалью к фронту волны, или опорным лучом; направление объектного пучка определяется средним направлением света от объекта (точечного элемента объекта), или объектным лучом. Поэтому для анализа процессов распространения опорных пучков и образования объектных удобно использовать метод построения хода лучей, как это принято в геометрической оптике.

На рис. 2 показана элементарная голограммная структура, соответствующая точечному элементу 4 поверхности объекта. Она состоит из тончайших интерференционных полос. При поперечном перемещении от одной полосы к другой изменяются оптические свойства слоя (показатель преломления и оптическая плотность).

В зависимости от первоначальных свойств и способа фотохимической обработки используемого фотоматериала результирующая голограмма может иметь характер амплитудной (поглощающей) или фазовой дифракционной решетки или обладать свойствами обеих решеток одновременно. Для задач изобразительной голографии особый интерес представляют фазовые голограммные структуры, характеризующиеся изменением показателя преломления

слоя и имеющие достаточно малую амплитудную поглощающую составляющую. Такие фазовые структуры отличаются высокой эффективностью использования света при восстановлении, поэтому в дальнейшем рассматриваются свойства преимущественно фазовых голограмм.

На рис. 2 расстояние между ближайшими линиями максимального значения показателя преломления равно

$$\Lambda_V = \frac{\lambda_s}{2n_s \sin \theta_s}, \quad (1.1)$$

где Λ_V — период элементарной голограммной структуры; λ_s — длина волны света; n_s — показатель преломления фотослоя (средний); $2\theta_s$ — угол между направлениями опорного и объектного лучей в слое.

При длине волны света $\lambda_s = 0,514$ мкм, т. е. при зеленом свете, показателе преломления света $n_s = 1,52$, угле между опорным и объектным лучами в слое $2\theta_s = 150^\circ$, согласно формуле (1.1), расстояние между соседними полосами элементарной голограммной структуры в толще слоя равно $\Lambda_V = 0,175$ мкм.

При получении отражательных голограмм опорные и объектные пучки падают на фотопластинку с разных сторон. Изобразительные голограммы изготовляют и пропускающими по схеме рис. 3, когда опорные и объектные пучки падают на фотопластинку с одной стороны. При этом пучок света лазера 1 после светоделительной пластинки 2 идет по двум каналам. С помощью зеркала 3 и расширительной линзы 4 формируется опорный пучок 5, падающий на фотопластинку 6.

Расширительная линза 7 формирует пучок 8, освещающий объект 9. Отраженный от объекта пучок 10 падает на фотопластинку 6 с той же стороны, что и опорный.

На рис. 4 показана элементарная голограммная структура, соответствующая точечному элементу поверхности объекта 11 (см. рис. 3). Характерно, что полосы, определяющие изменение показателя преломления света, расположены под большим углом к поверхности слоя для пропускающих голограмм, чем для отражательных.

Другой особенностью голограммных структур пропускающих голограмм является большее расстояние между соседними полосами. Например, при длине волны света $\lambda_s = 0,514$ мкм, т. е. при зеленом свете, показателе преломления $n_s = 1,52$, угле между опорным и объектным лучами $2\theta_s = 30^\circ$, согласно формуле (1.1), расстояние между соседними полосами элементарной голограммной структуры в толще слоя равно $\Lambda_V = 0,653$ мкм.

Из результатов расчета следует, что для изготовления отражательных голограмм требуется фотографический материал с разрешением не менее 5000 лин/мм, а для пропускающих значительно меньше.

Пропускающую голограмму можно получить с использованием линзы, формирующей уменьшенное изображение объекта в прост-

ранстве. Если фотопластинку поместить в плоскость, сопряженную с любым сечением объекта, например центральным или соответствующим переднему плану, и осветить пластинку опорным пучком, то на ней регистрируется пропускающая голограмма сфокусированного изображения. Так можно изготавливать изобразительные голограммы в виде слайдов. В голографическом кинематографе эта схема является основной для получения голографических кинокадров (см. главу 1.5).

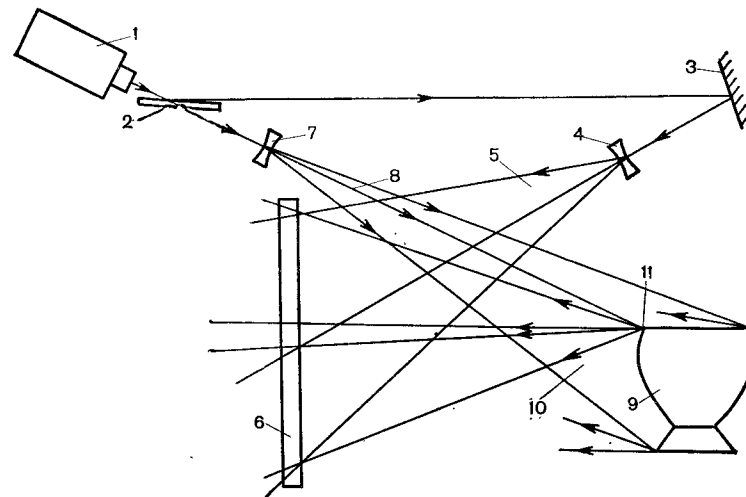


Рис. 3. Схема изготовления пропускающих голограмм

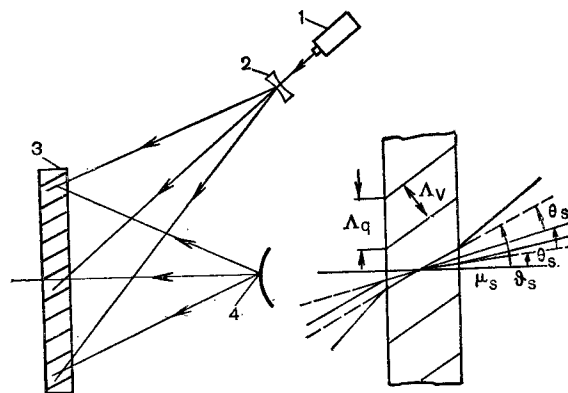


Рис. 4. Элементарная голограммная структура пропускающей голограммы, соответствующая точечному элементу поверхности объекта: 1 — лазер; 2 — расширительная линза; 3 — фотопластинка; 4 — точечный элемент поверхности объекта

На рис. 5 показана схема воспроизведения изображения отражательной голограммой. Пучок света лазера 1 расширяется линзой 2 и образует восстанавливающий пучок 3, падающий на голограмму 4 в том же направлении, в котором через фотопластинку проходил опорный пучок при изготовлении голограммы.

При падении на голограмму часть восстанавливающего пучка света 3 проходит через нее, не меняя своего направления. Другая

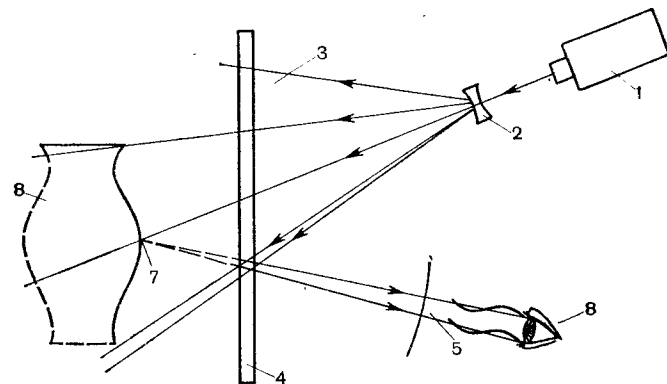


Рис. 5. Схема воспроизведения голографического изображения отражательной голограммой

часть дифрагирует — отражается от голограммы, образуя восстановленный пучок. Каждая элементарная голограммная структура формирует элементарную восстановленную объектную волну 5, точно такую же, как при получении голограммы.

При рассматривании голограммы элементарные волны в соответствии со своей фазой складываются на сетчатке глаза 6, формируя изображение элемента 7 на поверхности объекта 8. Множество восстановленных элементарных изображений составляет единое непрерывное восстановленное изображение объекта 8. Есть еще направления (высшие дифракционные порядки), в которых могут возникнуть дифрагированные пучки света. Однако для изобразительной голографии эти высшие порядки не имеют существенного значения, так как легко устраняются увеличением толщины слоя регистрирующей среды.

Важно отметить, что направление восстановленного луча при воспроизведении голографического изображения определяется расстоянием между полосами элементарной голограммной структуры по поверхности слоя. При этом, согласно рис. 6, справедлива следующая формула:

$$\sin \mu_k = \frac{\lambda_k}{n_{k0} \Lambda_q} + \sin \vartheta_k, \text{ или, точнее, } \sin \mu_k = \frac{m_D \lambda_k}{n_{k0} \Lambda_q} + \sin \vartheta_k, \quad (1.2)$$

где n_{k0} — показатель преломления слоя голограммы (средний); λ_k — длина волны света при воспроизведении изображения; ϑ_k — угол направления восстанавливающего луча в слое; μ_k — угол направления дифрагированного луча в слое; m_D — порядок

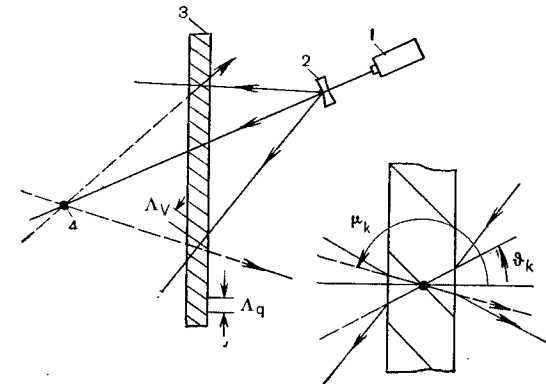


Рис. 6. Дифракция света на элементарной голограммной структуре отражательной голограммы: 1 — лазер; 2 — расширяющая линза; 3 — голограмма; 4 — восстановленное изображение точечного элемента объекта

дифракции, равный: $0, \pm 1, \pm 2, \dots$; Λ_q — период голограммной структуры по поверхности слоя, который, согласно рис. 4, определяется следующим соотношением:

$$\Lambda_q = \frac{\lambda_s}{\sin \mu_s - \sin \vartheta_s}, \quad (1.3)$$

где λ_s — длина волны света при получении голограммы; ϑ_s — угол падения опорного луча в слое; μ_s — угол направления объектного луча в слое при получении голограммы.

Интенсивность восстановленного пучка света определяется степенью различия показателя преломления света. Это различие тем больше, чем больше была интенсивность объектного пучка при получении голограммы.

На рис. 7 показана схема воспроизведения изображения пропускающими голограммами. Пучок лазера 1 расширяется линзой 2, и образуется восстанавливающий пучок 3, падающий на голограмму 4 в том же направлении, в котором опорный пучок проходил через фотопластинку при изготовлении голограммы.

При падении на голограмму часть восстанавливающего пучка 3 проходит через нее, не меняя своего направления. Другая часть пучка света дифрагирует — преломляется голограммой, образуя восстановленный пучок 5. Каждая элементарная голограммная структура формирует элементарную восстановленную волну 6, та-

кую же, как при получении голограммы. Эти волны складываются на сетчатке глаза 7, вызывая восприятие объекта 8.

Таким образом, голограмма, освещенная лазером с той же длиной волны и из той же точки по отношению к пластинке, что и при получении голограммы, порождает световую копию объекта. При этом отдельные элементарные голограммные структуры воспроизводят независимо друг от друга отдельные элементы изображения,

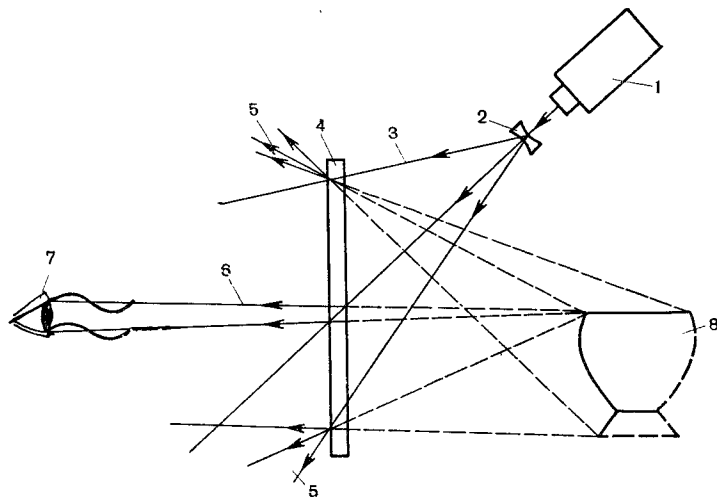


Рис. 7. Схема воспроизведения голографического изображения пропускающей голограммой

которые сливаются вместе в единое голографическое (в общем случае трехмерное) изображение объекта.

Если голограмма освещается пучком, в точности соответствующим опорному, восстановленная волна идентична исходной объектной волне; наблюдатель воспринимает мнимое изображение предмета как естественное, точно так же, как он видит отражение в зеркале. Если восстанавливающий пучок сформировать так, чтобы его лучи были направлены противоположно лучам опорного пучка, и осветить этим сопряженным пучком голограмму с обратной стороны, наблюдатель увидит действительное изображение объекта в месте его первоначального положения, но псевдоскопическим (удаленные точки предмета будут восприниматься расположенными ближе к наблюдателю). Это явление может быть использовано для создания различных оптических эффектов, в частности в процессе копирования.

1.1.3. Влияние отклонений направления восстанавливающих лучей и длины волны света

Если восстанавливающие лучи падают на голограмму при воспроизведении изображения под другим углом, чем при получении голограммы, дифрагированные лучи также меняют свое направление. При этом справедлива следующая формула:

$$\sin \mu_h = \frac{\lambda_h}{\lambda_s} (\sin \mu_s - \sin \vartheta_s) + \sin \vartheta_h, \quad (1.4)$$

где μ_s, ϑ_s — углы падения объектных и опорных лучей при получении голограммы; μ_h, ϑ_h — углы, определяющие направления дифрагированных и восстанавливающих лучей света при воспроизведении изображения; λ_s, λ_h — длина волны света при получении голограммы и при воспроизведении изображения.

Если при воспроизведении изображения длина волны имеет такое же значение, как при получении голограммы, а направление восстанавливающего пучка немного отклоняется от направления опорного пучка при получении голограммы, формула (1.4) приобретает более простой вид:

$$\Delta \mu \cong \Delta \vartheta \frac{\cos \vartheta_s}{\cos \mu_s}, \quad (1.5)$$

где $\Delta \mu$ — отклонение направления дифрагированного луча при воспроизведении изображения по отношению к направлению объектного луча при получении голограммы, соответствующее отклонению направления восстанавливающих опорных лучей $\Delta \vartheta$, т. е.

$$\Delta \mu = \mu_h - \mu_s; \quad \Delta \vartheta = \vartheta_h - \vartheta_s.$$

Как видно из формулы (1.5) и рис. 8, отражательная голограмма ведет себя почти как зеркало. При увеличении угла падения восстанавливающего луча на голограмму почти на такую же величину возрастает угол отражения от голограммы восстановленного луча. Пропускающая голограмма ведет себя подобно линзе. При увеличении угла падения восстанавливающего луча света на голограмму почти на такую же величину возрастает угол преломления голограммой восстановленного луча.

Если при воспроизведении изображения угол падения восстанавливающих лучей сохраняется таким же, как при получении голограммы, а длина волны света немного изменяется, формула (1.4) приобретает другой, также более простой вид. Для объектных лучей, перпендикулярных к поверхности фотопластинки при записи голограммы, получается следующее соотношение:

$$\Delta \mu \cong \frac{\Delta \lambda}{\lambda_s} \sin \vartheta_s, \quad (1.6)$$

где $\Delta\lambda$ — отклонение длины волны света при воспроизведении изображения от длины волны при получении голограммы; т. е.

$$\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_s.$$

Из формул (I.5) и (I.6) видно, что при расходимости лучей в восстанавливающем пучке, обусловленной угловыми размерами

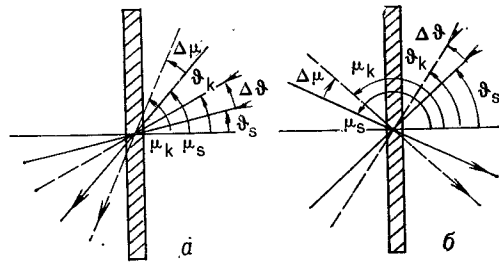


Рис. 8. Изменение направления объектных лучей света при изменении направления опорных лучей в процессе воспроизведения изображения для: а — пропускающих голограмм; б — отражательных голограмм

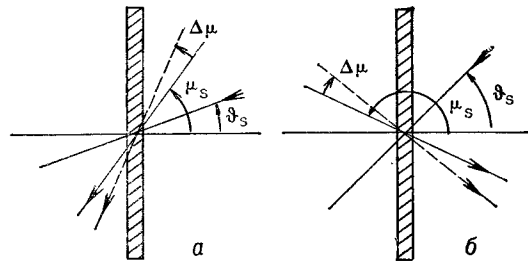


Рис. 9. Изменение направления объектных лучей при изменении длины волны в процессе воспроизведения изображения для: а — пропускающих голограмм; б — отражательных голограмм

источника света, когда на точечный элемент голограммы падают лучи света в различных направлениях (в пределах угла $\Delta\theta$), а также при нарушении монохроматичности восстанавливающего пучка ($\Delta\lambda$) при воспроизведении изображения (см. рис. 8 и 9) происходит рассеяние дифрагированных лучей света ($\Delta\mu$), что может привести к ухудшению резкости и хроматизму воспроизводимого изображения.

Из сказанного следует, что для восстановления голограммы идеальным является точечный монохроматический источник света.

1.1.4. Влияние толщины слоя регистрирующей среды

Отклонения длины волны света и направления восстанавливающих лучей при воспроизведении изображения от значений этих величин при получении голограммы вызывают отклонения направления дифрагированных лучей. Наблюдается также изменение интенсивности дифрагированного пучка в зависимости от толщины слоя голограммы, где происходит дифракция света.

Изменение интенсивности дифрагированного пучка удобно характеризовать изменением дифракционной эффективности голограммы, равной отношению мощности излучения в основном направлении, в котором формируется изображение (основной порядок дифракции), к мощности излучения, падающего на голограмму при воспроизведении изображения.

Если толщина слоя голограммы равна первоначальной толщине слоя регистрирующей среды фотопластинки, на которой голограмма записана, изменение дифракционной эффективности с отклонением длины волны света и направления восстанавливающих лучей можно определить по формуле.

$$\eta = \eta_m \frac{\sin^2 \frac{\pi d}{d_{кр}}}{\left(\frac{\pi d}{d_{кр}}\right)^2}, \quad (I.7)$$

где η_m — максимальная дифракционная эффективность голограммы, достигаемая при равных значениях длины волны света и направлений опорных и восстанавливающих лучей света; η — дифракционная эффективность голограммы в случае, когда длина волны света и направление восстанавливающих лучей отличается от длины волны и направлений опорных лучей при получении голограммы; d — толщина слоя голограммы, в котором происходит дифракция света при воспроизведении изображения; $d_{кр}$ — критическая толщина слоя голограммы, при которой дифракционная эффективность, зависящая от отклонений длины волны света и направления лучей восстанавливающего пучка, снижается до нуля в первом дифракционном минимуме.

На рис. 10 показана зависимость дифракционной эффективности голограммы от толщины ее слоя, соответствующая формуле (I.7).

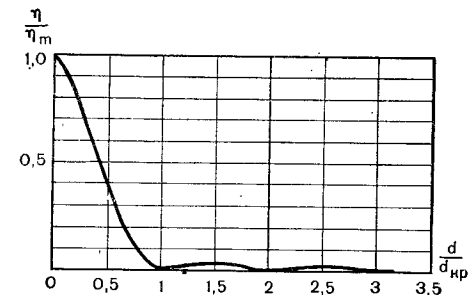


Рис. 10. Зависимость дифракционной эффективности голограммы от приведенного значения толщины ее слоя

При значениях $\frac{d}{d_{кр}} = 1,5; 2,5; 3,5...$ возникают дифракционные максимумы, относительная дифракционная эффективность которых равна:

Порядок дифракционного максимума	1	2	3	4	5	6
$\frac{d}{d_{кр}}$	0	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5
$\frac{\eta}{\eta_m}$	1	$4,5 \times 10^{-2}$	$1,62 \times 10^{-2}$	$8,27 \times 10^{-3}$	5×10^{-3}	$3,35 \times 10^{-3}$

Если при воспроизведении изображения направление падающих лучей света сохраняется таким же, как при получении голограммы, а длина волны света изменяется, критическая толщина слоя голограммы может быть определена по формуле:

$$d_{кр} \cong \left| \frac{\lambda_s \lambda_k \cos \mu_s}{2n_k (\lambda_s - \lambda_k) \sin^2 \theta_s} \right|, \quad (I.8)$$

где n_k — показатель преломления регистрирующей среды; λ_s, λ_k — длина волны света при получении голограммы и при воспроизведении голографического изображения; μ_s — угол направления объектного луча в толще слоя голограммы при ее получении; θ_s — половина угла между объектным и опорным лучами в фотослое.

Если при воспроизведении голографического изображения направление падающих лучей света отличается от того, которое имело место при получении голограммы, а длина волны света также отличается или сохраняется неизменной, для определения критической толщины слоя голограммы можно воспользоваться следующей формулой:

$$d_{кр} \cong \left| \frac{\lambda_k^0 \lambda_k \cos \mu_k^0}{2n_k (\lambda_k^0 - \lambda_k) \sin^2 \theta_k^0} \right|, \quad (I.9)$$

где λ_k^0 — приведенное значение длины волны света, при котором достигается максимальное значение дифракционной эффективности голограммы для заданного направления восстанавливающих лучей света (θ_k) при воспроизведении изображения, отличающегося от направления опорных лучей при получении голограммы (θ_s); λ_k — заданное значение длины волны света при воспроизведении изображения; μ_k^0 — угол направления дифрагированных лучей света при воспроизведении голографического изображения для заданного направления восстанавливающих лучей света (θ_k) и для

приведенной длины волны света λ_k^0 ; θ_k^0 — половина угла между направлениями дифрагированных μ_k^0 и восстанавливающих θ_k лучей света.

Значения углов μ_k^0 и θ_k^0 находят по следующим формулам:

$$\mu_k^0 = \mu_s + \theta_s - \theta_k; \quad \theta_k^0 = \theta_s + \theta_s - \theta_k;$$

$$\theta_s = \frac{\mu_s - \theta_s}{2}.$$

Значение длины волны света λ_k^0 определяется соотношением:

$$\lambda_k^0 = \lambda_s \frac{\sin \theta_k^0}{\sin \theta_s}. \quad (I.10)$$

Приведенные соотношения выражают количественно важное свойство голограмм, имеющих толщину слоя, существенно большую длины волны света (толстослойных голограмм). Максимальная дифракционная эффективность голограмм достигается в том случае, если длина волны света и направление падающих лучей при воспроизведении изображения имеют такие же значения, как при получении голограммы.

Если изменяется длина волны света при сохранении направления восстанавливающих лучей или изменяется направление восстанавливающих лучей при сохранении длины волны, происходит снижение дифракционной эффективности голограммы и тем более, чем больше толщина слоя. Однако, когда одновременно меняется длина волны света и, соответственно, направление восстанавливающих лучей, высокая дифракционная эффективность голограммы сохраняется даже при большой толщине ее слоя, если при этом соблюдается условие Брэгга (I.10).

Из рассмотрения соотношений (I.7) — (I.10) следует, что толстослойные голограммы обладают свойством спектральной и угловой селективности, отражательные голограммы — более высокой спектральной селективностью, чем пропускающие.

Рассмотрим для примера получение пропускающей и отражательной голограмм в красном свете при $\lambda_s = 0,647$ мкм и воспроизведение изображений в желтом свете при $\lambda_k = 0,578$ мкм. Примем направление опорных пучков в воздухе равным $\theta_s' = 45^\circ$; направление объектных лучей перпендикулярным поверхности слоя, т. е. для отражательной голограммы $\mu_s = 180^\circ$ и для пропускающей голограммы $\mu_s = 0^\circ$ показатель преломления для слоя равным $n_k = 1,52$. Если толщина слоя сохраняется неизменной, согласно формуле (I.8), критическая толщина слоя отражательной голограммы равна $d_{кр} = 1,89$ мкм, а пропускающей $d_{кр} = 31,1$ мкм.

Из приведенного примера видно, что при толщине слоя голограммы $d = 5$ мкм отражательная голограмма практически полностью теряет дифракционную эффективность при переходе от красного к желтому свету; дифракционная эффективность пропускающей голограммы практически не меняется.

Высокая спектральная селективность толстослойных отражательных голограмм обеспечивает возможность воспроизведения изображения в белом свете с непрерывным спектром излучения. Пропускающие и отражательные голограммы обладают при равной толщине слоя одинаковой угловой селективностью. Угловая селективность позволяет регистрировать в одном голографическом слое и затем воспроизводить независимо друг от друга красную, зеленую и синюю составляющие цветного изображения.

Приведенные формулы для количественной оценки влияния толщины слоя на свойства голограммы можно использовать и в тех случаях, когда толщина слоя меняется от момента экспонирования фотопластинки до момента воспроизведения изображения вследствие усадки или набухания. При этом в указанные формулы подставляются приведенные значения для длины волны света и для направления объектных лучей света (при неизменном направлении опорных лучей), которые вычисляются по следующим формулам (рис. 11):

$$\begin{aligned}\theta_s^* &= \theta_s + \psi_k - \psi_s; \quad \mu_s^* = \mu_s + 2(\psi_k - \psi_s); \\ \operatorname{tg} \psi_k &= \frac{\operatorname{tg} \psi_s}{k_d}; \quad \lambda_s^* = \lambda_s \frac{\sin \mu_s^* - \sin \theta_s}{\sin \mu_s - \sin \theta_s}; \\ \psi_s &= \frac{\mu_s - \theta_s}{2},\end{aligned}\quad (1.11)$$

где θ_s^* , μ_s^* , λ_s^* — приведенные значения θ_s , μ_s , λ_s , учитывающие изменение угла наклона полос голограммной структуры от ψ_s до ψ_k ;

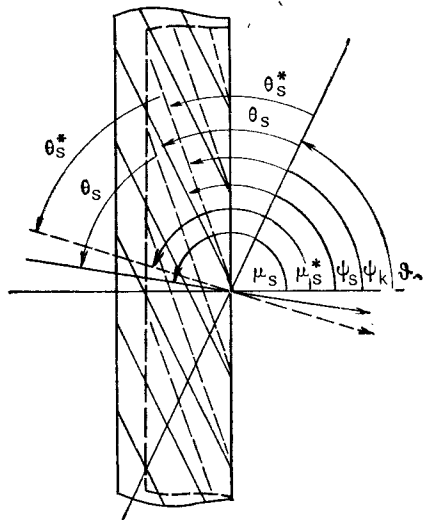


Рис. 11. Изменение голограммной структуры при изменении толщины слоя голограммы вследствие его усадки или набухания

k_d — коэффициент усадки слоя, равный отношению толщины слоя при воспроизведении изображения к толщине слоя при получении голограммы.

1.1.5. Цветные голограммы

Голограммы, полученные в свете лазера с одной длиной волны, воспроизводят монохромные изображения. Для получения цветных голограмм, правильно воспроизводящих в едином

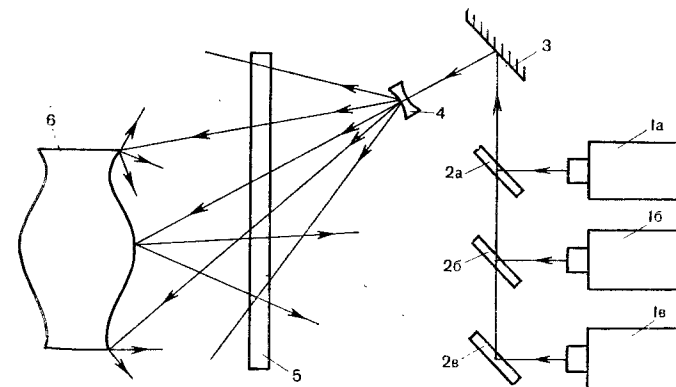


Рис. 12. Схема изготовления цветных отражательных голограмм

изображении детали объекта разного цвета, необходимо регистрировать и затем воспроизводить в простейшем случае три цветоделенных изображения объекта, например красное, зеленое и синее.

Было бы желательно изготавливать цветные голограммы на цветных однослойных панхроматических голографических фотоматериалах. В этом случае экспонирование фотоматериала ведется одновременно в трех длинах волн, как показано на рис. 12 для съемки отражательной голограммы, где 1, а, б, в — лазеры, излучающие свет в красной, зеленой и синей частях спектра; 2, а, б, в — оптические элементы, позволяющие совместить излучения трех лазеров в одном пучке; 3 — зеркало; 4 — линза, расширяющая суммарный пучок света лазеров; 5 — фотопластинка; 6 — объект съемки.

При съемке цветной пропускающей голограммы (рис. 13, а) объект 4 освещается лазерными источниками 1, а, б, в. Опорные пучки б а, б, в направляются на фотопластинку под разными углами. Съемка пропускающей голограммы может осуществляться также по схеме рис. 13, б, когда опорные пучки трех цветов суммируются и падают на фотопластинку под одним и тем же углом.

В случае получения цветного голографического изображения в одном фотослое с панхроматической чувствительностью независимо от схемы съемки наблюдается существенное снижение дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум, приводящее к худше-

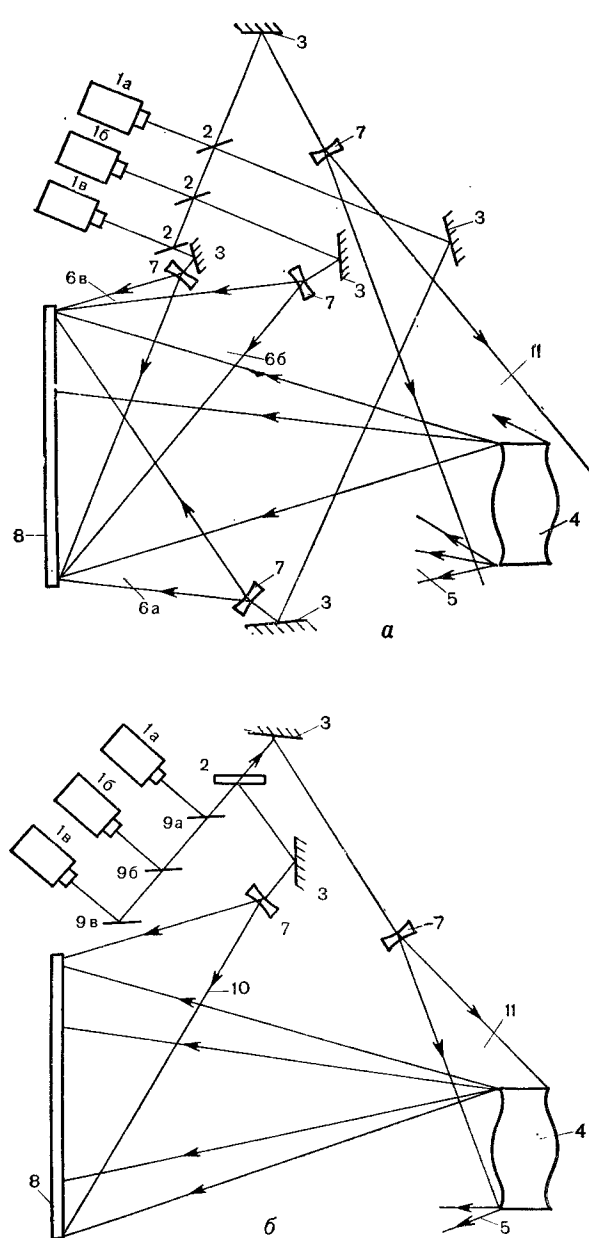


Рис. 13. Схемы изготовления пропускающих цветных голограмм: *а* — с тремя опорными пучками; *б* — с суммарным опорным пучком; 1, *а*, *б*, *в* — лазеры, излучающие в красной, зеленой и синей частях спектра; 2 — светоделительная пластинка; 3 — зеркало; 4 — объект съемки; 5 — объектный пучок; 6, *а*, *б*, *в* — опорные пучки; 7 — расширятельная линза; 8 — фотопластинка; 9, *а*, *б*, *в* — оптические элементы для совмещения пучков; 10 — суммарный опорный пучок; 11 — суммарный освещающий пучок

му качеству восстановленных изображений, что ограничивает использование однослойных цветных голографических фотоматериалов в изобразительной голографии.

Одним из способов изготовления высококачественных цветных голограмм является способ последовательного получения трех отдельных цветных голограмм. Для этого можно использовать, например, схему рис. 1 и последовательно получить частичные голограммы на различных пластинках с фотослоями, чувствительными к красному, зеленому и синему свету. При этом необходимо придерживаться определенной методики, позволяющей точно совместить частичные голограммы при восстановлении.

Другой способ — изготовление частичных голограмм в отдельных слоях многослойного фотоматериала на одной подложке (пластинке или пленке). При этом каждый слой фотоматериала должен быть сенсibilизирован к одному участку спектрального диапазона (синему, зеленому, красному), причем зелено- и красочувствительные слои должны десенсибилизироваться к синей зоне спектра. Это относится к случаям съемки и отражательных и пропускающих голограмм.

Для получения пропускающей голограммы возможна другая структура многослойного фотоматериала, когда верхний, ближний к объекту слой чувствителен к синей области спектра; фильтровый слой не пропускает излучения синего диапазона, а затем расположены зелено- и красочувствительные слои. Возможно также введение фильтрующего красителя непосредственно в синечувствительный слой.

Важно, чтобы при воспроизведении цветного изображения, состоящего из трех частей, не возникало ложных изображений вследствие дифракции света разных длин волн на разноименных голограммных структурах. Например, красное излучение не должно дифрагировать на структурах, полученных в зеленом и синем излучениях, и т. д.

При восстановлении цветных отражательных голограмм на достаточно толстых слоях подавление ложных изображений обеспечивается спектральной селективностью (раздел I.1.4), что позволяет использовать для восстановления изображения источник белого (нелазерного) света.

При восстановлении цветной пропускающей голограммы для достижения высокой спектральной селективности, устраняющей ложные изображения, потребуется большая толщина каждого слоя голограммы и суммарный слой по толщине превысит 100 мкм. В настоящее время технология изготовления и фотохимической обработки таких слоев недостаточно разработана. Поэтому для устранения ложных изображений используют угловую селективность голограммы.

Для всех схем получения цветных голограмм имеются следующие общие требования: 1) необходимо точное соблюдение взаимного углового расположения источников света и голограммы в процессах съемки и восстановления изображения; 2) процессы обра-

ботки и условия хранения голограммы не должны приводить к изменению толщины слоев частичных голограмм. При большой глубине объектов съемки эти требования становятся достаточно жесткими.

1.1.6. Копирование голограмм

С одной голограммы, изготовленной по схеме, показанной на рис. 1 или на рис. 3, можно получить большое количество голограмм-копий. Для этого достаточно вместо объекта вблизи фо-

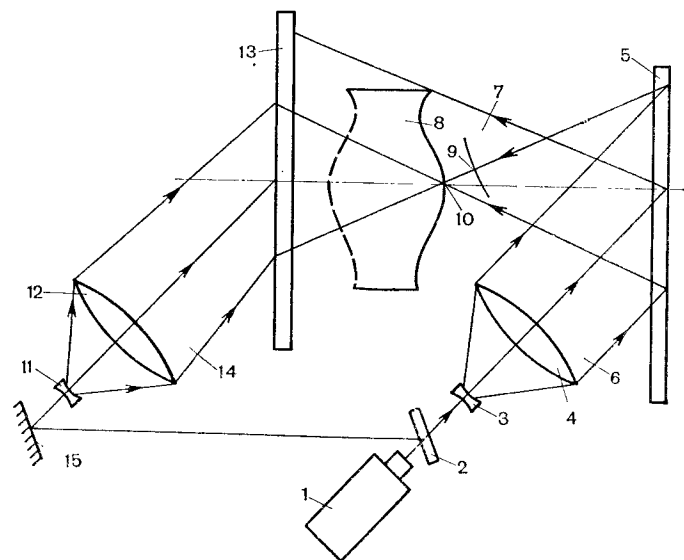


Рис. 14. Схема копирования отражательных голограмм

топластинки расположить голограмму-оригинал. Восстановленное с ее помощью световое поле будет близко к световому полю, возникшему при освещении объекта. Поэтому голографические поля при изготовлении голограммы-оригинала и голограммы-копии оказываются очень близкими друг другу, структуры их почти одинаковы.

Однако для изготовления голограмм-копий на практике используют обычно несколько иную схему, которая позволяет приблизить изображение к голограмме и даже вынести его вперед, расположив частично или полностью перед голограммой.

На рис. 14 показана схема копирования отражательных голограмм, первоначально изготовленных по схеме рис. 1. Здесь голограмма-оригинал 5 освещается восстанавливающим пучком света 6, который с помощью лазера 1, линзы 3, расширяющей пучок, и линзы 4, сужающей этот пучок, формируется так, что направление восстанавливающих лучей при копировании оказывается прямо про-

тивоположным направлению опорных лучей при получении голограммы-оригинала.

При таком направлении восстанавливающих лучей меняют свое направление на противоположное и восстановленные лучи. Дифрагированный пучок 7 формирует в пространстве действительное изображение объекта 8. При этом каждая элементарная дифрагированная волна 9 формирует соответствующий точечный элемент изо-

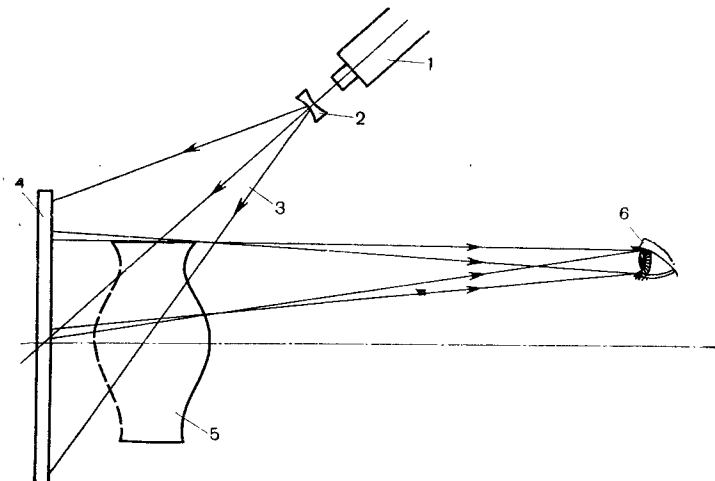


Рис. 15. Схема воспроизведения изображения отражательной голограммой-копией (действительное изображение)

бражения 10. Воспроизводимое изображение 8 имеет обратный рельеф: если посмотреть на голограмму, показанную на рис. 14, слева можно увидеть псевдоскопическое изображение, т. е. выпуклые детали объекта будут казаться вогнутыми, а вогнутые выпуклыми. При воспроизведении изображения голограммы-копии предусматривается повторное обращение, в результате чего правильный рельеф восстанавливается и результирующее изображение является ортоскопическим.

Для регистрации на голограмме-копии восстановленного с голограммы-оригинала объемного изображения 8 с помощью светоделительной пластинки 2, зеркала 15, линз 11, 12 формируется сходящийся опорный пучок 14, сопряженный с опорным пучком, использованным при получении голограммы-оригинала. Опорный пучок 14 падает на фотопластинку 13 с противоположной стороны. Таким образом, записывается отражательная голограмма-копия.

Фотопластинка 13 голограммы-копии устанавливается на достаточно большом расстоянии от голограммы-оригинала 5. Меняя местоположение фотопластинки относительно восстановленного с голограммы-оригинала изображения, можно разместить и записать

сюжетно важную часть объекта в плоскости голограммы-копии, чем обеспечить ее максимальную резкость при восстановлении.

Для восстановления изображения с голограммы-копии (рис. 15) применяется лазер 1 и расширительная линза 2, формирующая расходящийся пучок 3, сопряженный с опорным пучком 14 (см. рис. 14), использовавшимся при получении голограммы-копии. На-

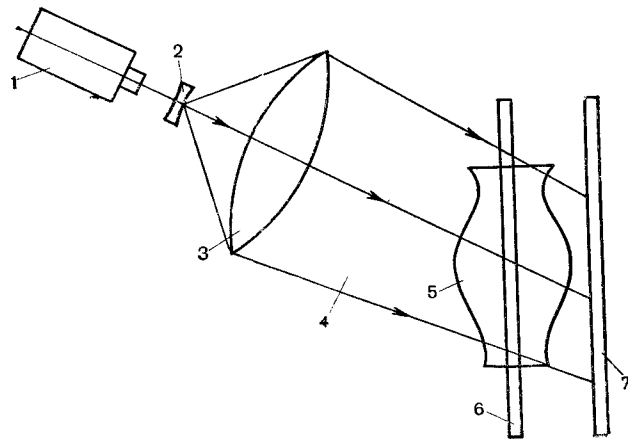


Рис. 16. Упрощенная схема копирования отражательных голограмм: 1 — лазер; 2 и 3 — формирующие линзы; 4 — сходящийся пучок; 5 — восстановленное с голограммы-оригинала изображение; 6 — фотопластинка для записи голограммы-копии; 7 — голограмма-оригинал

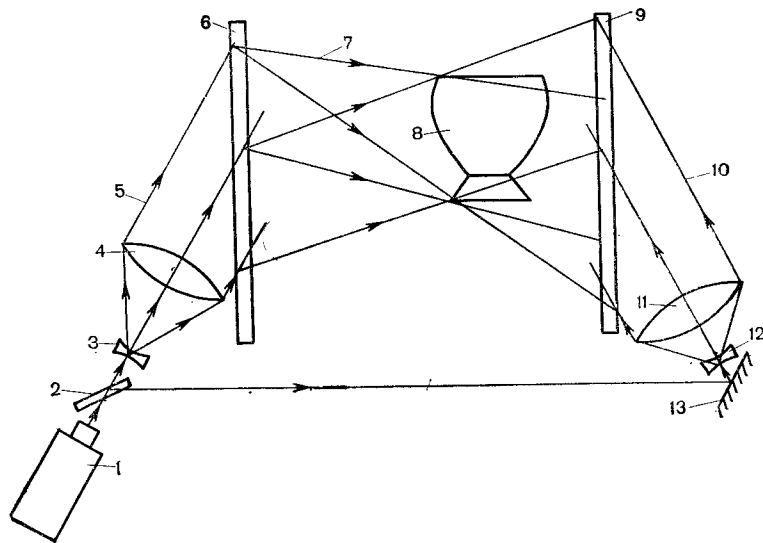


Рис. 17. Схема копирования отражательной голограммы с пропускающей голограммы-оригинала

блюдатель 6 воспринимает восстановленное с голограммы 4 изображение 5 так же, как в случае его записи непосредственно с объекта.

Формирование широких и однородных сходящихся пучков для процесса копирования является достаточно сложным, так как требует применения оптических элементов больших размеров (линз, зеркал). Поэтому на практике на этапах записи и восстановления голограммы-оригинала и копирования неглубоких монохромных объектов используются расходящиеся пучки. Для минимизации возникающих при этом искажений необходимо строить оптические схемы таким образом, чтобы апертурные углы пучков были минимальными и можно было считать лучи параллельными.

Если объект не очень глубок по сравнению с размерами пластинки или не требуется при копировании создавать большой выход изображения перед плоскостью голограммы, схема копирования упрощается (рис. 16).

В ряде случаев бывает целесообразным иметь голограмму-оригинал в виде пропускающей голограммы и путем копирования с нее получать отражательные голограммы. Такой процесс может быть оправданным в тех случаях, когда объект является живым или достаточно большим. В первом случае учитываются условия техники безопасности (см. раздел 1.4.4). Во втором случае — соображения, связанные с меньшей энергией лазера благодаря применению более чувствительных голографических фотоматериалов, предназначенных для получения пропускающих голограмм.

На рис. 17 показана схема копирования отражательной голограммы с пропускающей голограммы-оригинала. Пучок света лазера 1 расщепляется светоделительной пластинкой 2 на два. Из одного пучка линзами 3 и 4 формируется сходящийся восстанавливающий пучок 5, падающий на голограмму 6. Восстановленный пучок 7 пропускающей голограммы 6 строит действительное изображение 8 впереди голограммы, так как восстанавливающие лучи при воспроизведении изображения противоположны по направлению опорным лучам при получении этой голограммы. Объектный пучок 7 проходит через фотопластинку 9, которая освещается одновременно с противоположной стороны опорным пучком 10, формируемым линзами 11, 12 и зеркалом 13.

Полученная таким образом отражательная голограмма восстанавливается по схеме рис. 15, где в качестве источника света для восстановления показан лазер. Возможно применение и других источников света (см. раздел 1.2.6).

1.1.7. Перевод многоактурных стереоскопических изображений в голографические

При изготовлении голограмм в качестве исходных изображений используют не только голографические, но в ряде случаев и многоактурные стереоскопические изображения. Целесообразность применения такого способа обусловлена тем, что процес-

сы массового тиражирования голограмм для определенных областей использования могут оказаться более простыми, чем для стереофотографий. Кроме того, устройства для демонстрации трехмерных изображений могут оказаться также более простыми. С другой стороны, для получения многоракурсных стереоскопических изображений в обычном, а не когерентном свете, во многих случаях предоставляются лучшие возможности, чем для получения голограмм-оригиналов.

Для перевода в голографические используют различного рода многоракурсные стереоскопические изображения. Наиболее перспективным является способ голографирования многоракурсных стереоскопических изображений, получаемых с помощью мелкоструктурного растра, состоящего из большого количества сферических линз, и объектива с большой апертурой.

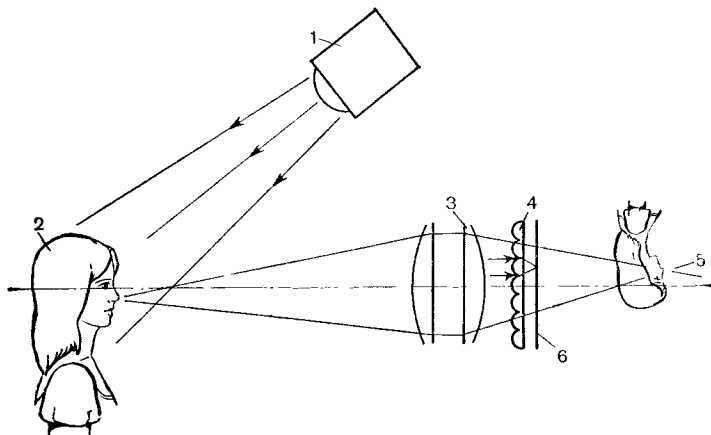


Рис. 18. Схема съемки многоракурсного стереоскопического изображения с помощью линзового растра и объектива с большой апертурой

На рис. 18 показана схема съемки многоракурсного стереоскопического изображения с помощью линзового растра и объектива с большой апертурой. Съемка производится следующим образом. Осветительный прибор обычного некогерентного света 1 освещает объект 2. Лучи света, отраженные от объекта съемки, проходят через объектив 3 с большой апертурой (чем больше апертура объектива, тем шире зона видения объекта). В отсутствие растра 4 объектив сформировал бы трехмерное изображение 5 позади своей фокальной плоскости. Между главной и фокальной плоскостями объектива располагается растр 4, состоящий из большого количества линз со сферическими поверхностями, которые фокусируют на фотопластинке (или фотопленке) 6 изображения различных элементов поверхности объекта 2.

Под каждой линзой растра на пластинке 6 фокусируется только часть изображения объекта 2. Каждый малый элемент поверхнос-

ти объекта 2 фокусируется на фотопластинке под несколькими линзами (меньше общего числа линз). При этом изображения под разными линзами отличаются друг от друга ракурсами. Таким образом, на фотопластинке 6 регистрируется в виде отдельных фрагментов многоракурсное стереоскопическое изображение.

Объектив с большой апертурой в данной схеме выполняет важные функции. Он определяет должное качество изображения, регистрируемого на фотоматериале, обеспечивает малую продолжительность экспонирования за счет большого относительного отверстия; формирует широкую зону наблюдения, удобную для зрителя при рассматривании результирующего трехмерного изображения.

С помощью растра достигается регистрация многоракурсного стереоскопического изображения.

На рис. 19 показана схема перевода растрового изображения, получаемого по схеме рис. 18, в голографическое изображение. Пу-

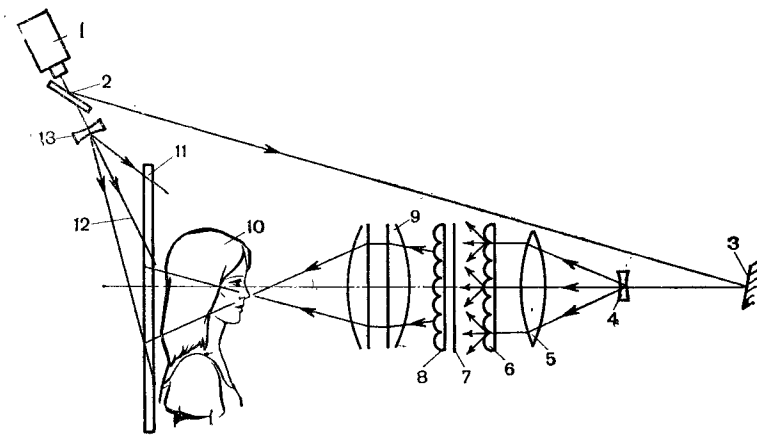


Рис. 19. Схема перевода растрового изображения в голографическое

чок света лазера 1 расщепляется светоделительной пластинкой 2 на два. Один из них с помощью зеркала 3, расширительных линз 4, 5 и светорассеивающего растра 6 направляется на пластинку 7, на которой зарегистрировано растровое изображение по схеме рис. 18. С помощью растра 8 и объектива 9 в обратном ходе лучей (к тому, что имело место при регистрации изображения) воспроизводится трехмерное изображение 10. Вблизи этого изображения располагается голографическая фотопластинка 11, которая с противоположной стороны освещается опорным пучком света 12, сформированным линзой 13. После обработки фотопластинки 11 получается голограмма, которая при освещении восстанавливающим пучком света в направлении, противоположном тому, при котором производилось голографирование, воспроизводит трехмерное голографическое изображение.

Рассмотренным способом можно получать не только монохромные, но и цветные голограммы. При этом необходимо использовать цветные фотоматериалы и лазеры с излучением в красной, зеленой и синей частях спектра.

Голографическое изображение, полученное из растрового изображения по изложенному способу, имеет множество горизонтальных и вертикальных ракурсов и изменяется, как изображение реального объекта, если глаза зрителя смещаются по отношению к голограмме как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

Применяются способы перевода в голографические также и многоаккурсных стереоскопических изображений, обладающих только горизонтальными ракурсами. Одним из таких способов является способ подвижного фотоаппарата, который делает множество снимков одного и того же объекта, перемещаясь от снимка к снимку, немного меняя точку зрения. Полученные таким образом фотоснимки голографируются на одной и той же фотопластинке или фотопленке под различными, близкими друг другу направлениями. При этом для достижения наибольшей дифракционной эффективности голограммы целесообразнее регистрацию исходных изображений производить одновременно, хотя применяется и последовательное голографирование изображений, которое требует более простой аппаратуры.

Источники света для изобразительной голографии и голографического кинематографа подразделяют на две группы: для записи и воспроизведения голограмм. К первой относятся лазеры непрерывного действия и импульсные различных типов; ко второй — лазеры непрерывного или квази-непрерывного действия и источники некогерентного света.

Ко всем лазерам для записи голограмм предъявляются специальные требования: необходимая длина волны генерации (одна или несколько для цветной съемки), достаточная мощность и высокая степень когерентности излучения. Кроме того, импульсные лазеры для съемки голографического фильма должны работать в частотном режиме с нужной длительностью импульса и с кинематографической частотой повторения.

Степень когерентности лазера определяется постоянством разности фаз излучаемого света в двух фиксированных точках пространства в течение некоторого периода времени. Разность фаз в двух точках вдоль направления распространения света за время Δt определяет временную, или продольную, когерентность лазерного источника, а в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, — пространственную, или поперечную, когерентность. Оба вида когерентности взаимосвязаны, и это приводит к ограничениям при аппаратурном решении оптических схем лазерных генераторов.

Временная и пространственная когерентность лазера обусловлены модовой структурой его излучения. Лазер может генерировать большое число разного вида продольных и поперечных световых колебаний, которые называют *модами*, имеют очень близкие друг другу значения длины волны и отличаются фазовыми соотношениями.

Моды принято сокращенно обозначать тремя индексами: m , n , q , каждый из которых может быть целым положительным числом: 0, 1, 2, 3... Два первых числа m , n характеризуют различие световых колебаний для поперечных направлений по отношению к оптической оси резонатора, а третье число q определяет различие световых колебаний в продольном направлении.

Важнейшим колебательным процессом, соответствующим основному излучению лазера, является одномодовый, отвечающий значениям чисел $m=0$, $n=0$. Излучение при этом также называется *одномодовым* и обозначается TEM_{00} (буквы являются начальными буквами английских слов: поперечное, электро-, магнитное). Излучение лазера называется *одночастотным*, если колебательный процесс в резонаторе характеризуется числом $q=0$.

Одномодовый, одночастотный режим работы лазера — оптимальный для изготовления голограмм.

Рассмотренным способом можно получить не только монохромные, но и цветные голограммы. При этом необходимо использовать цветные фотоматериалы и лазеры с излучением в красной, зеленой и синей частях спектра.

Голографическое изображение, полученное из растрового изображения по изложенному способу, имеет множество горизонтальных и вертикальных ракурсов и изменяется, как изображение реального объекта, если глаза зрителя смещаются по отношению к голограмме как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

Применяются способы перевода в голографические также и много ракурсных стереоскопических изображений, обладающих только горизонтальными ракурсами. Одним из таких способов является способ подвижного фотоаппарата, который делает множество снимков одного и того же объекта, перемещаясь от снимка к снимку, немного меняя точку зрения. Полученные таким образом фотоснимки голографируются на одной и той же фотопластинке или фотопленке под различными, близкими друг другу направлениями. При этом для достижения наибольшей дифракционной эффективности голограммы целесообразнее регистрацию исходных изображений производить одновременно, хотя применяется и последовательное голографирование изображений, которое требует более простой аппаратуры.

Источники света для изобразительной голографии и голографического кинематографа подразделяют на две группы: для записи и воспроизведения голограмм. К первой относятся лазеры непрерывного действия и импульсные различных типов; ко второй — лазеры непрерывного или квази-непрерывного действия и источники некогерентного света.

Ко всем лазерам для записи голограмм предъявляются специальные требования: необходимая длина волны генерации (одна или несколько для цветной съемки), достаточная мощность и высокая степень когерентности излучения. Кроме того, импульсные лазеры для съемки голографического фильма должны работать в частотном режиме с нужной длительностью импульса и с кинематографической частотой повторения.

Степень когерентности лазера определяется постоянством разности фаз излучаемого света в двух фиксированных точках пространства в течение некоторого периода времени. Разность фаз в двух точках вдоль направления распространения света за время Δt определяет временную, или продольную, когерентность лазерного источника, а в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, — пространственную, или поперечную, когерентность. Оба вида когерентности взаимосвязаны, и это приводит к ограничениям при аппаратном решении оптических схем лазерных генераторов.

Временная и пространственная когерентность лазера обусловлены модовой структурой его излучения. Лазер может генерировать большое число разного вида продольных и поперечных световых колебаний, которые называют *модами*, имеют очень близкие друг другу значения длины волны и отличаются фазовыми соотношениями.

Моды принято сокращенно обозначать тремя индексами: m , n , q , каждый из которых может быть целым положительным числом: 0, 1, 2, 3... Два первых числа m , n характеризуют различие световых колебаний для поперечных направлений по отношению к оптической оси резонатора, а третье число q определяет различие световых колебаний в продольном направлении.

Важнейшим колебательным процессом, соответствующим основному излучению лазера, является одномодовый, отвечающий значениям чисел $m=0$, $n=0$. Излучение при этом также называется *одномодовым* и обозначается TEM_{00} (буквы являются начальными буквами английских слов: поперечное, электро-, магнитное). Излучение лазера называется *одночастотным*, если колебательный процесс в резонаторе характеризуется числом $q=0$.

Одномодовый, одночастотный режим работы лазера — оптимальный для изготовления голограмм.

Степень временной когерентности лазерного излучения, связанной с продольной модовой структурой, зависит от спектра излучения и характеризуется длиной когерентности — расстоянием, на котором еще не происходит недопустимых фазовых нарушений. При этом

$$l \leq \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad \Delta\nu = \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2}, \quad (I.12)$$

где λ — длина волны света; $\Delta\lambda$ — спектральная ширина линии излучения лазера; l — длина когерентности, которая должна превышать разность хода объектного и опорного пучков до максимально удаленных по глубине точек объекта, голограмму которого необходимо получить; c — скорость света; $\Delta\nu$ — полоса частот линии излучения лазера. Например, при $\lambda = 530$ нм $\Delta\lambda = 10^{-4}$ нм, $l \leq 2,8$ м, $\Delta\nu = 107$ МГц.

Пространственная когерентность, обусловленная поперечной модовой структурой, определяется размерами сечения и расходимостью лазерного пучка.

Из многочисленного семейства лазеров для голографической съемки применимы два типа лазеров непрерывного действия — газовые лазеры (на нейтральных атомах с тлеющим разрядом, на ионизированных газах с дуговым разрядом) и твердотельные импульсные лазеры (на рубине, гранате и неодимовом стекле). Для воспроизведения голографических изображений и копирования пригодны те же непрерывные лазеры, что и для съемки, а также лазеры на парах металлов. Имеется класс лазеров на красителях, которые можно применить для проекции и в перспективе использовать для съемки голограмм.

Для восстановления изображения с голограмм с минимальными искажениями и максимальным разрешением в общем случае требуется, чтобы восстанавливающий источник имел те же длины волн, когерентность, направление распространения и расходимость, что и опорный пучок при записи голограмм. В зависимости от назначения и дальнейшего использования восстановленного изображения требования к когерентности и длине волны излучения могут быть в значительной степени снижены. Если, например, голограмма отражательная и используется непосредственно для визуального восприятия, то для ее восстановления обычно применяют источники некогерентного белого света, например лампы накаливания или дуговые лампы. Достаточно высокое разрешение при восстановлении монохроматических изображений глубоких объектов, соразмерных с голографической пластиной, получается при использовании ртутных шаровых газоразрядных ламп, имеющих линейчатый спектр и разрядный промежуток менее 0,5 мм. В случае пропускающих голограмм, в том числе голограмм сфокусированного изображения, применимы лазеры и источники монохроматического некогерентного света, причем к лазерам не предъявляется требований работы в одномодовом и одночастотном режиме (см. главу I.4).

I.2.1. Гелий-неоновые лазеры

Для получения изобразительных голограмм с самого начала работ по голографии и по настоящее время широко применяют гелий-неоновые лазеры непрерывного действия. На примере гелий-неонового удобно объяснить устройство любого газового лазера, схема которого приведена на рис. 20.

Активным элементом лазера является газоразрядная трубка 1 с окнами из точных параллельных пластин, расположенных под уг-

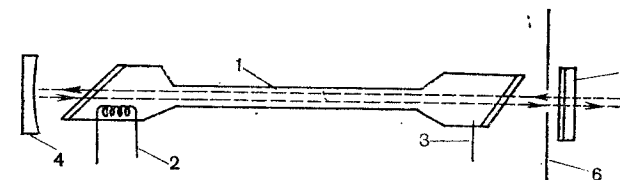


Рис. 20. Схема газового лазера на нейтральных атомах

лом Брюстера. Разряд в газе возникает под действием напряжения, приложенного к электродам 3 (анод) и 2 (катод). Резонатор образован двумя зеркалами — выходным 5, частично пропускающим, и полностью отражающим 4. Из теории резонаторов следует, что одномодовый режим может быть получен в любом лазере с помощью диафрагмы 6. Однако применение диафрагмы сужает сечение активного вещества лазера и тем самым уменьшает мощность генерации. Часто диафрагма вообще отсутствует, и ее функции выполняют стенки трубки лазера, как, например, у лазера ЛГ-38.

Одномодовый режим получается путем использования одного из зеркал резонатора сферической формы. Оптимальный режим генерации по выходной мощности в одномодовом режиме обеспечивается выбором требуемого радиуса кривизны одного из зеркал, обычно — непр пропускающего. В лазере на смеси нейтральных газов гелия и неона при давлении в трубке около 3 мм рт. ст. происходит накачка тлеющим разрядом при малых плотностях тока, что обеспечивает высокий КПД лазера, надежность, большой срок службы. Гелий-неоновые лазеры недорогие, удобные в ремонте и эксплуатации и поэтому широко применяются в изобразительной голографии. Наиболее освоен лазер ЛГ-38, имеющий выходную мощность до 50 мВт на длине волны 0,633 мкм в одномодовом (но не одночастотном) режиме.

Для изготовления небольших неглубоких голограмм и исследовательских работ используют лазер ЛГ-79 с меньшей выходной мощностью (до 20 мВт). Аналогичные параметры (без эталона) имеет гелий-неоновый лазер типа HNA производства фирмы «Carl Zeiss», Йена (ГДР). Недостаток этих лазеров — малая длина когерентности (до 20 см) и мощность. Однако с усовершенствованием голографических фотоматериалов (повышением их чувствительнос-

ти) последний недостаток может стать несущественным, будет только ограничение по глубине передаваемого пространства, обусловленное длиной когерентности.

В тех случаях, когда голографируется объект с глубиной, превышающей длину когерентности лазера, при простейшей схеме лазера может быть получен одночастотный режим работы одним из наиболее простых и технически реализуемых способов — введением

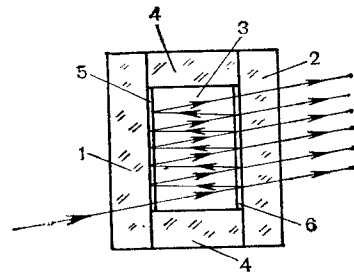


Рис. 21. Схема эталона Фабри-Перо

внутри основного резонатора дополнительного частотного фильтра в виде эталона Фабри-Перо. Эталон состоит из одной плоскопараллельной пластинки с двумя отражающими поверхностями или из двух пластинок 1 и 2 (рис. 21) с воздушным промежутком 3, строго фиксированным прокладкой 4 из материала с малым коэффициентом теплового расширения (кварц, ситал, инвар). Отражающие поверхности пластинок имеют диэлектрические покрытия 5 и 6 с достаточно высоким коэффициентом отражения. Расстояние между пластинками 1 и 2 и угол наклона

эталона к оптической оси резонатора устанавливают таким образом, чтобы излучение основной моды проходило через эталон почти без потери интенсивности, а излучение продольных мод других порядков сильно ослаблялось. В результате колебания в резонаторе на нежелательных модах не возбуждаются.

Примером возможности повышения длины когерентности и мощности является гелий-неоновый лазер фирмы «Spectra Physics» (США), модель 125, где в резонаторе установлен эталон Фабри-Перо. Кроме того, в нем применена высокочастотная накачка, а вдоль трубки расположены постоянные магниты. Эти усовершенствования и высокое качество оптических элементов позволили получить мощность излучения без эталона до 120 мВт, а с эталоном 50—60 мВт с длиной когерентности более 10 м.

Большинство лазеров генерирует излучение на нескольких длинах волн. Для выделения нужной линии имеется несколько методов: изготавливают узкополосные зеркала резонатора, используют селективное поглощение (например, в гелий-неоновом лазере внутри резонатора устанавливают кювету с метаном), подбирают параметры газовой смеси. Основные параметры гелий-неоновых лазеров приведены в табл. 1.

Б. Г. Турухано применил для цветной съемки ксеноновый лазер типа ЛГИ-37, генерирующий в импульсном режиме (частота повторения 200 Гц, длительность импульса 300 нс, импульсная мощность 2,5 кВт) на линиях 0,430; 0,455; 0,495; 0,500; 0,515; 0,535 0,539; 0,595 мкм от фиолетового до оранжевого цвета. В спектре генерации лазера нет красных линий, он имеет малую среднюю мощность (около 15 мВт).

Таблица 1

Основные данные гелий-неоновых лазеров

Модель, фирма	Длина волны излучения, нм	Мощность излучения, мВт	Режим работы	Диаметр пучка, мм	Расходимость пучка, мрад	Длина когерентности, м	Габаритные размеры, мм	Потребляемая мощность, кВт	Способ охлаждения
«Spectra Physics» (США), модель 125 А	632,8	Не менее 25 (с эталоном)	Одномодовый, одночастотный	2,0	0,7	Более 10	275×275×1910	0,45	Воздушное естественное
HNA «Carl Zeiss», Йена (ГДР)	632,8	Не менее 25 (с эталоном)	Одномодовый, одночастотный	1,6		Более 10			Воздушное естественное
ЛГ-38	632,8	50	Одномодовый	3	0,6	0,2	290×300×2005	0,6	Воздушное естественное

Фирма, модель	Длина волны, нм	Мощность излуче									
		676,4	647,1	568,2	530,9	520,8	528,7	514,5	501,7	496,5	488

Лазеры на

«Spectra Physics» (США), модель 164, 165-01	0,12	0,5	0,2	0,2	0,09							
модель 171-01	0,9	3,5	1,1	1,5	0,7							
модель 2020-11	0,15	0,6	0,2	0,2	0,09							
«Coherent» (США) Innova K3000	0,9	3,5	0,8	1,0	0,45							
Innova 100-K3	0,9	3,5	1,1	0,7							0,4	
Innova 90-K	0,12		0,15		0,07							
«Carl Zeiss» Йена (ГДР) ILK 120	0,12	0,5										
ЛГН-404 Б	0,6											

Лазеры

«Spectra Physics» (США), модель 164, 165-09 модель 171-09 модель 2020-05						0,34 1,0	2,0 7,5 2,0	0,4 1,5 0,4	0,7 2,5 0,7	1,5 6,5 1,5	0,75 2,7 0,75	
«Coherent» (США) Innova-20 Innova 100-20 «Carl Zeiss», Йена (ГДР) ILA 120						1,7	8,3 8,5	1,7 1,7	2,8 2,8	6,5 6,5	2,8 2,8	
«Carl Zeiss», Йена (ГДР) ILA 120-1							0,7	0,05	0,2	0,7	0,25	
ЛГ-106М-1							0,9	0,05	0,25	1,25	0,4	
ЛГН-404А												

ния, Вт				Во всех ли- ниях	Диаметр пуч- ка, мм	Расходимость пучка, мрад	Гарантийный срок службы	Габаритные размеры, мм		Потребляемая мощность, кВт	Охлаж- дение
472,7	465,8	457,9	454,5					генера- тор:	блока пита- ния		

криптоне

					1,33	0,69		146× 150× 1400	427× 267× 404	13,1	Водяное, 8,5 л/мин
					1,58	0,56		146× 150× 1880	467× 476× 917	38	Водяное, 13,25 л/мин
					1,25— 1,4	0,69— 0,77		1285× 181× 241	681× 444× 370	22	Водяное, 9,5 л/мин
							2000 час за 18 мес	1930× 203× 152	632× 711	45	Водяное, 23 л/мин
					1,9	0,4	18 мес			60	
					1,5		1000 час	1400× 280× 170	500× 575× 1200	12	Водяное, 6 л/мин
					4	1	100 час			12	Двухкон- турное,

на аргоне

0,3 1,2 0,3	0,2 0,75 0,2	0,35 1,35 0,35	0,12 1,1 0,12	5 18 5	1,33 1,25— 1,4	0,69 0,69— 0,77		Как у криптонового Как у криптонового Как у модели 2020-11			
1,1 1,1	0,78 1,4	1,2 1,4	0,78	20	1,9 1,9	0,6 0,4	18 мес	Как у K3000 50			
		0,1		Не ме- нее 2	1,5	0,5	1000 час	Как у ILK 120			
		0,15		Не ме- нее 3 1			500 час	Как у ILA 120 1040× 290× 274			
				1	4	1	750 час	425× 405× 340	16	Водяное, 8—10 л/мин	Как у ЛГН-404 Б

Фирма, модель	Длина волны, нм	Мощность излуче									
		676,4	647,1	568,2	530,9	520,8	528,7	514,5	501,7	469,5	488

Лазеры на аргоне

НЭТИ		1,5	0,45	0,45	0,3		4,8	0,75	1,2	4,7	1,9	
«Spectra Physics» (США) модель 165-02	0,02	0,2	0,08	0,08	0,02		0,2	0,02	0,05	0,2	0,06	
«Carl Zeiss», Йена (ГДР) ILM 120		0,25	0,07				0,25			0,25		

С его помощью были получены цветные отражательные голограммы неглубоких объектов (менее 10 мм) размером 13×18 см. Лазер не отвечает современным требованиям по цветной голографии, но может использоваться как задающий генератор в лазерах на красителях.

1.2.2. Криптоновые и аргоновые ионные лазеры

Более высокие параметры, необходимые для голографических съемок, имеют ионные газовые лазеры на аргоне, криптоне и их смесях. Они обеспечивают большую длину когерентности, высокую по сравнению с гелий-неоновыми лазерами мощность и возможность генерирования на одной из многих длин волн выборочно или одновременно на нескольких, что имеет существенное значение для цветной голографии. Ионный лазер имеет призму, эталон, регулирующую диафрагму (рис. 22). Активным элементом служит газоразрядная трубка, в которой накачка осуществляется дуговым разрядом в ионизированном газе с высокой плотностью тока (например, ток разряда достигает 30—50 А при диаметре канала около 3 мм). Поэтому в конструкции разрядной трубки предъявляются высокие требования к катоду и устойчивости стенок трубки к действию разряда. Необходимо принудительное водяное охлаждение (например, мощность, потребляемая лазером, составляет 25 кВт и выше).

Мощность, Вт				Во всех дли- нах	Диаметр пуч- ка, мм	Расходимость пучка, мрад	Гарантийный срок службы	Габаритные размеры, мм		Потребляемая мощность, кВт	Охлаж- дение
472,7	465,8	457,9	454,5					генера- тора	блока пита- ния		
0,4	0,3	0,79	0,25	15	3		500 час	250× 900× 1500	900× 700× 450	25	Двухкон- турное, с дистилли- рованной водой во внут- реннем контуре Водяное 8,4 л/мин
		0,02			1,23	0,78	1 год	146× 150× 1140	427× 267× 404	13	
					1,5		1000 час	Как у ILM 120			

Для поддержания стабильного излучения лазера эталон в совершенных моделях ионных лазеров термостатируется, применяется автоматическая юстировка элементов резонатора, электронная стабилизация тока. Вследствие постепенного поглощения рабочего газа стенками трубки в лазерах предусматривается поддержание

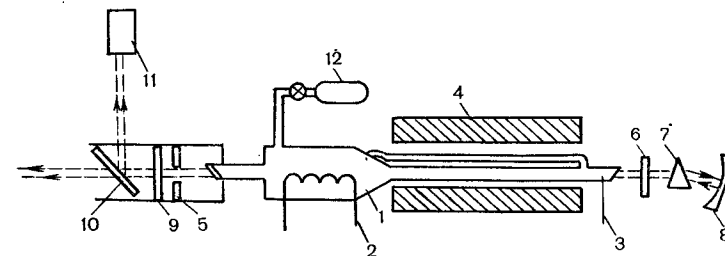


Рис. 22. Схема ионного газового лазера непрерывного действия: 1 — газоразрядная трубка; 2 — катод; 3 — анод; 4 — соленоид; 5 — диафрагма; 6 — эталон; 7 — призма; 8 — сферическое глухое зеркало; 9 — выходное зеркало; 10 — светоделительная пластинка; 11 — измеритель мощности; 12 — баллон с газом

давления газа от отдельного баллона. Это несколько уменьшает КПД, увеличивает расход энергии, удорожает прибор. Однако ионные лазеры дают возможность голографирования глубоких объектов больших размеров, что невозможно с другими газовыми лазерами.

В табл. 2 приведены данные аргоновых и криптоновых лазеров, применяемых для изготовления голограмм. Лазеры фирмы «Spectra Physics» (США), модели 164, 165, 171, освоены в эксплуатации и успешно используются в изобразительной монохроматической и цветной голографии, а модель 171 была применена в НИКФИ для съемки первого цветного голографического мультипликационного фильма (см. раздел 1.7.2). Вызывает большой интерес перспектива использования лазеров этой же фирмы новейших моделей 2020, имеющих повышенный срок службы за счет усовершенствования их конструкции. Близки по параметрам к лазерам «Spectra Physics» новые лазеры фирмы «Coherent» (США) серии Innova. В табл. 2 указаны параметры нескольких ионных лазеров, выпускаемых нашей отечественной промышленностью, которые можно модернизировать для получения одночастотного режима, введя в резонатор эталон. Без усовершенствования лазеры могут быть использованы только для воспроизведения или копирования голограмм вследствие малой длины когерентности. Данные в таблице приведены для работы без эталона, а некоторые линии генерации опущены, так как не являются основными.

Для цветной голографии представляет интерес прокачной ионный лазер разработки Новосибирского электротехнического института на аргоне и криптоне или их смеси. Лазер имеет возможность выбора линии генерации с помощью внутррезонаторного селектора длин волн и работы с высокой выходной мощностью на линиях 0,647 мкм (1,5 Вт); 0,514 мкм (4,8 Вт), 0,488 мкм (4,7 Вт). Общая мощность на всех линиях 15 Вт, длина когерентности — не менее 1 м.

1.2.3. Импульсные твердотельные лазеры

Для получения голограмм движущихся объектов, в том числе портрета человека, используют импульсные твердотельные лазеры с высокой выходной энергией в течение короткого импульса излучения. Активной средой в этих лазерах являются кристаллы или стекло, активированные ионами металлов или редкоземельных элементов.

Наиболее широко применяют лазер на искусственно выращенном кристалле рубина Al_2O_3 , в котором некоторые ионы Al^{3+} замещены ионами Cr^{3+} . Генерация на рубине получается на длине волны 0,694 мкм.

Кроме рубинов к активным средам в твердотельных лазерах относят иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ) с неодимом и стекло с неодимом. ИАГ имеет химический состав $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Кристаллы ИАГ активируются ионами Nd^{3+} . Генерация на ИАГ с неодимом происходит на длине волны 1,06 мкм. Для голографии используют вторую гармонику излучения 0,53 мкм (зеленая линия). Ионы неодима можно вводить в различные стекла. Наилучшими свойствами обладают фосфатные стекла, активированные неодимом, которые могут работать в частотном режиме с высокими энергиями излучения.

Генерация на неодимовом стекле также происходит на длине волны 1,06 мкм, и для голографии применяют вторую гармонику излучения.

Импульсный режим работы твердотельных лазеров задается системой накачки активной среды. Форму импульса и модовую структуру выходного излучения определяет оптическая схема лазера.

Лазер может работать в режиме модулированной добротности с коротким импульсом излучения (десятки наносекунд), либо в режиме свободной генерации с длительностью импульса до сотен микросекунд.

При работе в первом режиме в резонаторе устанавливается модулятор добротности, который на время возникновения импульса излучения сильно увеличивает добротность резонатора за счет значительного уменьшения поглощения света, проходящего через модулятор.

Применяют модуляторы двух типов: пассивные и активные. Пассивный модулятор добротности представляет собою кювету с раствором красителя, например фталоцианинового, просветляющегося по мере прохождения через него света, что приводит к генерации мощного импульсного излучения (десятки мегаватт). Спустя несколько десятков наносекунд прекращается генерация; поглощение света вновь возрастает. Такой модулятор недостаточно стабилен, и момент начала генерации трудно контролировать, что приводит к нестабильности энергии генерации, хотя с помощью пассивного модулятора можно получить одномодовый режим работы лазера.

От этих недостатков свободны активные (электрооптические) модуляторы добротности, пропускание света которыми зависит от приложенного к управляющим электродам внешнего напряжения, вызывающего изменение показателя преломления лучей света в кристалле (рис. 23). С помощью таких электрооптических модуляторов можно управлять моментом возникновения импульса излучения лазера. Активные модуляторы изготавливаются на кристаллах KDP — дигидрофосфата калия (KH_2PO_4); ADP — дигидрофосфата аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$); DKDP и другие материалы имеют различные оптические схемы и способы подведения управляющего напряжения. Наиболее предпочтительна схема проходного затвора на кристалле с брестеровскими призмами на торцах, которая имеет минимальные потери и переотражения. Такой затвор позволяет варьировать схемы резонатора. Отсутствие отражений на торцах увеличивает КПД и не разрушает когерентности излучения лазера при попадании нежелательных бликов. Возможно совместное использование обоих затворов, когда активный модулятор управляет моментом начала импульса, а пассивный обеспечивает одномодовый режим. В отсутствие модуляторов добротности в режиме свободной генерации длительность импульса определяется режимом накачки. При этом широкий импульс излучения состоит из последовательности коротких импульсов (пичков). Исследования показали, что при этом получают одномодовый режим и достаточная длина когерентности (до 0,5—0,7 м).

Для изобразительной голографии имеет смысл использовать лазер в режиме свободной генерации. При этом длительный импульс вполне пригоден для съемки большого класса объектов, даже портрета человека.

Следует отметить, что отечественные твердотельные лазеры для целей изобразительной голографии и голографического кинемато-

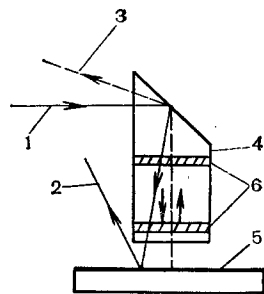


Рис. 23. Схема электрооптического модулятора света: 1 — луч света на входе модулятора; 2 — луч света на выходе модулятора при отсутствии внешнего электрического напряжения; 3 — луч света на выходе модулятора при наличии напряжения; 4 — кристалл; 5 — зеркало; 6 — управляющие электроды

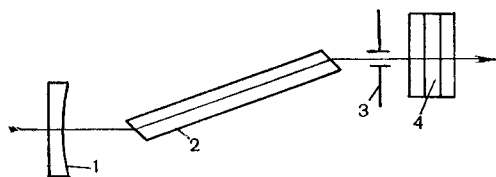


Рис. 24. Схема твердотельного лазера на рубине, работающего в режиме свободной генерации: 1 — сферическое зеркало с радиусом кривизны 2 м; 2 — рубиновый стержень; 3 — диафрагма; 4 — резонансный отражатель

графа реализованы пока только в виде лабораторных макетов, которые позволили провести большое количество исследований по импульсным фотоматериалам, а также осуществить экспериментальные работы по регистрации монохромных отражательных голограмм, голографической киносъемке и киноинтерферометрии.

В НИКФИ сконструирован макет лазера на рубине, работающего в режиме свободной генерации (рис. 24). Активный его элемент — рубиновый стержень с длиной активной части 120 мм, диаметром 8 мм. Энергия в импульсе 0,1 Дж с длительностью импульса 500 мкс. С его помощью проведены офтальмологические исследования, в том числе получены отражательные голограммы глаза животного и изобразительные голограммы размером 9×12 см.

Также в НИКФИ созданы макеты импульсных частотных лазеров красного и зеленого диапазонов на рубине и гранате для импульсной съемки цветного голографического фильма (см. раздел 1.7.2). Эти лазеры можно использовать для изобразительной голографии и получения голографического портрета человека, причем лазеры в случае работы в режиме однократного импульса имеют энергетические параметры более высокие, чем в частотном режиме.

Д. И. Стаселько и другие опубликовали результаты исследования макета импульсного рубинового лазера для записи изобразительных отражательных голограмм. В лазере использован рубино-

вый элемент диаметром 16 мм, длиной 120 мм, имеющий малое количество неоднородностей. Рубиновый элемент помещали в цилиндрический осветитель с диффузно отражающей поверхностью. Накачку осуществляли с помощью спиральной лампы. Энергия накачки лазера до 15 кДж, длительность импульса 5 мс, длительность генерации 1 мс. Селекция поперечных мод получена с помощью неустойчивого резонатора, образованного выпуклым зеркалом радиусом 1,33 м с коэффициентом отражения 99,5% и плоским зеркалом в виде стопы из трех плоскопараллельных пластинок толщиной 4 мм, обеспечивающих селекцию продольных мод. Увеличение резонатора 2,8. Для дополнительной селекции продольных мод в резонатор под небольшим углом к оси помещали плоско-параллельную пластинку толщиной 15 мм. Получена энергия генерации 5 Дж, длина когерентности 74 см.

Таблица 3

Основные данные импульсных лазеров на рубине, неодимовом стекле и гранате

Фирма, тип лазера	Активный элемент	Размеры активного элемента		Энергия импульса излучения, Дж	Продолжительность импульса	Частота повторения импульсов, Гц
		длина, мм	диаметр, мм			

Режим свободной генерации

«JK Lasers» (Англия) System 2000						
FQR-1	Рубин	101	6,35	5,5	0,3—1 мс	6 или 60
FQR-2	Рубин	101	10,5	10	0,3—1 мс	6 или 60
FQG-2	Неодимовое стекло	127	10,5	10	0,3—1 мс	6 или 60
FQG-4	Неодимовое стекло	229	10,5	40	1—10 мс	6 или 60
FQY-1	Гранат	76	6,35	0,5	0,08 мс	3000
FQY-2	Гранат	76	6,35	1,0	0,12 мс	1200
FQY-6	Гранат	101	10,5	40	1—10 мс	300

Режим модулированной добротности

«JK Lasers» (Англия) System 2000						
QSR-2	Рубин	101	10,5	1,6	20—30 нс	6 или 60
QSG-1	Неодимовое стекло	127	10,5	1,5	25—40 нс	6
QSG-2	Неодимовое стекло	76	6,35	0,1	12—20 нс	60 или 3000
QSY-1	Гранат	76	6,35	0,1	12—20 нс	60 или 3000
QSY-2	Гранат	101	6,35	0,1	12—20 нс	60 или 3000
«Quanta Ray» (США)	Гранат			0,75	6—7 нс	2—20
«Quantel» (Франция) YG482A	Гранат			0,5	15 нс	10

Аналогичные параметры в режиме свободной генерации у отечественного лазера «Ирис»: длительность генерации 0,6—0,8 мс, энергия в импульсе до 8 Дж.

Имеются рекламные данные о выпускаемых за рубежом импульсных твердотельных лазерах с высокими параметрами, некоторые из которых, вероятно, применимы для изобразительной голографии (табл. 3).

При исследовании процессов вибраций, контроля прочностных свойств различных изделий используют лазеры с двумя импульсами излучения с заданным коротким интервалом между ними. В зависимости от скорости перемещения поверхности исследуемого изделия интервал между импульсами может изменяться от нескольких микросекунд до нескольких миллисекунд.

Параметры зарубежных двухимпульсных рубиновых лазеров приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры рубиновых лазеров с двойным импульсом

Фирма, модель	«Apollo Lasers» Модель 22 (США)	«Lab. Dr. Steinbicheer» (ФРГ)
Режим работы	TEM ₀₀	TEM ₀₀
Энергия в импульсе, Дж	0,05—2,5 (двойной импульс)	0,4—0,6 (каждый импульс)
Длительность импульса, нс	5—125	30
Интервал между импульсами, мкс	1—500	1—800
Частота повторения, имп/мин (двойных)	1—4	1
Длина когерентности, м	2—10	1

В НИКФИ рубиновый лазер, разработанный для голографического кинематографа, применяют для исследований по интерферометрии в двухимпульсном режиме (см. раздел I.7.2).

I.2.4. Лазеры на парах металлов

Для воспроизведения голографических изображений, в особенности больших размеров, со значительной глубиной передаваемого пространства и для больших аудиторий целесообразно применение лазеров на парах металлов, например меди. Активный элемент лазера — газоразрядная трубка, содержащая медь. Разрядный канал нагревают до температуры около 1500°C, что обеспечивает необходимое давление паров меди. Газоразрядные трубки вследствие такой высокой температуры изготавливают из окиси алюминия или окиси бериллия. Для предотвращения конденсации паров металла на холодных торцевых окнах в трубку добав-

ляют неон при давлении в несколько миллиметров ртутного столба. В торцевых фланцах располагают зеркала, закрепленные в юстировочных механизмах.

Излучение лазера на парах меди происходит наиболее эффективно на зеленой линии с длиной волны 0,510 мкм и на желтой линии с длиной волны 0,578 мкм. Лазеры на парах меди и ряда других металлов работают эффективно только в частотно-импульсном режиме. Например, лазер со средней мощностью на выходе 2 Вт работает с частотой 10 кГц. Лазеры на парах металлов, особенно меди, отличаются от лазеров и других видов высоким КПД генерации. В настоящее время созданы лазеры со средней мощностью излучения свыше 40 Вт при КПД преобразования около 1%.

Вследствие высокого усиления лазеры на парах меди могут работать даже без зеркал резонатора. Большая расходимость излучения делает их неприменимыми для съемки голограмм. Такие лазеры оказываются очень удобными в качестве восстанавливающих источников света, в частности для голографической кинопроекции.

Применяя в лазерах на парах меди неустойчивые резонаторы с большим увеличением, можно добиться очень малой расходимости излучения, близкой к дифракционной, что, возможно, позволит использовать такие лазеры для изготовления голограмм. При этом средняя мощность излучения уменьшается примерно вдвое.

Представляют перспективный интерес лазеры на парах золота, генерирующие красное излучение с длиной волны 0,628 мкм, близкой к оптимальному значению, соответствующему правильной передаче цвета наиболее характерных объектов, а также лазеры на парах висмута, генерирующие синее излучение с длиной волны 0,472 мкм. Эти лазеры также характеризуются высокими значениями коэффициента полезного действия и работают эффективно в частотно-импульсном режиме.

Для исследования фотоматериалов и работ на хромированной желатине представляют интерес гелий-кадмиевые лазеры, принцип работы которых подобен гелий-неоновому лазеру. Конструкция их отличается тем, что трубка имеет резервуар для изотопа кадмия. Гелий-кадмиевые лазеры генерируют в синей области спектра (0,441 мкм), мощность излучения до 50 мВт, длина когерентности до 10 см. Отечественной промышленностью выпускается гелий-кадмиевый лазер ЛГ-31 с указанными параметрами.

I.2.5. Лазеры на красителях

Оптимальные для записи и воспроизведения длины волн могут быть получены с помощью лазеров непрерывного действия и импульсных на красителях. Правда, их применение ограничено, так как производство промышленных изделий только ожидается.

Оптическая схема лазера на красителе включает резонатор с активным элементом в виде кюветы с раствором красителя или

потока красителя. Лазеры непрерывного действия могут быть только с лазерной накачкой, импульсные — с лазерной или ламповой.

Лазеры непрерывного действия генерируют в широком диапазоне длин волн — от синего до красного — с высокими энергиями излучения и имеют параметры, приемлемые для голографической съемки: длину когерентности до 50 м, мощность порядка нескольких ватт при КПД до 50%. Однако каждый такой лазер включает два — для накачки (например, аргоновый) и для генерации. При

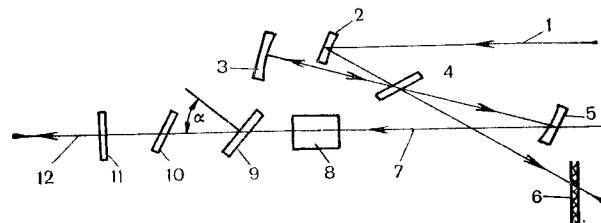


Рис. 25. Схема лазера на красителе непрерывного действия фирмы «Spectra Physics» модель 580 А: 1 — пучок лазера накачки; 2 — входное зеркало; 3 — глухое зеркало; 4 — кювета с красителем; 5 — коллимирующее зеркало; 6 — поглощающее покрытие; 7 — пучок лазера на красителе; 8 — точный эталон с пьезоэлементами; 9 — настроечный клин; 10 — грубый эталон; 11 — выходное зеркало; 12 — выходное излучение; α — угол Брюстера

цветной съемке требуются три двойных комплекта с блоками питания. Перестройка лазера связана с заменой красителя. Отечественная промышленность такие лазеры пока не выпускает. Схема лазера фирмы «Spectra Physics», модель 580 А, приведена на рис. 25. Накачка производится аргоновым лазером мощностью 4 Вт (во всех линиях). Параметры лазера следующие:

Краситель	Длины волн, мкм	Мощность, мВт
Родамин 6G	0,57—0,62	100
Родамин 110	0,54—0,565	45
Родамин В	0,603—0,65	50

Диаметр выходного пучка 0,5 мм, расходимость 1,5 мрад на длине волны 0,6 мкм. Длина когерентности более 10 м.

Схема кольцевого лазера на красителях непрерывного действия фирмы «Spectra Physics», модель 380 А, приведена на рис. 26, а спектральные характеристики излучения для различных красителей — на рис. 27. Накачка осуществляется аргоновым лазером на линии 0,514 мкм. Выходная мощность лазера 380 А составляет 550 мВт при мощности накачки 4 Вт и 800 мВт при мощности на-

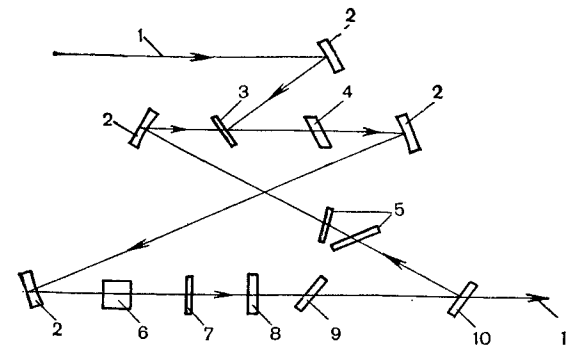


Рис. 26. Схема кольцевого лазера на красителях фирмы «Spectra Physics» модель 380 А: 1 — пучок лазера накачки; 2 — зеркало; 3 — кювета с красителем; 4 — компенсатор астигматизма; 5 — элемент частотной перестройки; 6 — ячейка Фарадея; 7 — грубый эталон; 8 — точный эталон; 9 — двулучепреломляющая пластинка; 10 — выходное зеркало; 11 — выходное излучение

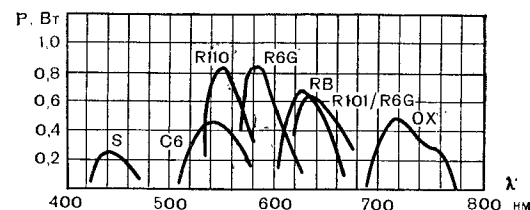


Рис. 27. Мощность излучения лазера 380 А на различных красителях: S — стильбен; C6 — кумариин; R110 — родамин 110; R6G — родамин 6G; RB — родамин 6B; R101/R6G — родамин 101/родамин 6G; OX — оксазиин 1

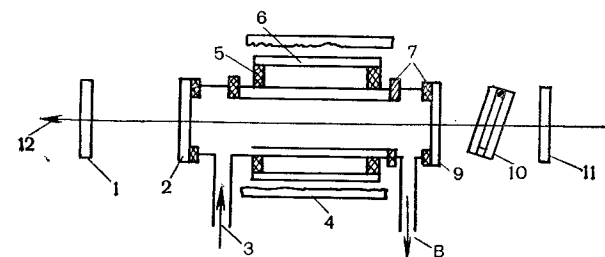


Рис. 28. Схема импульсного лазера на красителе: 1 — выходное зеркало; 2, 9 — окна; 3 — вход раствора красителя; 4 — отражатель; 5 — электрод; 6 — лампа-кювета; 7 — уплотнение; 8 — выход раствора красителя; 10 — эталон перестройки; 11 — глухое зеркало

Параметры лазеров типа ЛЖИ

Параметр	ЛЖИ-403	ЛЖИ-404	ЛЖИ-406	ЛЖИ-407	ЛЖИ-408	ЛЖИ-409
Номинальная энергия излучения при $\lambda = 590$ нм, Дж	0,5	0,035	0,25	0,6	0,7	1,2
Длительность импульса, мкс	5,0	1,0	2,0	2,5	3,5	5,0
Частота повторения импульсов, Гц	0,5	50	10	5,0	2,0	0,3
Ширина линии, нм	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
База эталона Фабри-Перо 6 мкм	—	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
База эталона Фабри-Перо 100; 1000 мкм	—	—	—	—	—	—
Номинальная расходимость, мрад	15	10	10	10	15	15
Номинальная средняя мощность, Вт	10^4	$0,7 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^4$	10^4	10^4
Наработка лазера, имп	450—650	430—750	430—750	430—750	430—750	430—750
Диапазон перестройки, нм	—	—	—	—	—	—
Излучатель	ширина, мм высота, мм масса, кг	320×410 1400 92	320×410 1400 96	320×410 1400 104	320×410 1400 114	320×410 1400 122
Источник питания	ширина, мм высота, мм масса, кг	265×390 845 50	260×390 550 34	560×600 1200 110	560×600 1200 110	560×600 1200 110
Система прокачки	ширина, мм высота, мм масса, кг	180×250 410 10	240×350 570 18	240×350 570 18	240×350 570 18	240×350 570 18

качки 6 Вт. Длина когерентности более 60 м. К этим лазерам еще необходимы насос для подачи раствора красителя, система термостабилизации и фильтрации красителя, электронные блоки.

Для накачки импульсных лазеров на красителях можно применять твердотельные лазеры на рубине и неодимовом стекле (вторая и третья гармоники).

Интерес представляют лазеры с ламповой накачкой. Их оптические схемы подобны схеме твердотельного лазера. Активный элемент представляет собой трубчатую кювету из прозрачного в полосе накачки материала, через который прокачивается краситель. Накачка от импульсных ксеноновых ламп, которые вместе с кюветой помещены в диффузное или зеркальное устройство, подобное головке твердотельного лазера. Резонатор образован внешними зеркалами. Схема имеет элементы перестройки по длине волны генерации. Схема импульсного лазера типа ЛЖИ показана на рис. 28. Параметры импульсных лазеров приведены в табл. 5. Длина когерентности этих лазеров менее 2 мм, что делает их неприменимыми непосредственно для голографической съемки. Их можно использовать в системах воспроизведения изображений.

1.2.6. Лампы для воспроизведения голографического изображения

На качество изображения, восстановленного отражательной голограммой, влияют его расстояние от поверхности голограммы и угловые размеры светящегося тела восстанавливающего

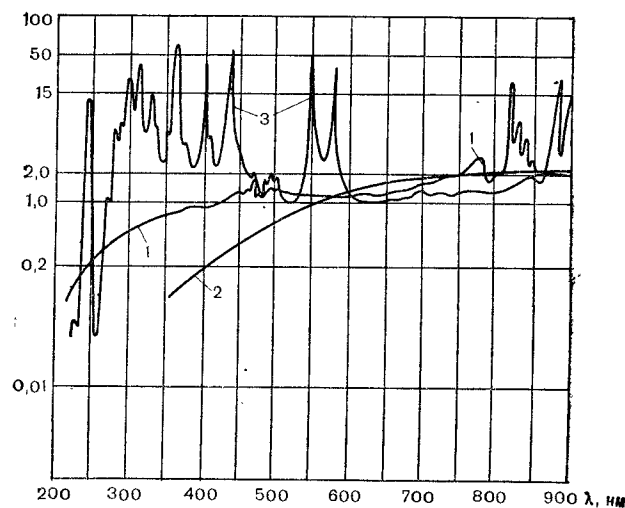


Рис. 29. Излучение галогенных и газоразрядных ламп: 1 — ксеноновая лампа мощностью 150 Вт; 2 — галогенная лампа мощностью 100 Вт; 3 — ртутная лампа мощностью 200 Вт; по вертикали — спектральная плотность излучения на расстоянии 50 см (мкВт/см²)

Таблица 6

Газоразрядные лампы непрерывного действия

Тип	Мощность, Вт	Напряжение на лампе, В	Род тока	Ток, А	Световой поток, лм	Время разгорания, мин	Длина дуги, мм	Наполнение	Основные длины волн излучения, мкм	Относительная интенсивность излучения, %
ДКсШ 120	120	12	Постоянный	10	1200	Мгновенное	0,3	Ксенон		
ДКсШ 150	150	12	То же	10	2300	То же	1,0	То же		
ДКсШ 200	200	20	»	10	4000	»	2,2	»		
ДКсШ 200-1	200	14	»	15	3500	»	1,0	»		
ДРШ 100-3	100	20	»	5	2000	5	0,3	Ртуть	0,406	10
ДРШ 250-2	250	25	»	10	10 000	5	0,8	То же	0,435	15
ДРШ 250-3	250	63	Переменный	4	12 500	5	3,9	»	0,546	12
ДРШ 500-М	500	76	То же	7,5	22 500	10	4,5	»	0,578	10
ДРШП 1000	1000	28,5	Постоянный				2-3	»		16
ДРШП 5000	5000	48	То же				4-5	»		10
ДРКШП 1000	1000	28,5	Постоянный				1,5-2	Ртуть-кадмий	0,406	16
ДРКШП 5000	5000	48	То же				4-5	То же	0,468	6
									0,480	
									0,509	
									0,546	
									0,578	
									0,644	
ДАЦ-50	50	16,5	Постоянный	3			1,0	Аргон-циркониевая		

го источника. Чем ближе расположено изображение и чем меньше его глубина, тем ниже требования к источнику света. Как уже отмечалось, идеальным источником является точечный. Для восстановления неглубоких изображений используются лампы накаливания типа КГМ, имеющие непрерывный спектр излучения и малое тело свечения. Для восстановления монохромных изображений глубоких объектов, соизмеримых с голографической пластинкой, высокое разрешение обеспечивают ртутные шаровые газоразрядные лампы, имеющие линейчатый спектр излучения и малый разрядный промежуток. Используется их спектральная полоса с максимумом на 0,578 мкм и шириной несколько нанометров, примерно соответствующей спектральной селективности отражательной голограммы. Из рис. 29 видно, что спектральная яркость галогенной лампы примерно равной мощности в этой же полосе в несколько десятков раз ниже.

Для восстановления цветных голографических изображений применимы ксеноновые и циркониевые лампы. Очень интересна ртутно-кадмиевая лампа, имеющая линейчатый спектр, содержащий линии красного, желтого, зеленого и синего излучений. Но такие лампы пока известны только в виде экспериментальных опытных образцов. В табл. 6 и 7 приведены параметры газоразрядных и галогенных ламп. Общий вид различного вида ламп показан на фото 6.

Таблица 7

Лампы накаливания кварцевые галогенные

Тип	Напряжение, В	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Габаритная яркость, кд/м²	Срок службы, ч
КГМ30-300-2	30	300		35 × 10 ⁶	50
КГМ25-150	24	150	5000		50
КГМ12-200	12	200	5000		150

Из большого числа регистрирующих сред для голографии, которые исследованы и разработаны в нашей стране и за рубежом, наибольшее практическое значение для изобразительной голографии и голографического кинематографа имеют в настоящее время и в ближайшей перспективе галогенидосеребряные среды и материалы на основе бихромированной желатины.

Природа регистрации голографической информации в своей физико-химической основе та же, что и обычной фотографической информации. Свет, проходя через светочувствительный слой, вызывает в нем локальные изменения — образует скрытое изображение тем более интенсивное, чем интенсивнее свет. При последующей обработке скрытое изображение проявляется. Различие между обычным фотографическим и голографическим процессами регистрации информации сводится к тому, что при обычном фотографировании в среде непосредственно регистрируется распределение интенсивности света в изображении, сфокусированном в светочувствительном слое, а при записи голографического поля регистрируется интерференционная картина, создаваемая световым полем рассеяния объекта.

Интерференционная картина, возникающая в светочувствительном слое при получении голограммы, характеризуется пространственной частотой, т. е. количеством интерференционных полос, проходящих на единицу длины. Значения пространственных частот зависят от длины волны света и от направления опорных и объектных пучков и для видимой области спектра при получении отражательных голограмм могут достигать (см. раздел 1.1.1) следующих величин:

Свет при получении отражательной голограммы	Длина волны света, мкм	Пространственная частота, лин/мм
Синий	0,458	6600
Зеленый	0,514	5900
Красный	0,647	4700

При получении пропускающих голограмм наибольшие значения пространственных частот имеют существенно меньшие значения, чем в случае отражательных голограмм. Например, для угла между направлениями опорного и объектного пучков, равного 90° , пространственные частоты равны:

Свет при получении пропускающих голограмм	Длина волны света, мкм	Пространственная частота, лин/мм
Синий	0,458	3100
Зеленый	0,514	2800
Красный	0,647	2200

Для обеспечения высокого качества голограмм светочувствительные пластинки или пленки должны иметь достаточно высокие значения функции передачи модуляции при указанных значениях пространственной частоты.

Важнейшим требованием, которому должны удовлетворять светочувствительные пластинки и пленки для изобразительной голографии, является высокая разрешающая способность, которая должна превышать значения пространственных частот, указанных выше.

Вторым важным требованием, предъявляемым к голографическим пленкам и пластинкам, является дифракционная эффективность. Качество голографических фотопластинок и фотопленок, которые рассчитаны на воспроизведение изображений, предназначенных для непосредственного наблюдения, можно оценивать следующим образом в зависимости от значения дифракционной эффективности:

Качество светочувствительных пластинок или пленок	Дифракционная эффективность, %
Отличное	60—80
Хорошее	40—50
Удовлетворительное	20—30

Третьим требованием, определяемым первыми двумя, является высокое значение максимального контраста голографического изображения, т. е. отношения сигнал/шум, измеряемого при низкой пространственной частоте.

Для передачи контраста голографического изображения в точном соответствии с контрастом оригинального объекта необходимо кроме обеспечения максимального контраста работать на близком к линейному рабочем участке градационной характеристики светочувствительного материала, т. е. иметь в рабочей области приблизительно линейную зависимость дифракционной эффективности от объектной составляющей экспозиции (см. раздел 1.3.5).

Четвертым важнейшим требованием, предъявляемым к светочувствительным пластинкам и пленкам для изобразительной голографии, является чувствительность, измеряемая величиной экспозиции, соответствующей получению определенных значений опти-

ческих параметров голограмм при заданных условиях экспонирования и обработки.

Голографической чувствительностью, согласно ГОСТ 24 865.1-81, называют величину экспозиции, обеспечивающую получение максимальной дифракционной эффективности голограммы. При этом принимают суммарную экспозицию, обусловленную как объектным, так и опорным пучками. Чувствительность пластинок для голографии иногда оценивают по другим критериям, например по величине экспозиции, соответствующей оптической плотности, равной 0,5 плюс плотность вуали ($D_0 + 0,5$). Иногда чувствительность определяют в единицах ГОСТ, как для обычных кинофотоматериалов. При изготовлении изобразительных голограмм по методу Ю. Н. Денисюка удобнее всего пользоваться величиной голографической чувствительности, оцениваемой по суммарной экспозиции (объектной и опорной), соответствующей максимальной дифракционной эффективности. По голографической чувствительности пластинок и пленки, используемые для получения изобразительных голограмм, могут быть разбиты на следующие группы:

Группа светочувствительных пластинок и пленок	Голографическая чувствительность, мДж/м ² (эрг/см ²)
Высокая чувствительность	500—2000
Средняя чувствительность	5000—50 000
Низкая чувствительность	100 000—2000 000

Указанные критерии чувствительности, однако, недостаточно полно характеризуют светочувствительные пластинки или пленки применительно к условиям их использования для голографического кинематографа. Это объясняется тем, что из условий достижения более высокого контраста голографического изображения в ряде случаев целесообразно выбирать значения экспозиции существенно меньшие, чем те, при которых достигается максимальная дифракционная эффективность. Поэтому более удобно для целей голографического кинематографа пользоваться значениями чувствительности, определяемой по объектно слагающей экспозиции, т. е. по экспозиции, обусловленной только объектным пучком. Такая чувствительность может быть определена по характеристическим дифракционным кривым голографических фотоматериалов, представляющим кривые зависимости дифракционной эффективности от объектной слагающей экспозиции при неизменных значениях опорной слагающей экспозиции.

Характеристические дифракционные кривые голографических фотоматериалов могут называться также градационными характеристиками, так как они определяют передачу градиций яркости воспроизводимого изображения в зависимости от градиций яркости объекта-оригинала. Иногда характеристические дифракционные

кривые называют также сигнальными характеристиками фотоматериалов, если рассматривать объектную слагающую экспозиции как сигнал, регистрируемый фотоматериалом.

Важным требованием к рабочему участку характеристической дифракционной кривой голографического кинофотоматериала является его линейность, что необходимо для правильной передачи контраста.

Следующим важным требованием, предъявляемым к светочувствительным пластинкам и пленкам для изобразительной голографии и голографического кинематографа, является стабильность толщины слоя готовой голограммы на весь период ее хранения и воспроизведения голографического изображения. Усадка же слоя регистрирующей среды (изменение толщины), возникающая в результате химико-фотографической обработки и сушки и существенно влияющая на качество воспроизводимого изображения, должна в процессе обработки контролироваться с целью обеспечения требуемых спектральных характеристик конечного голографического изображения.

Кроме указанных важны также следующие требования:

1) стабильность свойств светочувствительных пластинок и пленок, определяемая сроками их хранения без существенного изменения основных параметров (дифракционная эффективность, чувствительность), например, не более чем на 30% в течение шести месяцев при заданных термогигрометрических условиях их хранения (комнатная температура и влажность);

2) стабильность свойств голограммы, определяемая сроками ее хранения без существенных изменений основных параметров (дифракционная эффективность, спектральная селективность, помехи) в заданных термогигрометрических условиях, например неограниченный срок службы при использовании в комнатных условиях.

Указанные значения основных параметров светочувствительных пластинок и пленок для изобразительной голографии зависят от процессов их обработки и от методов измерения, рассмотренных в последующих разделах.

Стабильность свойств готовых голограмм в настоящее время в основном определяется средствами их защиты от воздействия окружающей среды.

1.3.1. Высокора разрешающие галогенидосеребряные фотоматериалы

Для изобразительной голографии наибольший практический интерес представляют галогенидосеребряные фотоматериалы, обладающие высокой разрешающей способностью, большой дифракционной эффективностью, а также сравнительно высокой светочувствительностью. Они обеспечивают получение изобразительных голограмм высокого качества.

Разрешающая способность галогенидосеребряных фотоматериалов в значительной мере определяется размерами зерен галлоидного

серебра в фотоэмульсии. Поэтому для достижения высоких значений разрешающей способности фотоматериалов, обеспечивающих высокое качество изобразительных голограмм, применяют фотоэмульсии с очень малыми размерами зерен, значительно меньшими длины волны света (табл. 8). Фотоматериалы с размерами зерен

Таблица 8

Параметры слоев серийных галогенидосеребряных фотоматериалов для голографии

Сорт фото-материала	Средний размер эмульсионных зерен, мкм	Концентрация серебра в фотослое, г/см ³	Толщина эмульсионного слоя, мкм	Изготовитель
ПЭ-2	0,006—0,012	0,26	7—8	«Союзхимфото»
ЛОИ-2	0,026	—	—	—
8E 75 HD	0,035	—	7	«Agfa-Gevaert» (Бельгия)
8E 56 HD	0,045—0,05	0,45—0,46	9	То же
8E 75				
8E 56				
10E 75				
10E 56	0,09	0,53—0,59	8	То же
ВРМ	0,03	—	10—14	«Союзхимфото»
ВРЛ-2	0,05	—	8—12	То же
ВРЛ-3	0,05	—	8—12	То же
ФП-ГВ2	0,08—0,09	—	—	То же
ФП-ГВД	0,05—0,06	—	—	То же
ФП-ГТ	0,01—0,012	—	—	То же

0,01 мкм и менее настолько слабо рассеивают свет, что, в отличие от обычных «мутных» фотоматериалов, через них видны рассматриваемые предметы, как через прозрачные пластинки. Поэтому такие фотоматериалы называют прозрачными. Наиболее высокое качество изобразительных голограмм получается на прозрачных фотоматериалах, так как в этом случае достигаются наиболее высокие значения дифракционной эффективности и контраста.

Фотоматериалы 10E75, 10E56, ФП-ГВ2, ФП-ГВД, имеющие сравнительно большие размеры эмульсионных зерен (0,06—0,09 мкм), мало пригодны для получения изобразительных голограмм с хорошим качеством изображения. Однако иногда применение этих фотоматериалов может оказаться целесообразным, если не предъявлять высокие требования к качеству изображения. В этом случае имеют место низкие значения пространственных частот и необходима повышенная чувствительность.

Дифракционная эффективность голографических фотоматериалов зависит от содержания серебра в светочувствительном слое. Именно этим определяется концентрация серебра в светочувствительном слое, обеспечивающая получение заданных характеристик фотоматериала (см. табл. 8).

Основные характеристики галогенидосеребряных фотоматериалов зависят также от толщины светочувствительного слоя. К числу параметров, зависящих от толщины слоя, относят дифракционную эффективность, контраст, спектральную и угловую селективность. Значения толщины слоя изготавливаемых серийно голографических фотоматериалов близки к оптимальным. В зависимости от назначения и строения фотоматериала эти оптимальные значения толщины слоя оказываются различными.

Дифракционная эффективность, контраст, чувствительность фотоматериалов в очень сильной мере зависят от процесса их химико-фотографической обработки. Это одна из причин большого различия значений указанных величин для фотоматериалов, изготавливаемых разными фирмами. Такое различие обусловлено также применением разных методов для измерения этих величин.

Для изобразительной голографии и голографического кинематографа представляют интерес фотопластинки и фотопленки типов 8E75HD, 8E56HD, изготавливаемые фирмой «Agfa-Gevaert» (Бельгия). Для этих целей также используют фотоматериалы, ранее выпускаемые этой же фирмой, 8E75 и 8E56, обладающие несколько большими зернами и имеющие поэтому худшую разрешающую способность, т. е. уступающие более совершенным материалам с индексом HD (High Definition), означающим более высокое разрешение. Еще меньшую разрешающую способность имеют голографические фотопластинки и фотопленки 10E75 и 10E56 этой же фирмы, применение которых ограничивается пропускающими голограммами.

На рис. 30 показаны кривые зависимости оптической плотности от экспозиции указанных фотоматериалов, которые характеризуют чувствительность. На рис. 31 приведены кривые спектральной чувствительности (относительные значения), из которых виден диапазон длин волн света, в котором можно использовать данные фотоматериалы.

Если принять разрешающую способность фотоматериала равной пространственной частоте, при которой дифракционная эффективность снижается в 10 раз, то, например, для фотоматериала 10E75, согласно рис. 32, разрешающая способность достигает около 3000 лин/мм, что недостаточно для получения отражательных голограмм.

На рис. 33 показаны кривые зависимости дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум для фотоматериалов 10E75 в случае амплитудных и фазовых голограмм (обработка с отбеливанием). На рис. 34 приведены значения дифракционной эффективности в зависимости от экспозиции для фотопленок 8E75 в случае фазовых голограмм (обработка с отбеливанием). Вследствие нарушения закона взаимозаместимости кривые дифракционной эффективности в функции экспозиции существенно сдвинуты в сторону больших значений экспозиции при переходе от большей продолжительности экспонирования (лазеры непрерывного действия) к меньшей (лазеры импульсного действия).

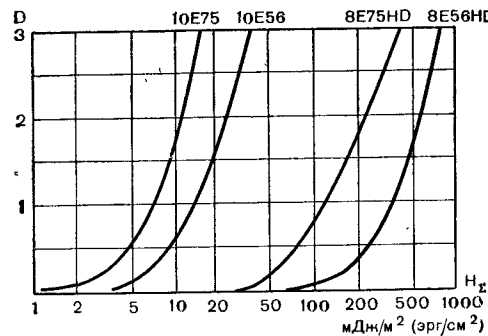


Рис. 30. Оптическая плотность в зависимости от экспозиции для фотопластинок «Agfa-Gevaert» при экспонировании лазерами непрерывного действия

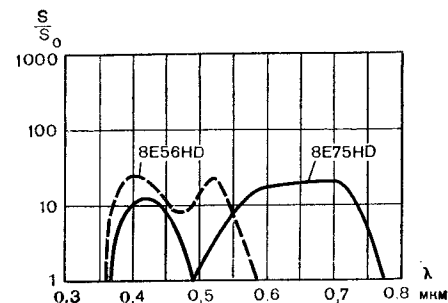


Рис. 31. Спектральная чувствительность фотоматериалов «Agfa-Gevaert»

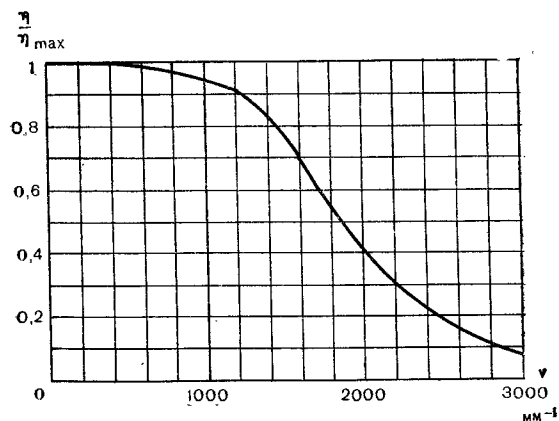


Рис. 32. Снижение относительного значения дифракционной эффективности с увеличением пространственной частоты. Амплитудная голограмма. Фотопластины 10E75

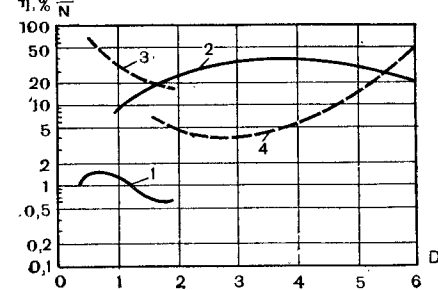


Рис. 33. Дифракционная эффективность и отношение сигнал/шум фотопластинок 10E75: 1, 2 — дифракционная эффективность амплитудной и фазовой голограмм; 3, 4 — отношение сигнал/шум амплитудной и фазовой голограмм

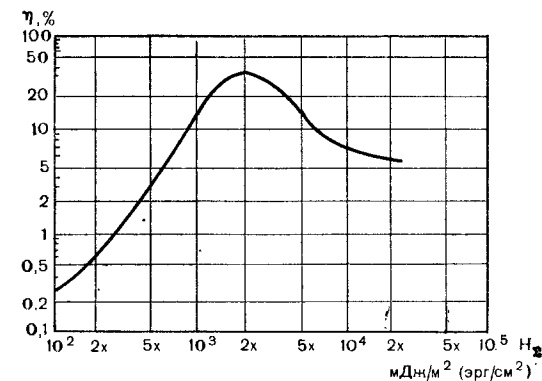


Рис. 34. Дифракционная эффективность в зависимости от экспозиции для фотопленки 8E75 при экспонировании лазером импульсного действия при равных интенсивностях опорного и объектного пучков

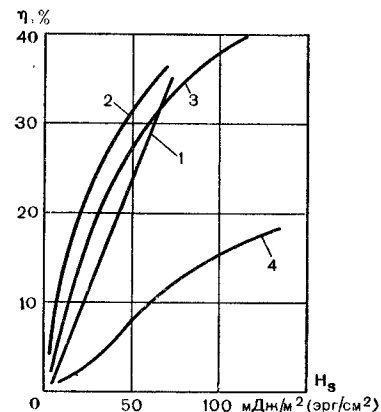


Рис. 35. Характеристические дифракционные кривые фотопластинок 8E75HD для фазовых голограмм при экспонировании лазером импульсного действия. Каждая кривая соответствует неизменному значению интенсивности опорного пучка (H_R): 1 — 35 эрг/см²; 2 — 200 эрг/см²; 3 — 300 эрг/см²; 4 — 700 эрг/см²

На рис. 35 изображены характеристические дифракционные кривые фотопластинок 8E75HD (в случае фазовых голограмм), т. е. кривые зависимости дифракционной эффективности от объектной слагающей экспозиции при неизменных значениях опорной слагающей экспозиции. Как видно из этих кривых, наиболее правильная передача контраста изображения достигается в начальном участке

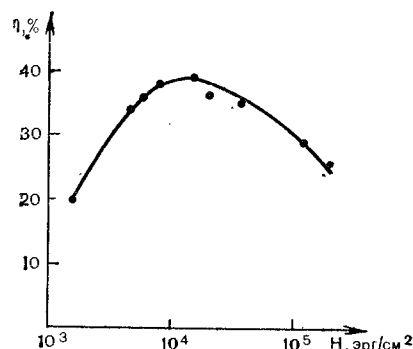


Рис. 36. Дифракционная эффективность серийных фотопластинок ПЭ-2

На рис. 36 показана измеренная зависимость дифракционной эффективности от экспозиции серийных пластинок ПЭ-2 для отражательных голограмм. Интенсивности опорного и объектного пучков света при получении голограмм были приблизительно одинаковы. Высокие значения дифракционной эффективности указывают на преобладание фазового характера в формировании восстановленной волны света. Приведенные значения дифракционной эффективности получены для гелий-неонового лазера непрерывного действия.

Фотопластины и фотопленки типа ПЭ-2 предназначены для работы с использованием лазеров непрерывного действия. При экспонировании в свете импульсных лазеров (в наносекундном диапазоне) чувствительность фотоматериалов ПЭ-2 вследствие отклонения от закона взаимозаменяемости столь сильно снижается, что они пока непригодны для работы при подобных режимах.

Фотоматериалы ПЭ-2 обладают уникальными свойствами. Они обеспечивают получение высоких значений дифракционной эффективности как пропускающих, так и отражательных голограмм и при этом позволяют достигнуть правильной передачи контраста голографических изображений вследствие низкого уровня шума (малого светорассеяния) и большого линейного участка градационных кривых. По этой причине фотоматериалы ПЭ-2 являются наилучшими материалами для изготовления голограмм статических объектов.

Близкими характеристиками обладают серийные фотоматериалы

ЛОИ-2, хотя они имеют несколько большие размеры эмульсионных зерен (см. табл. 8).

Фотопластины ЛОИ-2 выпускают различных сортов, которые предназначены для работы с лазерами непрерывного действия (ЛОИ-2-633) и для работы с импульсными рубиновыми лазерами (ЛОИ-2-694).

На рис. 37 показаны кривые зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для фотопластинок ЛОИ-2-694 при ра-

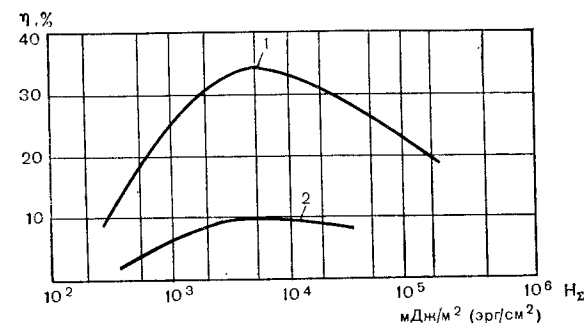


Рис. 37. Дифракционная эффективность фотопластинок ЛОИ-2 в зависимости от экспозиции для фазовых голограмм при экспонировании рубиновыми лазерами импульсного действия: 1 — режим свободной генерации с общей длительностью импульсов 300—500 мкс; 2 — режим модулированной добротности с длительностью импульса 30—40 нс

боте импульсного рубинового лазера как в режиме свободной генерации, так и модулированной добротности. Из этого рисунка видно, что снижение длительности импульса лазерного излучения приводит к существенному снижению дифракционной эффективности и уменьшению чувствительности (если она определяется значением экспозиции при одинаковой заданной величине дифракционной эффективности). В табл. 9 и 10 приведены основные данные фотоматериалов для изобразительной голографии, выпускаемых промышленностью, а в табл. 11 — данные экспериментальных образцов.

Серийные голографические фотопластины изготавливают различных размеров: 9×12 , 13×18 , 18×24 , 30×40 см и больших.

1.3.2. Обработка галогенидосеребряных фотоматериалов

Фотохимическая обработка галогенидосеребряных голографических фотоматериалов позволяет получить поглощающую амплитудную голограмму в результате превращения галогидного серебра в металлическое, либо фазовую, если серебро в результате операции отбеливания переводится в прозрачное соединение. Первый проявитель особомелкозернистых материалов для липпмановской фотографии, подобных современным голографичес-

Высокоразрешающие галогенидосеребряные фотоматериалы,

изготавливаемые «СОЮЗХИМФОТО» для голографии

Тип фотоматериала	Основа	Длина волны, нм	Разрешающая способность, лин/мм	Чувствительность		
				Экспозиция при плотности $D_0 + 0,5$ эрг/см ²	Экспозиция при максимальной дифракционной эффективности, эрг/см ²	В ед. ГОСТ 2817-50
«Микрат» ЛОИ-2-633	Стекло	600—650	5000			0,003
«Микрат» ЛОИ-2-694	Стекло	680—720	5000			0,003
ПЭ-2	Стекло	633—694	10000		50000	
ПЭ-С	Пленка триацетатная	450—650		500		
ПЭ-К	Пленка триацетатная	450—650		5000		
ПЭ-4	Стекло	440—633		3000		
ВРМ	Стекло	633		700		
ВРЛ-2	Стекло	633	3000	1000		
ВРЛ-3	Стекло	633		1000		
ВРЛ-4	Стекло	633		1000		
ВРЛ-И	Стекло	860—920		5000		
ФП-ГВ2	Пленка триацетатная	488—700	3000			0,1
ФП-ГВД	Пленка лавсановая, триацетатная	633—694	3000	300		0,02
ФП-ГТ	Пленка триацетатная	633				0,003

ким материалам типа ПЭ, ЛОИ-2, был создан еще Люмьером. Проявитель содержал пирогаллол (проявляющее вещество), щелочь в виде нашатырного спирта, противуалирующее вещество (КВг). В процессе проявления происходило растворение галогенида, рост мелкодисперсного металлического серебра, показатель преломления которого меньше единицы. В желатиновой среде с показателем преломления $n = 1,5$ образуется высокий фазовый контраст между частицами серебра и желатины, поэтому голограммы имеют большую фазовую компоненту и дифракционную эффективность более 20%. Пирогаллол образует продукты окисления, и пластинки имеют малую усадку, что обеспечивает сохранение рабочей длины волны

Дифракционная эффективность					Обработка		
Пропускающая голограмма			Отражательная голограмма		Проявитель	Отбеливатель	Гиперсенситбилизация
%	Тип голограммы	При пространственной частоте, лин/мм	%	Тип голограммы			
					Д-19		Триэтиламин
40	Фазовая	1000	20	Фазовая	Д-76	Калий двухромовокислый	
50	Фазовая	1000			ФМГ-1	Медь сернокислая, калий	
					ФМГ	двухромовокислый	
50	Фазовая	1000			ФМГ	То же	
50	Фазовая	1000			ФМГ	То же	
5	Амплитудная	1500			Д-19		
6	Амплитудная	1000			УП-2, Д-19	Хлорная медь	
65	Фазовая	1000					
6	Амплитудная	1000			ФМГ	Хлорное железо	
65	Фазовая	1000					
7	Амплитудная	1000					
70	Фазовая	1000					
					Д-19	Калий двухромовокислый, сернокислая медь	
30	Фазовая ($\lambda = 633$ нм)	1500			УП-2	Хлорное железо	
					Д-19	Хлорная медь	
20	Фазовая ($\lambda = 633$ нм)	320			УП-2		

при переходе от записи к воспроизведению изображения. В этом проявителе получается высокое отношение сигнал/шум.

Дальнейшим развитием первого проявителя Люмьера стали голографические типа ГП, ФМГ, имеющие подобные свойства и содержащие роданид аммония. Большинство монохромных голограмм обрабатывается в проявителях этого типа, и на материалах ЛОИ и ПЭ получены дифракционные эффективности до 50%. Эти голограммы восстанавливаются в красно-оранжевом диапазоне длин волн, имеют высокое отношение сигнал/шум и высокую стабильность, поскольку в слое не остается серебряных солей, а только металлическое серебро. Во Франции, в Музее открытий, липпмановские фотографии сохраняются уже около 100 лет.

**Высокоразрешающие галогенидосеребряные фотоматериалы,
изготавливаемые фирмами «Agfa-Gevaert» и «Kodak»
для голографии**

Тип фото-материала	Фирма	Основы	Длина волны, нм	Разрешающая способность, лин/мм	Чувствительность по критерию $D_0 + 0,3, \text{эрг/см}^2$
8E75HD	«Agfa-Gevaert»	Стекло, пленка	633—694	3000	150
8E56HD	«Agfa-Gevaert»	Стекло, пленка	514—530	3000	350
10E75	«Agfa-Gevaert»	Стекло, пленка	633—694	2500	6
				2500	15
10E56	«Agfa-Gevaert»	Стекло, пленка		2500	15
649F	«Kodak»	Стекло, пленка	440—633	3000	800
1A	«Kodak»	Стекло	440—514	3000	950
SO-343	«Kodak»	Пленка	440—514	3000	950
120	«Kodak»	Стекло	440—694	3000	420
SO-173	«Kodak»	Пленка	440—694	3000	420
125	«Kodak»	Стекло	440—633	2500	50
SO-253	«Kodak»	Пленка	440—633	2500	24
131	«Kodak»	Стекло	440—633	2500	24

Такие проявители мало пригодны для цветных процессов, где требуется восстановление в сине-зеленом участке спектра. На про-свет обработанные в них фотоматериалы имеют красно-оранжевую окраску, обусловленную размером получаемых зерен серебра. При восстановлении сине-зеленая часть спектра поглощается. Попытки изменить окраску оказались малоэффективными — с амидоловым проявителем получаются желтые осадки. Дифракционная эффективность для сине-зеленой области получается очень малой — 4%. Дальнейшим развитием фотопроцессов стали процессы с отбеливанием. Первые отбеливатели были на основе сулемы. Теоретически отбеленная голограмма может иметь дифракционную эффективность до 100%. В специальных задачах (интерферометрия, копирование) можно работать без отбеливания, когда требуется повысить отношение сигнал/шум хотя бы и за счет низкой дифракционной эффективности. Тогда съемка ведется с обработкой без отбеливания, а копирование на бесшумную прозрачную пленку с низкой чувствительностью. Известны опыты Липпмана по использованию биохромированной желатины для интерференционной цветной фотографии.

В первых работах Ю. Н. Денисюк использовал проявитель типа люмьеровского и фотоматериалы по рецепту Валента. Поэтому вначале исторически в голографии стали использовать эти процессы,

Экспериментальные высокоразрешающие галогенидосеребряные фотоматериалы, разработанные для голографии

Тип фотоматериала	Основа	Длина волны света, нм	Разрежающая способность, лнн/мм	Чувствительность		Дифракционная эффективность				Обработка			
				Экспозиция при $D_0 \pm 0,5$ эрг/см ²	Экспозиция при максимальной эффективности, эрг/см ²	Пропускающая голограмма			Отражательная голограмма		Проявитель	Отбеливатель	Гиперсенситбилизация
						%	Тип голограммы	При пространственной частоте, лнн/мм	%	Тип голограммы			
ЛОИ-1	Стекло	633	6 000	1 000	2	Амплитудная	1500	18	Фазовая	Д-19		Триэтаноламин То же То же	
ЛОИ-2	Стекло	633	7 000	2 000	4	Амплитудная	1500	50	Фазовая	Д-19			
ПЭ-1	Стекло	633	10 000	1 600	40	Фазовая		40	Фазовая	Бессульфитный аммиачный	Д-19		
												30 000	
НИКФИ	Пленка		10 000	500					40	Фазовая	ГП-2	Ферроцианидный	Триэтаноламин
	Стекло	633	10 000	2 500	160 000	30 000		85	Фазовая	Бессульфитный аммиачный	Д-19		
									40	Фазовая	ГП-3		
ИАЭ-Двухслойные	Стекло	633	10 000	5 000					30	Фазовая	МГ-6	Ферроцианидный	
	Стекло	647, 514	10 000	10 000					60—80	Фазовая	ГП-3		
	Пленка	То же	10 000	10 000		70	Фазовая	4 000 (λ = 633, 514 нм)		Фазовая	МГ-6		

Дальнейшее развитие фотопроцессов привело к созданию ряда рецептов проявителей (ГП-2, ГП-3, ФМГ и других), предназначенных для процессов без отбеливания, и более простых (Д-19, МГ-6) для процессов с отбеливанием.

Предприятия, изготавливающие галогенидосеребряные фотоматериалы, используемые в изобразительной голографии, рекомендуют технологические регламенты их обработки, включая рецептуру обрабатывающих растворов. В них предусмотрены достижение наибольшей дифракционной эффективности и возможно меньший уровень шума.

Для получения пропускающих фазовых голограмм высокого качества фирма «Agfa-Gevaert» предлагает режимы обработки фотоматериалов, рассчитанные на экспозицию 240 мДж/м² (эрг/см²) для типа 8E 75HD и 500 мДж/м² для типа 8E 56HD.

Фотопластинку погружают в проявитель GP61 и выдерживают в нем в течение 2 мин при температуре 20°C. Состав проявителя указан в табл. 12.

После проявления пластинку промывают в проточной воде в течение 2 мин при температуре 20°C±2° и затем фиксируют в растворе быстрого действия в течение 2 мин при температуре 20°C±2°. После этого пластинку промывают в проточной воде в течение 2 мин при температуре 20°C±2° и отбеливают в ванне следующего состава (GP 431):

Нитрат трехвалентного железа (кристаллический)	150 г
Калий бромистый	30 г
Феносафранин, растворенный в 200 мл этанола	300 мг
Вода	до 1 л

Перед использованием раствор разбавляют в пропорции: 1 часть GP-431+4 части воды при температуре 20°C±2°. Приготовленный для употребления раствор можно хранить в закрытом сосуде около 1 недели.

После отбеливания пластинку промывают в проточной воде в течение 5 мин, затем в дистиллированной воде с 1 частью агепона на 200 частей воды в течение 2 мин при 20°C. После обработки вода должна равномерно смачивать поверхность пластинки. Если на поверхности эмульсии образуются капли воды, обработка в растворе агепона должна быть продолжена.

Пластинку сушат в вертикальном положении в обеспыленном помещении до тех пор, пока эмульсия не станет совершенно сухой. Не допускается форсирование сушки и поворачивание пластинки во время сушки.

Для получения отражательных фазовых голограмм фирма «Agfa-Gevaert» рекомендует режим обработки иной, чем в случае пропускающих голограмм. Фотопластинку погружают в проявитель GP 62 и выдерживают в нем в течение 2 мин при температуре 20°C. Состав раствора указан в табл. 12. Готовый для использования ра-

Проявители для обработки голографических галогенидосеребряных фотоматериалов в процессах с отбеливанием

Компонент, г	Д-19	Неофин	Гидрохиноновый НИКФИ	МГ-6	«Agfa-Gevaert» GP-61	«Agfa-Gevaert» GP-62
Фенидон	—	—	Раствор А	Раствор А	—	Раствор А
Метол	2,2	8	—	0,3	0,8	—
Гидрохинон	8,8	—	—	4	6,0	15
Пирогаллол	—	—	3	5	7	—
Сульфит натрия безводный	100	90	—	—	—	7
Калий бромистый	5	0,2	—	30	30	20
Метабисульфит калия	—	—	—	1,5	2,0	4
Тетранатриевая соль этилендиамина тетрауксусной кислоты	—	—	—	12	—	—
Натрий фосфорнокислый	—	80	—	—	1	2
Вода дистиллированная	—	—	150 мл	до 1 л	—	до 1 л
1-фенил-5-меркапто-тетразол	—	—	Раствор Б	Раствор Б	—	Раствор Б
			5—20 мг			
Сода безводная	47	—	—	Раствор Б	60	Раствор Б
Едкое кали	—	—	4	—	—	60
Вода дистиллированная	до 1 л	до 1 л	250 мл	до 1 л	до 1 л	до 1 л
Смешивание растворов			1 ч А+ +1 ч Б	2 ч А+ +5 ч Б		1 ч А+ +1 ч Б+ +2 ч воды
Продолжительность проявления, мин	5—20	5	10	12—16	2	2
Фотоматериал	ПЭ, ЛОИ, ВРЛ	ПЭ, ЛОИ, «Agfa-Gevaert»	ПЭ, «Agfa-Gevaert»	ПЭ, «Agfa-Gevaert»	«Agfa-Gevaert»	«Agfa-Gevaert»
	Пленки ФП-ГТ ФП-ГВ ФП-ГВД					

створ можно хранить 1—2 часа. При работе с этим проявителем необходимо надевать резиновые перчатки.

После проявления пластинку промывают в проточной воде в течение 2 мин при температуре 20°C±2°. Затем отбеливают в ванне следующего состава (GP 432) при температуре 20°C±2°:

Калий бромистый 50 г
Кислота борная 1,5 г
Вода до 1 л

п-бензохинон в количестве 2 г/л добавляется в раствор непосредственно перед его использованием.

В хорошо закупоренной посуде отбеливающий раствор можно хранить до 1 недели.

После отбеливания пластинку промывают в проточной воде в течение 5 мин при температуре $20 \pm 2^\circ$, затем в дистиллированной воде с 1 частью аспена на 200 частей воды в течение 2 мин при температуре 20°C . После этого пластинку сушат в вертикальном положении в обеспыленном помещении до полного высыхания.

Обработку фотопластинок 8E75HD и 10E75 необходимо вести при зеленом неактиничном свете или в полной темноте; фотопластинок 8E56HD и 10E56 — при темно-красном свете.

При изготовлении изобразительных отражательных голограмм на галогенидосеребряных фотоматериалах типа ЛОИ-2 промышленного изготовления можно применять предварительную обработку фотоматериала — гиперсенсibilизацию путем купания в 2%-ном растворе триэтанолamina в течение 10 мин при температуре $18-20^\circ\text{C}$. Раствор триэтанолamina для гиперсенсibilизации рекомендуется готовить, растворяя триэтанолamin в подогретой воде до $40-45^\circ$ (для лучшего растворения).

После купания пластинки в триэтанолamine ее споласкивают дистиллированной водой в течение 10 с и сушат в естественных условиях в темноте с выдержкой одни сутки. Такой процесс гиперсенсibilизации позволяет значительно повысить чувствительность фотоматериала (до 10 раз). Однако хранение фотопластинок после их предварительной обработки триэтанолaminом в течение более суток недопустимо, так как гиперсенсibilизированные фотоэмульсии обладают плохой сохраняемостью. Предварительная обработка в триэтанолamine может быть одновременно использована для создания требуемой усадки готовой голограммы, о чем сказано ниже.

Фотопластинки ПЭ-2 и ЛОИ-2 обрабатывают в проявителе ГП-2 в течение 15 мин при температуре $20 \pm 1^\circ$. Ванну с проявителем и пластинкой покачивают 1—2 раза в минуту. Проявление ведут в полной темноте или в свете зеленого фонаря со светофильтром № 170. Состав проявителя ГП-2 указан в табл. 13.

Обработку каждой пластинки производят в свежем проявляющем растворе, в связи с чем расход рабочего раствора проявителя составляет около 1,5 л на каждую фотопластинку размером 300×400 мм. После проявления пластинки промывают в проточной воде в течение 2 мин, затем фиксируют 1—3 мин при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$ с перемешиванием. Фиксирующий раствор имеет следующий состав:

Тиосульфат натрия (кристаллический) 160 г
Метабисульфит калия 40 г
Вода дистиллированная 1 л

Проявители для обработки голографических галогенидосеребряных фотоматериалов в процессах без отбеливания

Компонент, г	ГП-2	ГП-3	ГП-8	ГП-11	ФМГ-1	ПРГ-1
Метилфенидон	0,2	—	0,2	0,2	—	—
Фенидон	—	0,2	—	—	0,3	Раствор А
Гидрохинон	5,0	5,0	5,0	5	5	30
Метол	—	—	—	—	2	—
Сульфит натрия безводный	100	100	100	70	40	38
Калий бромистый	—	—	—	—	2	22
Едкое кали	5,0	25,0	10,6	7,8	—	—
Вода дистиллированная	—	—	—	—	—	до 1 л
Роданид аммония	12	45	24	13,5	—	—
Бура кристаллическая	—	—	—	—	15	—
Поташ	—	—	—	—	20	Раствор Б
1-фенил-5-меркапто-тетразол	—	—	—	—	0,2	240
Калий роданистый	—	—	1	—	3	—
Вода дистиллированная	до 1 л	до 1 л	до 1 л	до 1 л	до 1 л	до 1 л
Разбавление водой, мл/мл	20/400	15/400	60/400	15/400	15/400	1 ч А + + 1 ч Б + 13 ч воды
Продолжительность проявления, мин	10—20	5—15	4—10	16—20	10—20	25—30
Фотоматериал	ПЭ-2 ЛОИ-2	ИАЭ	ЛОИ-1 ЛОИ-2	ЛОИ-1 ЛОИ-2	ПЭ-2	ЛОИ-2

Растворение производят в последовательности, указанной в рецепте, при введении нового вещества после полного растворения предыдущего.

При изготовлении обрабатываемых растворов необходимо их тщательно отфильтровать и дать им отстояться в течение суток. При обработке пластинки должны погружаться в раствор не менее чем на 10 мм между верхней поверхностью пластинки и поверхностью раствора.

После фиксирования производят промывку пластинок в течение 10 мин в проточной воде при точном регламентировании. Сушка после промывки требует более тщательного ведения процесса, чем в случае обычных фотопластинок, так как даже незначительные неоднородности во время сушки в виде подтеков и капель воды на эмульсионном слое приводят к неравномерности усадки готовой голограммы, что проявляется в виде разводов и пятен на гологра-

фическом изображении. Поэтому перед сушкой эмульсионный слой обезвоживают путем последовательного погружения фотопластинок последовательно в две ванны с водным раствором этилового спирта с концентрацией 50% и 80% на 2 мин в каждую. Концентрация второй ванны подбирается экспериментально для каждой партии пластинок. После этого пластинки сушат в вертикальном положении в вытяжном шкафу при комнатной температуре до полного высыхания слоя. С целью стабилизации усадки и дополнительного термического задубливания полезен прогрев голограмм в сушильном шкафу в течение 1 часа при температуре 75—80°C.

При необходимости восстановления первоначальной толщины эмульсионного слоя, имевшей место при экспонировании, спиртовая сушка не производится, а после промывки пластинки погружают в пластифицирующий раствор триэтаноламина или глицерина с добавлением в раствор смачивающих веществ ОП-7 или ОП-10 из расчета 1 г вещества на 1 л раствора. Концентрацию пластифицирующих растворов и режим обработки устанавливают для каждой партии голограмм по предварительным пробам.

Голограммы сушат в вертикальном положении в помещении или камере повышенной влажности (98—99%) до высыхания. Затем влажность снижается до нормальной или голограммы переносят в обеспыленное помещение с нормальными условиями, где выдерживают до полного высыхания слоя.

Для получения отражательных голограмм кроме указанных можно применять проявители различного состава в зависимости от типа фотоматериала и требуемых характеристик голограммы. При этом можно использовать процессы обработки как без отбеливания (см. табл. 13), так и с отбеливанием (см. табл. 12).

Очень важная операция при обработке голографических фотоматериалов — регулирование толщины слоя готовой голограммы, которое можно осуществлять в двух направлениях: увеличение толщины слоя со сдвигом спектральной полосы воспроизведенного изображения в более длинноволновую область относительно линии записи и уменьшение толщины со сдвигом спектральной полосы в более коротковолновую область.

Для утолщения слоя имеются следующие способы.

1. Пропитка обработанной голограммы перед окончательной сушкой веществами, которые, задерживаясь в высушенном слое желатины, утолщают его. Пропитка осуществляется купанием в растворах триэтаноламина, сахаров, глицерина, гликолей, сорбита, разного рода смачивателей. Основным недостатком данного способа заключается в том, что не удается создать однородную пропитку из-за точечных и плавных дефектов в слое, которые при сушке удерживают неодинаковое количество наполняющего вещества. В результате получается разноцветность. Кроме того, при пропитке ухудшается сохраняемость голограмм, так как наполнители улетучиваются, разлагаются, окисляются, подвергаются влиянию атмосферной влаги. Особенно это существенно для голограмм большого размера.

2. Предварительный прогрев пластинки перед экспонированием для удаления лишней влаги и обезвоживания желатины (изменения ее структуры). После экспонирования и фотохимической обработки слой утолщается, так как он уже не досушивается до толщины, которую имел после прогрева. Этот способ хорошо стабилизирует толщину слоя при съемке и способствует воспроизводимости результатов. При правильно выбранном режиме прогрева происходит также гиперсенсibilизация, что дает лучшую однородность, чем гиперсенсibilизация растворами.

3. Обработка в проявителях, которые образуют продукты окисления, подобные красителям, оседающие в фотослое на зернах серебра или вблизи них и дающие в результате утолщение слоя. Для этой цели пригодны проявители с пирогаллолом, амидолом. Эффективно также вводить в проявитель типа ГП формалин, который способствует образованию окисленной формы проявляющего вещества. Такая обработка в сочетании с прогревом позволяет сдвинуть спектральный диапазон, например с 0,514 (линия излучения аргона) до 0,578 мкм (линия восстановления ртутной лампы). Третий способ может применяться в сочетании с первыми двумя.

Уменьшение толщины слоя (усадку) производят следующими способами.

1. Экспонирование на пластинках в среде с повышенной влажностью: либо во влажном помещении, либо пластинка должна устанавливаться в специальный съемочное приспособление, представляющее собой герметичный эксикатор, в котором вместе с пластинкой находятся стандартные растворы, обеспечивающие заданную влажность внутри эксикатора. Следует иметь в виду, что проявители типа ГП, содержащие роданиды, дают усадку сами по себе, съемку на влажную эмульсию производят, если усадка недостаточна.

2. Предварительная пропитка фотослоя наполнителем, например триэтаноламином, который затем выводится. Недостаток этого способа — неоднородности усадки, хотя одновременно происходит гиперсенсibilизация фотоматериала.

3. Наиболее удачный способ — введение наполнителя, например глицерина, смачивателя или их смеси, в эмульсию перед поливом. В процессе мокрой обработки наполнитель выводится. Подбор концентрации наполнителя может сдвинуть спектральную область от красной при съемке до сине-зеленой при воспроизведении изображения.

4. Термообработка готовой голограммы в термостате при 100—120°.

5. Фиксирование в фиксаже с повышенной кислотностью. Перед сушкой — промывка готовой голограммы после фиксирования водой повышенной температуры (температура и время обработки и промывки зависят от степени задубленности и адгезии эмульсионного слоя).

При получении цветных голограмм не требуется изменять толщину фотослоя и следует найти правильное соотношение усадок при обработке и сушке голограммы. При изготовлении цветных фо-

томатериалов надо правильно подобрать желатину: она должна минимально вымываться из слоя в процессе фотохимической обработки. Это обеспечивается либо предварительными исследованиями и выбором подходящей марки желатины, либо специальной подготовительной обработкой исходной желатины до синтеза эмульсии.

Для отбеленных голограмм эффективно использовать йодистое отбеливание, дающее увеличение толщины слоя, или применять стабилизирующую ванну из раствора йодистого калия, также способствующую разбуханию слоя. Кроме того, йодистое серебро менее подвержено восстановлению светом. Стабилизация изображения (защита от засвечивания) помимо применения йодистых отбеливателей может производиться следующими дополнительными операциями: купанием отбеленной голограммы в растворе оптического десенсибилизатора, например пинокриптола, феносафранина; купание в растворах сильных антиувалирующих веществ (бензотриазола, бензидимидазола, 1-фенил-5-меркаптотетразола); введение в процессе отбеливания или промывки ионов тяжелых металлов (ртути, свинца).

1.3.3. Фотоматериалы на бихромированной желатине и их обработка

Для изготовления изобразительных голограмм могут найти применение фотоматериалы на бихромированной желатине, что обусловлено их беззернистой структурой и поэтому очень малым рассеянием света в слое. Такие фотоматериалы, обладающие очень высокой разрешающей способностью, имеют высокую дифракционную эффективность и прозрачность, а также малый уровень шума. Голограммы, изготовленные на них, являются фазовыми. Под действием света во время экспонирования и затем под действием обработки в спиртовых растворах (обезвоживание) в желатине происходят структурные изменения, обусловленные неоднородным ее дублением, которые вызывают значительные локальные изменения показателя преломления света желатинового слоя.

Физико-химическая сущность процесса обработки фотоматериалов на бихромированной желатине заключается в структурных изменениях в желатине в процессе обезвоживания и дубления. При дублении возникают поперечные связи между молекулами. При этом участки желатинового слоя, получившие большее количество света в процессе экспонирования, подвергаются более значительным структурным изменениям, растрескиванию при сушке, чем обусловлены более существенные изменения показателя преломления света. Такой процесс структурных изменений желатины обеспечивает высокую разрешающую способность, достаточную для получения больших значений дифракционной эффективности даже при максимальных значениях пространственных частот, возникающих при получении отражательных голограмм в синем свете.

Существует два способа изготовления фотоматериалов на бихромированной желатине: 1) использование готовых заводских га-

логенидосеребряных фотоматериалов, из которых серебро удаляется путем фиксирования, затем слой промывается, сенсibiliзируется купанием в растворе бихроматных солей и сушится; 2) приготовление раствора бихромированной желатины и полив на стеклянную подложку с последующей сушкой.

Недостаток первого способа в том, что предприятия и фирмы-изготовители используют специальные типы желатины, оптимизированные именно для галогенидосеребряных материалов. Кроме того, проводится дубление слоев, оптимальное для этих материалов. Толщина слоев также оптимизирована для каждой задачи. Поэтому применение первого способа приводит в первую очередь к плохой повторяемости результатов. Часто пластинки не могут быть использованы из-за неприемлемой толщины результирующих слоев.

Второй способ свободен от указанных недостатков и позволяет регулировать процесс создания фотослоя, хотя он несколько более трудоемкий.

Хорошие результаты и высокую повторяемость дает следующий процесс изготовления предварительно не задубленных голографических материалов на бихромированной желатине, разработанный и опробованный в НИКФИ.

Приготавливают фотоэмульсию — 10%-ный раствор желатины в дистиллированной воде, — для чего навеску желатины 10 г заливают частью воды (50 мл) для набухания в течение 30—40 мин при температуре 35—40° (на водяной бане). Затем при перемешивании добавляют воду до 80 мл до полного растворения желатины. Предварительно приготовленный сенсibiliзирующий раствор бихромата аммония (6% от массы желатины в 10—15 мл воды) вводят в раствор желатины при перемешивании и доводят общий объем раствора до 100 мл. Затем при помешивании поднимают температуру раствора до 98° (на водяной бане) и выдерживают при этой температуре несколько минут. Далее раствор фильтруют и охлаждают до комнатной температуры. Готовую эмульсию можно использовать сразу для полива на стеклянную подложку или сохранять в холодильнике в закупоренной посуде в течение нескольких дней, где она находится в виде плотного студня.

Полив производят следующим образом. Из готовой эмульсии приготавливают рабочий 2%-ный (по желатине) раствор в дистиллированной воде, который и используют для полива на подготовленное вымытое стекло без подслоя при рассеянном белом свете. Если эмульсия хранилась в холодильнике, ее предварительно расплавляют в мерной посуде и доводят раствор дистиллированной водой до требуемого объема и нужной концентрации. Количество рабочего раствора определяется форматом пластинок и требуемой толщиной готового сухого слоя. Сушат пластинки в темноте, в горизонтальном положении ламинарным потоком обеспыленного воздуха при комнатной температуре и влажности до полного высыхания слоя.

Для изготовления бихромированных желатиновых слоев можно использовать желатину различных марок с разной вязкостью; гото-

вые слои будут иметь различную чувствительность и потребуют различия в режимах обработки. Для получения высоких результатов следует подобрать экспериментально партию желатины. Предпочтительнее применять низковязкие желатины.

Возможно сочетание двух способов получения материалов на бихромированной желатине: полив на стекло раствора чистой желатины известной марки, предварительная сушка и сенсibilизация купанием в растворе бихроматных солей с окончательной сушкой слоя. При этом обеспечивается высокая повторяемость результатов.

Готовые пластинки хранят в холодильнике сложенными слой к слою, во влагонепроницаемой упаковке до нескольких месяцев.

Съемку голограмм на бихромированной желатине ведут по одной из приведенных оптических схем в свете лазеров синие-зеленого излучения (гелий-кадмиевого на длине волны 0,44 мкм или аргонового на длинах волн 0,457; 0,488 и 0,514 мкм).

Экспонирование можно производить непосредственно после высушивания пластинок. Однако рекомендуется стабилизировать параметры фотослоя путем выдержки упакованных, как указано выше, пластинок в темноте при комнатной температуре в течение 1—2 суток. Для ускорения процесса стабилизации перед экспонированием можно использовать предварительный прогрев пластинок в термостате.

Процесс обработки экспонированных голограмм состоит из следующих операций: проявления и трехступенчатой спиртовой обработки. Проявление производят промывкой голограммы в проточной водопроводной воде с сильным перемешиванием при температуре 18—26°C при белом свете. Время промывки может составлять от нескольких секунд (купание) до нескольких минут в зависимости от того, сколько времени пластинки хранились после полива. Время устанавливают экспериментально, по пробам. Критерием является отношение сигнал/шум готовой голограммы.

Перед проявлением после экспонирования возможно введение дополнительной операции термического дозадубливания путем прогрева голограммы в термостате при температуре 75—80° в течение нескольких минут.

Спиртовая обработка заключается в последовательном купании проявленных голограмм в трех спиртовых ваннах (используется изопропанол). После проявления остатки воды стряхивают и пластинку быстро переносят в ванну с 50%-ным раствором изопропанола на 3—5 мин с перемешиванием. Затем, после стряхивания избытка спирта, пластинку переносят в ванну с крепким спиртом (концентрация — 95—99%) на 3—5 мин с перемешиванием. Затем, после стряхивания капель крепкого спирта, голограмму окунают в кипящий в высокой посуде абсолютный спирт (концентрация — 100%) на несколько секунд, вынимают и удерживают у поверхности кипящего спирта в его парах несколько секунд, после чего медленно вынимают из паров, не допуская подтеков спирта на поверхности голограммы. Голограмму охлаждают при комнатной темпе-

ратуре, подвергают визуальной оценке и в случае хорошего качества изображения немедленно герметизируют от воздействия влаги окружающей среды.

Приведенный процесс получения фотослоев на бихромированной желатине и их обработки опробован и дал хорошие результаты при съемке голограмм в синие-зеленой области спектра.

Экспериментальные характеристики фотоматериала на спектрально не сенсibilизированной бихромированной желатине получены для трех длин волн (рис. 38). Здесь не достигнута макси-

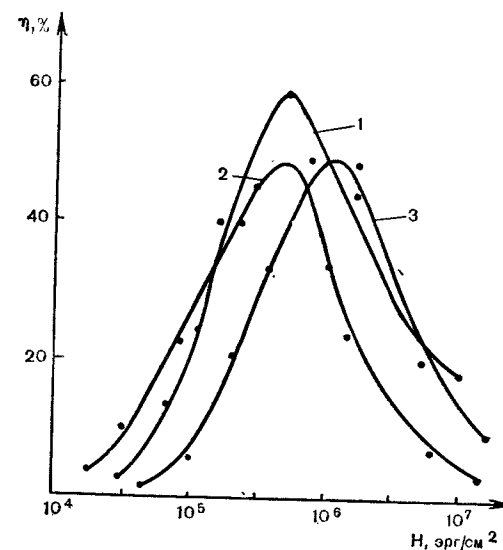


Рис. 38. Экспозиционные характеристики фотоматериала на бихромированной желатине для трех длин волн: 1 — 0,457 мкм; 2 — 0,488 мкм; 3 — 0,514 мкм

мальная дифракционная эффективность и чувствительность, зато характеристики имеют большой линейный участок и высокое отношение сигнал/шум. Если допустить большую нелинейность и меньшее отношение сигнал/шум, то при более длительной проявке дифракционная эффективность может иметь значения свыше 90% при меньшей экспозиции.

Дальнейшее развитие процессов повышения чувствительности фотоматериала и улучшения качества голограммы может идти в трех направлениях: усовершенствования фотослоя, процесса обработки и сенсibilизации к зеленой и красной областям спектра.

Фотослой может быть улучшен дополнительным химическим задубливанием путем введения дубителя в эмульсию или термическим задубливанием сухого слоя перед экспонированием.

Процесс обработки может быть дополнен введением кислотных ванн.

Чтобы получить фотоматериалы на бихромированной желатине, чувствительные к излучению в красной части спектра, и чтобы повысить чувствительность в зеленой части спектра, используют различного рода сенсibilизаторы, вводимые в раствор желатины перед поливом слоев.

Наиболее эффективны тиазиновые красители: тиокармин с добавлением электронодатора — трилона Б (динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты), а также метиленовый голубой, маляхитовый зеленый и эозин.

При сенсibilизации желатины тиокармином были получены следующие параметры отражательных голограмм на бихромированной желатине для плоского зеркала:

Длина волны света, нм	Дифракционная эффективность, %	Экспозиция, Дж/м ²
476	90	100
530	90	1000
633	50	7500

Как видно из приведенных данных, фотоматериалы на бихромированной желатине значительно (на порядок и более) уступают галогенидосеребряным фотоматериалам по светочувствительности.

1.3.4. Перспективы создания новых фотоматериалов для изобразительной голографии и голографического кинематографа

Успехи, достигнутые в изобразительной голографии, в значительной мере связаны с научно-техническими достижениями в области голографических фотоматериалов, и дальнейший прогресс в существенной мере будет определяться созданием новых, еще более совершенных фотоматериалов.

Развитие монохромных голографических материалов должно идти по линии увеличения их чувствительности.

Наиболее важное направление прогресса — создание цветных голографических фотоматериалов, обладающих достаточно высокой чувствительностью в синей, зеленой и красной частях спектра. Эти фотоматериалы должны быть рассчитаны на получение фазовых голограмм с небольшим поглощением света в слое и высокой дифракционной эффективностью.

Для получения голограмм с цветным изображением принципиально возможно создание фотоматериалов с единым светочувствительным слоем или многослойных, у которых два или три слоя сенсibilизируются к различным участкам спектра. Однослойные фотоматериалы имеют преимущество более простого строения, а так-

же более высокой спектральной селективности голограмм при одинаковой общей толщине слоев.

Однако при последовательной записи в одном слое нескольких чисто фазовых голограмм, например трех частичных голограмм в различных диапазонах спектра, дифракционная эффективность каждого цветного изображения должна уменьшаться обратно пропорционально квадрату числа частичных голограмм (при сохранении остальных параметров — толщины слоя и др.). Этот недостаток не свойствен способу записи частичных голограмм в различных слоях. Кроме того, многослойные фотоматериалы имеют преимущество устранения взаимодействия сенсibilизаторов для разных участков спектра между собой за счет их разделения по различным слоям.

Цветной фотоматериал для съемки и копирования голографического фильма может быть даже более чем трехслойный. Для максимально точной цветопередачи необходимо разработать технологию изготовления многослойных фотоматериалов более чем трех слоев, включающих сенсibilизированные, маскирующие и фильтровые слои. Это делает необходимым развитие методов узкополосной спектральной сенсibilизации. (В обычных, применяемых в настоящее время материалах не учтено такое требование.) Для узкополосной сенсibilизации требуется поиск красителей с J-агрегатами, а также исследование и определение оптимальной огранки микрокристаллов эмульсии и их ориентации в слое.

Необходимо оптимизировать весь двухступенчатый процесс съемки и копирования. Для съемки нужны материалы и режимы обработки, обеспечивающие максимальное отношение сигнал/шум, для копирования — мал шумные сверхмелкозернистые материалы с высокой дифракционной эффективностью и низким уровнем шума.

Нужно также развивать материалы для цветной изобразительной голографии. Ближайшая перспектива таких материалов — двухслойные. В НИКФИ получены первые положительные результаты по съемке отражательных голограмм на двухслойном материале. В перспективе же цветные фотоматериалы для отражательных голограмм тоже должны быть многослойными.

1.3.5. Методы и приборы для определения характеристик голографических фотоматериалов

Так как отдельные характеристики голографических фотоматериалов близки к соответствующим характеристикам обычных фотоматериалов, то для их измерения используют общепринятые приборы: денситометры, спектрофотометры, сенситометры и спектросенситометры, резольвометры. Например, стандартным денситометром измеряют плотность вуали и усредненные плотности почернения голограмм по стандартным методикам. Спектрофотометрами измеряют спектральные характеристики сенсibilизированных и несенсibilизированных эмульсий и фотоматериалов (так-

же по общепринятой методике). Однако специфические голографические параметры определяют по нестандартным методикам.

Экспозиционные характеристики голографических фотоматериалов измеряют в обычных физических единицах (джоуль, эрг, ватт), удобных при работе с лазерами и электронной аппаратурой.

Величину интенсивности света при таких измерениях определяют в джоулях на квадратный метр, что численно равно эргам на

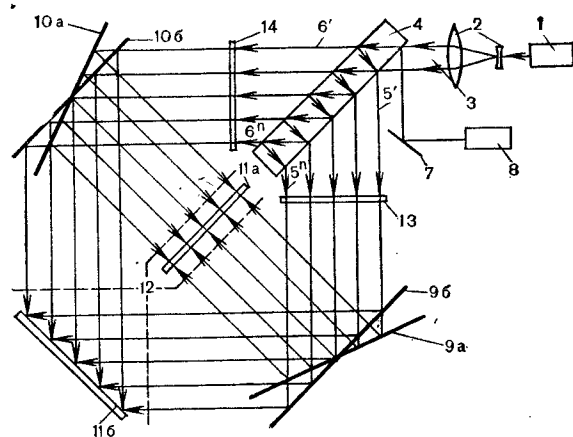


Рис. 39. Схема экспонирования голографических фотоматериалов для измерения их характеристик

квадратный сантиметр. По измеренным в таких единицах значениям интенсивности излучения при экспонировании и воспроизведении изображения определяют такие важные величины, характеризующие голографические фотоматериалы, как дифракционная эффективность, максимальный контраст, чувствительность, уровень шума, отношение сигнал/шум.

В настоящее время нет общепринятых методов для измерения характеристик и оценки качества голографических фотоматериалов, предназначенных для изобразительной голографии. Ниже описаны два из применяемых методов для изобразительной голографии и голографического кинематографа.

На рис. 39 показана схема экспонирования образцов фотоматериала для измерения их характеристик. В качестве источника света использован лазер 1, излучающий на требуемой для исследований длине волны. С помощью коллиматора 2 формируется более широкий параллельный пучок 3, который падает на светоделительную пластинку 4, обе поверхности которой имеют специальное покрытие. Пластинка делит энергию пучка 3 на n (обычно 6—10) пучков за счет многократных переотражений на поверхностях. Часть энергии отражается в пучках 5'—5ⁿ, другая — проходит через пластинку в пучках 6'—6ⁿ. Коэффициенты отражения и пропускания покрытий

подобраны таким образом, чтобы создать нужное соотношение энергии в соседних пучках (1,3—2 раза) и суммарное ослабление в 10—100 раз. Диафрагмы 12 выделяют из каждого пучка равномерно освещенное квадратное поле размером $0,7 \times 0,7$ см (площадью около $0,5 \text{ см}^2$). Небольшая часть энергии лазера ответвляется зеркалом 7 в измеритель мощности или энергии 8. Поворотом зеркал 9, 10 в положение a или b и установкой фотопластинки 11 в положение a или b измерительная схема преобразуется для записи n отражательных (a) или пропускающих (b) голограмм плоского зеркала с различной пространственной частотой. Изменяя интенсивность в пучках с помощью нейтральных светофильтров 13 и 14, можно получить различные соотношения энергий в пучках для исследования дифракционной эффективности фотоматериала в зависимости от абсолютной величины и соотношения энергий.

После экспонирования по выбранной схеме и фотохимической обработки образцы фотоматериала исследуют по схеме рис. 40. При определении характеристик фотоматериалов для пропускающих голограмм в качестве восстанавливающего источника света 1 можно применить лазер или монохроматор. В случае фотоматериала для отражательных голограмм используют источник света 2 — лазер, монохроматор или источник белого света с коллимирующей оптикой.

Голограмму 4 располагают по отношению к восстанавливающему пучку под углом, соответствующим максимальной дифракционной интенсивности. Располагая фотоприемник 3 под разными углами по отношению к голограмме 4 и перемещая голограмму в плоскости максимальной дифракционной эффективности, определяют интенсивность излучения для основного и других порядков дифракции на каждом поле голограммы, а также уровень шума. Интенсивность шума можно измерять для полей голограммы, экспонированных двумя пучками, либо для поля, экспонированного только одним опорным пучком.

Из результатов измерений по схемам рис. 40 можно определить следующие зависимости:

$$\eta = f(H_s) \text{ при } H_R = \text{const}, \nu = \text{const};$$

$$\eta = f\left(H_\Sigma\right) \text{ при } \frac{H_R}{H_s} = \text{const}, \nu = \text{const};$$

$$\eta = f(\nu) \text{ при } H_R = \text{const};$$

$$\frac{I_N}{I_R} = f(H_R) \text{ при } \nu = \text{const}, \varphi = \text{const}, H_s = \text{const};$$

$$H_\Sigma = H_R + H_s,$$

где η — дифракционная эффективность; $H_s H_R$ — слагающие экспозиции, обусловленные объектным и опорным пучками; ν — пространственная частота интерференционной решетки; I_N, I_R — интен-

сивность излучения шума и опорного пучка; φ — угол направления излучения шума по отношению к голограмме.

Из указанных зависимостей можно найти значения максимальной дифракционной эффективности и соответствующие им значения голографической чувствительности. Можно также найти значения чувствительности, соответствующие заданной величине дифракци-

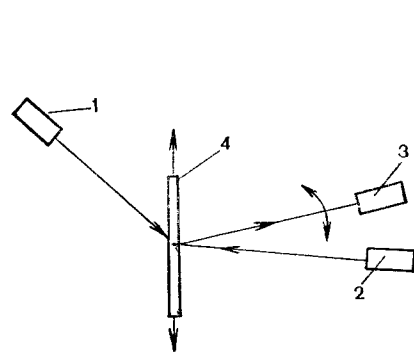


Рис. 40. Схема измерения основных характеристик фотоматериалов

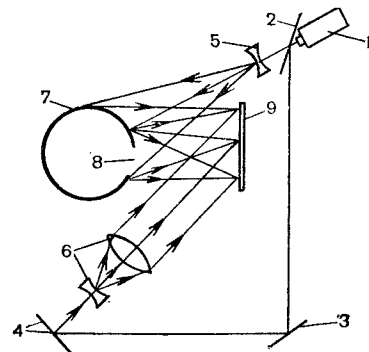


Рис. 41. Схема экспонирования фотоматериала для определения максимального контраста изображения

онной эффективности и отношению сигнал/шум для градиационной характеристики $\eta = f(H_s)$. Кроме того, из указанных зависимостей можно определить значение разрешающей способности фотоматериала по заданной кратности падения дифракционной эффективности с увеличением пространственной частоты. Для определения значения максимального контраста используют специальную методику.

На рис. 41 показана схема экспонирования фотоматериала для определения максимального контраста изображения, который может быть достигнут при получении голограммы на данном фотоматериале, где 1 — лазер; 2 — светоделительная пластинка; 3 и 4 —

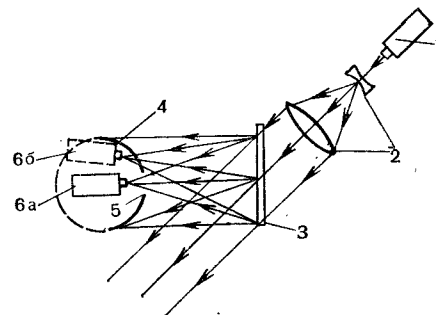


Рис. 42. Схема измерения максимального контраста фотоматериала

зеркала; 5 — расширятельная линза; 6 — коллиматор; 7 — полый шар с белой диффузной поверхностью; 8 — отверстие в шаре, внутренняя поверхность которого выкрашена черной матовой краской; 9 — экспонируемый фотоматериал, максимальный контраст которого определяется.

На рис. 42 показана схема измерения максимального контраста фотоматериала, экспонированного по схеме рис. 41. Здесь 1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 — голограмма; 4 — изображение шара, воспроизводимое голограммой; 5 — изображение черного отверстия в шаре; 6 — фотоприемник. Перемещая фотоприемник 6 из положения а в положение б, измеряют интенсивность излучения в восстановленном изображении шара на белой поверхности и черном отверстии. Схемы рис. 41 и 42 могут быть применены для исследования отражательных голограмм. Если голограмма восстанавливается белым светом с определенной цветовой температурой, а фотоприемник имеет спектральную характеристику, приведенную к спектральной характеристике глаза, то измеренные значения дифракционной эффективности и шума более правильно и объективно учитывают физиологические особенности восприятия зрителем. Тест-кадр голографического фильма для измерения максимального контраста показан на фото 4.

Процесс получения голограммы по любой схеме, в сущности, представляет собой интерференционный эксперимент, а аппаратура — интерферометр. Это определяет технические требования к условиям работы и к элементам голографических установок для работы с непрерывными и импульсными лазерами.

1.4.1. Особенности техники получения голограмм с лазерами непрерывного действия

В настоящее время для изготовления изобразительных голограмм в большинстве случаев используют лазеры непрерывного действия на нейтральных атомах (гелий-неоновые) и ионные (аргоновые и криптоновые). Это объясняется главным образом тем, что газовые лазеры с приемлемыми параметрами выпускаются отечественной и зарубежной промышленностью и практически могут использоваться голографистами. Однако у этих лазеров имеется ограниченное количество дискретных длин волн излучения, пригодных для съемки монохромных и цветных голографических изображений. Выбор длины волны определяется не только мощностью излучения лазера на этой длине волны, но также возможностью максимального согласования длин волн записи и воспроизведения с точки зрения создания оптимального изображения для субъективного восприятия зрителем.

Известно, что монохромная отражательная изобразительная голограмма из-за спектральной селективности не воспроизводит черно-белого изображения в фотографическом понимании, а может иметь цветовой тон в какой-либо области спектра, например красной, сине-зеленой, желто-оранжевой. В зависимости от того, что изображается на голограмме, можно выбрать нужный цветовой тон. Это определяется художественным замыслом и вкусом голографиста, а достигается способом фотохимической обработки и выбором восстанавливающего источника света. При этом следует учитывать возможность возникновения масштабных искажений при значительном рассогласовании длин волн восстанавливающего и записывающего источников, которые изменяют пропорции и уменьшают художественные достоинства объектов съемки.

Чаще всего изображение монохромной отражательной голограммы воспроизводится светом лампы накаливания при неглубоких объектах или ртутной на линии излучения около 0,578 мкм при достаточно глубоких объектах. Восстановленное изображение имеет желто-оранжевый оттенок, приятный для глаз и соответствующий действительной окраске большой группы объектов, которые в настоящее время наиболее часто голографируются: изделий из драгоценных металлов, бронзы, дерева. Предметы, не имеющие в дейст-

вительности желто-оранжевого цвета, выглядят на голограмме в этих тонах гораздо приятнее, чем, например, в зеленых или красных, утомляющих зрение.

Масштабные искажения, возникающие при восстановлении отражательной голограммы светом с длиной волны λ_2 , отличающейся от длины волны записи λ_1 , могут быть оценены по формулам Мейера и хорошо иллюстрируются следующим примером. Параллельный

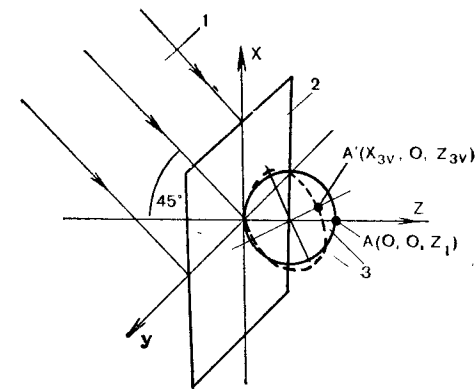


Рис. 43. Масштабные искажения при восстановлении отражательной голограммы

пучок 1 падает на пластинку 2 сверху под углом 45° к ее поверхности (рис. 43). Объект съемки 3 расположен сзади пластинки так, что его передняя центральная точка прикасается к стеклу. Дальняя точка A объекта расположена на расстоянии от стекла $Z_1 = 100$ мм по нормали в точке касания ($X_1 = 0$). Изображение восстанавливается светом ртутной лампы с длиной волны 0,578 мкм. Простой расчет показывает, как изменяются координаты дальней точки восстановленного изображения по вертикали (X_{3v}) и по глубине (Z_{3v}) при разных длинах волн записывающего источника:

Длина волны записи, мкм	0,514	0,568	0,633	0,647	0,694
X_{3v} , мм	+11	+1,7	-9,5	-12	-20
Z_{3v} , мм	89	98,3	109,5	112	120
$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$	0,89	0,983	1,095	1,12	1,2

Из полученных результатов видно, что при увеличении разницы длин волн в обе стороны размеры объекта по глубине также изменяются: объект растягивается при увеличении длины волны за-

писи относительно восстанавливающей и сжимается при уменьшении. Кроме того, восстановленное изображение объекта наклоняется относительно вертикали также с учетом знака. Зная это, наклон можно в некоторых случаях несколько скомпенсировать, установив объект при съемке под углом к плоскости пластинки. Искажения по глубине устранить нельзя. Особенно они сказываются при съемке знакомых предметов правильных форм: например, круглые контуры становятся эллиптическими, а при съемках скульптурных портретов и портретов людей изменяются и искажаются черты лица.

Исходя из сказанного, оптимальные результаты при воспроизведении изображения получают при съемке с криптоновым лазером на длине волны 0,568 мкм, самой близкой к оранжевой части спектра (0,578 мкм). При обработке фотоматериала, обеспечивающей нужную толщину слоя для воспроизведения изображения в оранжевых тонах, масштабные искажения имеют минимальную величину, а угол обзора восстановленного изображения — максимальную, около 2π радиан. Однако использование излучения криптонового лазера на этой длине волны связано с рядом трудностей, так как это не основная линия излучения; мощность на этой длине волны невелика, генерация происходит в узком диапазоне давлений криптона в трубке, и ее труднее получить. Максимальную мощность и стабильность излучения имеет аргоновый лазер на длине волны 0,514 мкм. Он более надежен в работе, чем криптоновый, менее подвержен влиянию изменения давления в трубке, и длина волны 0,514 мкм представляется наиболее применимой для работы.

Следует учесть также следующее. Заводские голографические пластинки не сенсибилизированы к зеленой области и имеют пониженную чувствительность в оранжевой области спектра, поэтому их неэффективно использовать для работы с излучением на длинах волн 0,568 и 0,514 мкм. В большинстве случаев для получения изобразительных голограмм используют линию излучения 0,647 мкм (красная). Это объясняется не только достигнутыми результатами по сенсибилизации фотоматериалов к красной области спектра, но и некоторой традиционностью, обусловленной переходом от работы с первыми гелий-неоновыми лазерами к ионным. Кроме того, легче изменить толщину слоя в сторону уменьшения.

Экспериментальные голографические «прозрачные» фотоматериалы НИКФИ имеют чувствительность в зеленой и оранжевой областях спектра более высокую, чем в красной, и успешно применяются для получения голограмм на линиях излучения аргонового лазера 0,514 мкм и криптонового 0,568 мкм. При этом обработку ведут с утолщением слоя, а масштабные искажения имеют несколько меньшую абсолютную величину.

При изготовлении цветных изобразительных голограмм одна из важнейших задач — достижение наиболее правильной цветопередачи, т. е. цвета изображения, близкого к цвету оригинального объекта.

В голографическом процессе, так же как в обычном цветном фотографическом процессе, невозможно достигнуть абсолютно точ-

ного воспроизведения всего многообразия цветов, встречающихся в жизни, и точно воспроизвести очень сильно насыщенные цвета, соответствующие, например, спектрально узким линиям излучения. Однако в жизни цвета такой насыщенности встречаются весьма редко и указанный недостаток не мешает получать изображения множества сцен высокого качества в отношении их цвета.

В современных фотографических и телевизионных процессах для раздельной регистрации и последующего воспроизведения цветного изображения используют три зоны излучения в красной, зеленой и синей областях спектра, и это оказывается достаточным для получения хороших по цвету изображений в большей части практических случаев.

Цветной голографический процесс также основан на трех составляющих излучения, независимо регистрируемых и затем воспроизводимых при изготовлении голограммы. Это обуславливает возможность получения и в голографическом процессе хорошей цветопередачи даже сложных сцен, в которых одновременно присутствуют объекты, существенно различные по цвету.

Однако в голографическом процессе три спектральные зоны излучения значительно уже и представляют собой три линии излучения. Эта особенность позволяет несколько расширить диапазон передаваемых цветов, недоступных для обычного фотографического процесса.

Искажения цветопередачи как в фотографическом и телевизионном процессах, так и в голографическом зависят от выбранных линий, зон излучения, их спектрального положения. Не существует вообще единых оптимальных значений указанных спектральных линий для произвольных цветных изображений. Однако для наиболее типичных объектов (лицо человека, снег, голубое небо, зеленая трава и т. п.) более правильная передача цвета достигается в тех случаях, когда линии излучения близки к максимумам разностной спектральной чувствительности глаза человека к красному (0,61 мкм), зеленому (0,53 мкм) и синему (0,45 мкм) излучениям.

Однако лазеры, которые изготовляют в настоящее время и применяют для получения голограмм, имеют несколько отличающиеся значения длин волн: 0,633; 0,647; 0,514; 0,457; 0,488 мкм.

Более точную цветопередачу можно достичь за счет увеличения числа линий излучения, но при этом необходимо использовать фотослон с уменьшенным светорассеянием.

Для получения отражательной голограммы на экспериментальном «прозрачном» фотоматериале НИКФИ с экспозиционной чувствительностью 10 000 эрг/см² при мощности непрерывного лазерного излучения 500 мВт и размерах пластинки 100×75 см требуется время экспонирования 20 с. Для серийных фотоматериалов время экспонирования больше. Это обуславливает основные конструктивные требования к голографической установке.

Основной элемент установки для получения изобразительных голограмм с лазерами непрерывного действия — это голографический стол, на котором расположены источники света (лазеры), элементы

оптической схемы, фотопластика в приспособлении для ее закрепления, объекты голографирования и прочие компоненты. Конструкция стола и крепление всех элементов должны обеспечивать стабильность в пространстве регистрируемой интерференционной картины за время экспонирования с точностью до десятых долей длины волны света, используемого для записи голограммы. Отечественная промышленность выпускает голографические столы с массивной чугунной плитой или набором жестко связанных между собой массивных металлических элементов на амортизированном основании. Ряд зарубежных фирм производит столы с монолитными массивными гранитными и металлическими плитами. Главный недостаток этих столов — ограниченные размеры, связанные со сложностью доставки и монтажа.

Голографические методы и техника быстро развиваются. Растут размеры голограмм, увеличиваются число и размеры элементов оптической схем (количество лазеров, например, для цветной съемки, диаметры линз, зеркал, объективов). Появляется необходимость размещения на столе киноголографической съемочной аппаратуры, создание сцены съемки с различным реквизитом. Оптические схемы требуют больших углов и отрезков, например при изготовлении голографических оптических элементов, поэтому возникает потребность в голографических столах больших размеров, нестандартных пропорций, часто по габаритам привязанных к планировке помещения.

В НИКФИ под руководством авторов разработаны конструктивные и технологические принципы изготовления голографических столов больших размеров, которые позволяют построить железобетонную монолитную плиту на амортизированном основании непосредственно в рабочем помещении. Типовая конструкция стола размерами $2,5 \times 4$ м приведена на рис. 44. Разработан проект такого стола размером 5×10 м.

Стол представляет собой акусто-механический фильтр, позволяющий гасить механические и акустические колебания в достаточной степени для изготовления отражательных голограмм размером более $1 \times 0,75$ м при времени экспонирования до 2,5 мин. Закладные части (рис. 45) позволяют жестко закрепить на столе конструктивные элементы — рельсы, рейтеры, рамы, подставки различных размеров. При необходимости подачи света от лазера в плоскость стола сверху закладные части позволяют закрепить систему колонн с поперечными балками и плитами наверху, на которых устанавливают оптические элементы. Если используемые лазеры не требуют систематической подстройки, регулировки и другого обслуживания, их тоже можно размещать в верхнем ярусе, что освобождает рабочую поверхность стола для других элементов. Полые колонны и направляющие трубы больших рейтеров заполняют песком. Общий вид стола с лазерами и сферическим зеркалом диаметром 1,3 м показан на фото 2.

Такая массивная голографическая установка требует специального помещения для голографической лаборатории или голографи-

ческого участка. Помещение желательно иметь на первом этаже или в подвале, чтобы стол возможно было смонтировать на грунте и его основание было развязано от общего фундамента здания, передающего вибрации и имеющего значительные резонансы на некоторых частотах. Желательно, чтобы рядом не было работающих

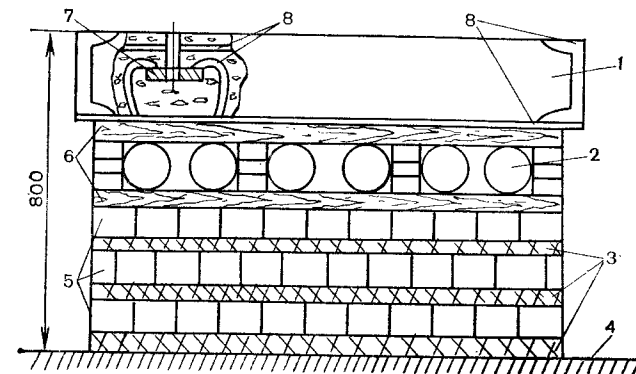


Рис. 44. Схема голографического стола: 1 — бетонная плита; 2 — автомобильные камеры; 3 — пористая резина; 4 — пол; 5 — кирпич; 6 — дощатый щит; 7 — закладная часть; 8 — металлическая арматура

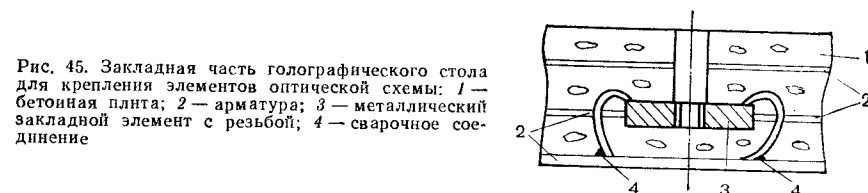


Рис. 45. Закладная часть голографического стола для крепления элементов оптической схемы: 1 — бетонная плита; 2 — арматура; 3 — металлический закладной элемент с резьбой; 4 — сварочное соединение

лифтов, компрессоров, двигателей, вентиляторов, насосов, станков. В помещении не должно быть сквозных потоков воздуха, нагревательных элементов, желательно иметь кондиционирование воздуха. Необходимо устранить внешние акустические шумы, проникающие через окна. Лучше окон в помещении не иметь.

Жесткое крепление элементов оптической схемы на столе и верхнем ярусе осуществляется различными прижимами, болтами, струбцинами, иногда приклеиванием.

Голографическую пластинку устанавливают в специальной раме, также жестко закрепленной на столе горизонтально или вертикально в зависимости от снимаемого объекта (рис. 46 и 47). Рамы должны быть изготовлены различного размера под стандарты фотопластины и стекла. Прижим стекла осуществляется через резину к направляющей поверхности с повышенной плоскостностью. Резина выступает во внутреннее окно рамы и демпфирует колебания пластинки, которые могут возникнуть в процессе экспонирования.

Объект съемки в вертикальном положении с пластинкой 600×800 мм в раме показан на фото 3.

Все оптические элементы схемы (зеркала, светоделительные пластинки, микрообъективы, диафрагмы, призмы, затворы) должны устанавливаться в специальных приспособлениях, обеспечиваю-

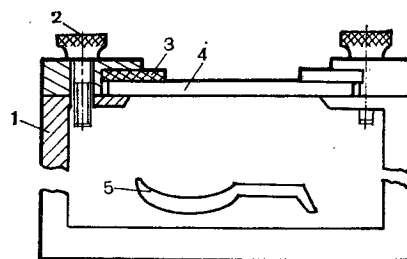


Рис. 46. Крепление пластинки в раме: 1 — рама; 2 — крепежный винт; 3 — пористая резина; 4 — голографическая пластинка; 5 — объект съемки

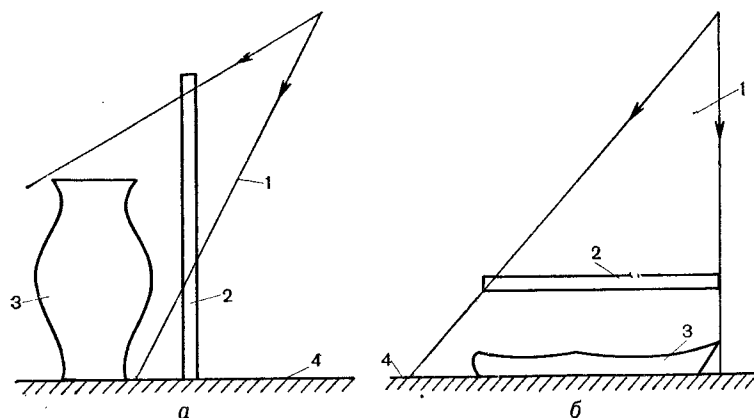


Рис. 47. Расположение объектов при съемке на голографическом столе: а — вертикальное; б — горизонтальное; 1 — освещающий пучок; 2 — пластинка; 3 — объект; 4 — стол

щих юстировку схемы и возможность фиксации элемента после юстировки.

Зеркала и светоделительные пластинки желательно иметь с диэлектрическим покрытием, так как алюминированное зеркало имеет значительные потери (несколько процентов), при некоторых углах может изменить поляризацию, кроме того, такое покрытие выгорает при мощности лазера более 1 Вт.

Важным оптическим элементом является точечная диафрагма 1 — пластинка с отверстием диаметром несколько единиц или десятков микрон. Диафрагма 1 (рис. 48) устанавливается между объективом 2, расширяющим пучок света 3, и фотопластинкой 4, расположенной перед объектом 5, таким образом, что ее отверстие находится в месте фокусирования освещающего пучка и ограничива-

ет лучи, нарушающие его гомоцентричность. При этом, как говорят, пучок «вычищается» и устраняются интерференционные помехи в виде темных и светлых колец и пятен на голографическом изображении, которые при отсутствии диафрагмы возникают вследствие рассеяния на различных неоднородностях оптических элементов или на частицах пыли на оптических поверхностях, особенно микро-

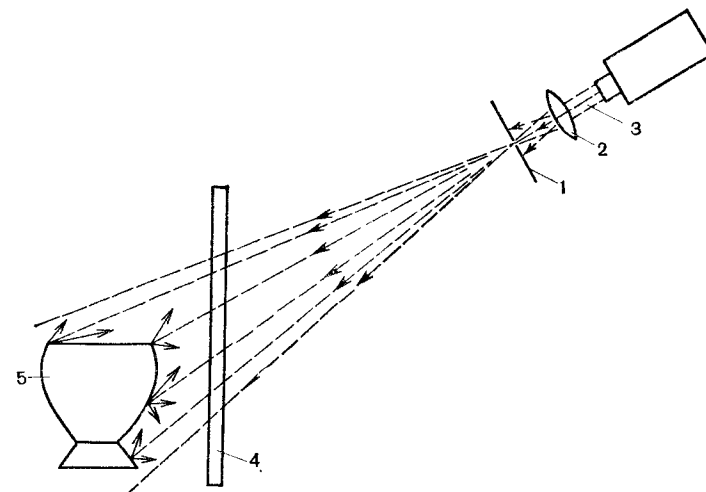


Рис. 48. Схема расположения точечной диафрагмы при съемке голограммы

объектива, которые нельзя удалить чистой оптики. Источником помех является также интерференция света, переотраженного многократно поверхностями линз микрообъектива.

Для устранения интерференционных помех диаметр диафрагмы следует выбирать согласно следующей формуле:

$$d \cong \frac{2\lambda_s}{b} 10^3, \quad (I.13)$$

где d — диаметр диафрагмы, мкм; λ_s — длина волны света, мкм; b — поперечный размер фотопластинки, мм; l — расстояние от диафрагмы до фотопластинки, м.

Точечную диафрагму изготавливают на алюминиевой фольге, лежащей на твердой подложке, путем накалывания остро заточенной иглой. Форму заточки иглы и каждого получившегося отверстия контролируют с помощью микроскопа со шкалой для измерения диаметра отверстия. Диафрагма должна быть круглой, без рваных краев. Из набора изготовленных диафрагм выбирают нужный диаметр для работы.

При голографировании следует помнить, что наиболее интенсивная интерференция в фотослое происходит в том случае, если опор-

ный и объектный пучки имеют одинаковую поляризацию, а если плоскости поляризации пучков взаимно перпендикулярны, интерференция не возникает.

Излучение лазеров, применяемых для изготовления изображительных голограмм, является плоскополяризованным. Поляризационные свойства излучения необходимо учитывать и использовать.

В случае записи пропускающей голограммы или подсветки объекта дополнительным пучком необходимо согласовать поляризации всех пучков в области фотослоя. Если объект меняет плоскость поляризации, то при необходимости можно создать освещающий и опорный пучки с круговой поляризацией.

Особенность поляризованного света проходить через границу двух сред без отражений при падении под углом Брюстера позволяет получить следующий эффект. Для устранения переотражений в поверхностях эмульсия — стекло голографической пластинки, которые регистрируются в виде паразитной голограммы зеркала, желательно, чтобы освещающий пучок при записи отражательной голограммы и опорный при пропускающей падал на пластинку под углом Брюстера. Устранить переотражения в пропускающей голограмме можно путем нанесения на эмульсионную сторону черного матового противоореального слоя (такую дополнительную обработку можно производить и с заводскими пластинками). Для отражательной голограммы этот способ неприемлем, поэтому условие освещения под углом Брюстера становится особенно существенным. Надо сказать, что такой угол очень удобен и с точки зрения освещения голограммы при восстановлении.

Согласование плоскостей поляризации обеспечивается верной установкой лазерного источника по отношению к пластинке с учетом особенностей работы всех оптических элементов схемы (зеркал, пластинок и т. д.). Если нет возможности разместить лазер и оптические элементы должным образом, в оптическую схему вводят вращатель поляризации в виде, например, полуволновой пластинки или биромба из двух ромбов Френеля.

В схемах голографирования применяют затворы различных конструкций, позволяющие перекрыть пучок света лазера на время установки фотопластинки и выдерживания ее с целью полного гашения возникших при этой операции вибраций до момента экспонирования. Затвор приводится в действие вручную или от устройства, задающего длительность экспозиции, и должен работать плавно, не вызывая акустических и механических колебаний и турбулентных воздушных потоков на пути освещающего пучка, нарушающих его когерентность. При мощности лазера более 100 мВт затвор следует ставить после точечной диафрагмы. В противном случае в процессе экспонирования диафрагма постепенно нагревается, изменяет свои размеры и деформируется, также нарушая когерентность и гомоцентричность пучка, что приводит к возникновению паразитных интерференционных картин, либо голограмма не регистрируется совсем.

Объект съемки или композицию из ряда предметов размещают вертикально или горизонтально (см. рис. 47, а, б) в зависимости от смыслового содержания и жестко закрепляют либо непосредственно на столе, либо на массивной подставке, которая одновременно может служить частью фона. Должен быть предусмотрен жесткий задний план, а боковые стороны в объеме голографируемой композиции могут закрываться темным материалом, либо иметь зеркальные или рассеивающие свойства и создавать дополнительные боковые подсветки.

Если объект имеет выступающую к центру пластинки часть, полезно его придвинуть вплотную к стеклу так, чтобы выступающая часть к нему прикоснулась.

Крепление объектов, подставки и элементов фона производят также струбинами, прижимами и приклеиванием. Можно использовать специальную замазку по типу менделеевской, которая состоит из 80% канифоли и 20% технического воска (по весу). Замазка расплавляется паяльником до затекания ее в места стыковки. Для крепления объекта в местах, находящихся непосредственно в поле зрения, очень хорошо показал себя бесцветный жидкий клей циакрин, имеющий высокую текучесть и легко снимаемый ацетоном.

Освещение объекта голографирования определяется двумя аспектами. Первый — оптическая схема съемки. В зависимости от того, какую голограмму надо получить — отражательную или пропускающую, — выбирают взаимное расположение источника света, пластинки и объектов с учетом всех приведенных технических требований к элементам и геометрии схемы съемки.

Второй аспект — оптические и художественные особенности голографируемого объекта, которые определяют выбор его расположения и освещения. Необходимо учитывать отражающие свойства поверхностей объекта (зеркальные, диффузные, наличие полостей, куда не попадает свет, образование теней), а также блики от поверхностей фотопластинки, не связанные с естественными бликами, присутствующими снимаемым объектам. Прямое освещение одним пучком часто не передает художественных достоинств композиции, а иногда обуславливает искажения за счет резких теней и отсутствия полутонов. Поэтому предпочтительно для получения художественной голограммы применять многопучковые схемы (рис. 49). При формировании освещающего пучка β угол падения α на боковое зеркало 10 может иметь большую величину, при этом требование к стабильности положения этого зеркала во время экспозиции резко возрастает.

Во всех случаях необходимым является максимально возможное уравнивание длины путей распространения света в опорном и объектном пучках с учетом паспортного или измеренного экспериментально значения длины когерентности лазера, работающего даже в одночастотном и одномодовом режиме.

Имеется еще одно существенное замечание. После юстировки и закрепления всех элементов схемы установка на некоторое время, определяемое особенностями ее конструкции, должна оставаться в

покое для гашения всех механических и акустических колебаний и уравнивания температур оптических элементов схемы и крепежных деталей. При установке пластинки в раму следует по возможности не прикасаться к ненужным для данной операции предметам на столе, а затем выдержать установку некоторое время до экспони-

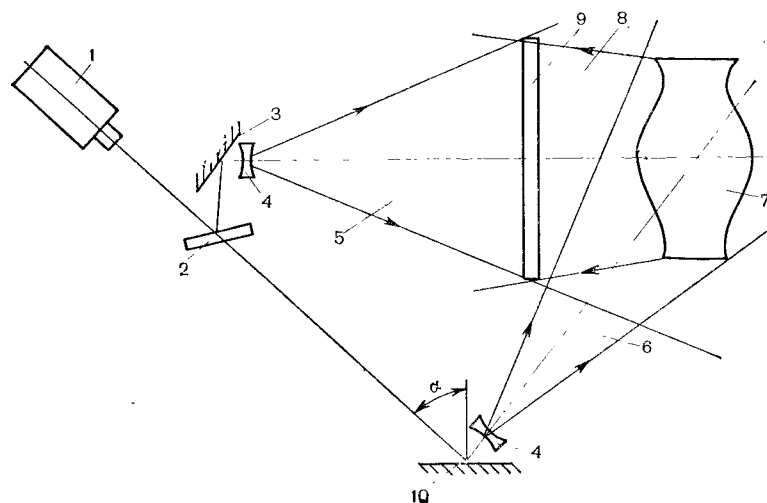


Рис. 49. Двухпучковая схема освещения при съемке отражательной голограммы: 1 — лазер; 2 — светоделительная пластинка; 3 — зеркало; 4 — расширительная линза; 5 — основной освещающий пучок; 6 — боковой подсвечивающий пучок; 7 — объект; 8 — объектный пучок; 9 — фотопластинка; 10 — боковое зеркало

рования, чтобы пластинка приняла температуру окружающей среды.

Все указанные требования относятся к монохромной и к цветной голографии с лазерами непрерывного действия и особенно важны при изготовлении крупноформатных изобразительных голограмм.

Некоторый опыт работы с голографическими установками, тщательность и учет сказанного, а также достаточный эстетический вкус голографиста позволят получить высококачественные художественные цветные объемные изобразительные голограммы, что полностью оправдывает некоторую трудоемкость процесса съемки.

1.4.2. Особенности техники получения голограмм с импульсными лазерами

Импульсной съемке изобразительных голограмм принадлежит будущее, которое зависит от усовершенствования и создания новой лазерной техники.



Фото 1. Сцена съемки первого экспериментального голографического цветного мультипликационного фильма



Фото 2. Голографический амортизированный стол размером $2,5 \times 4$ м с лазерами и сферическим зеркалом диаметром 1,3 м



Фото 3. Рама для крепления голографической пластинки размером 600×800 мм и объекта при съемке отражательной голограммы

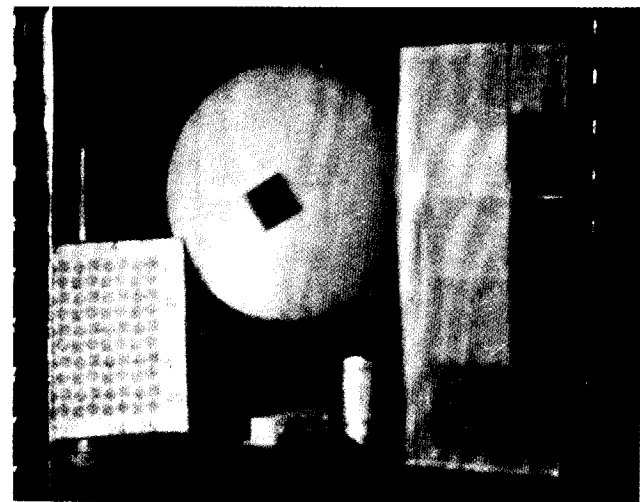


Фото 4. Тест-кадр из экспериментального голографического фильма

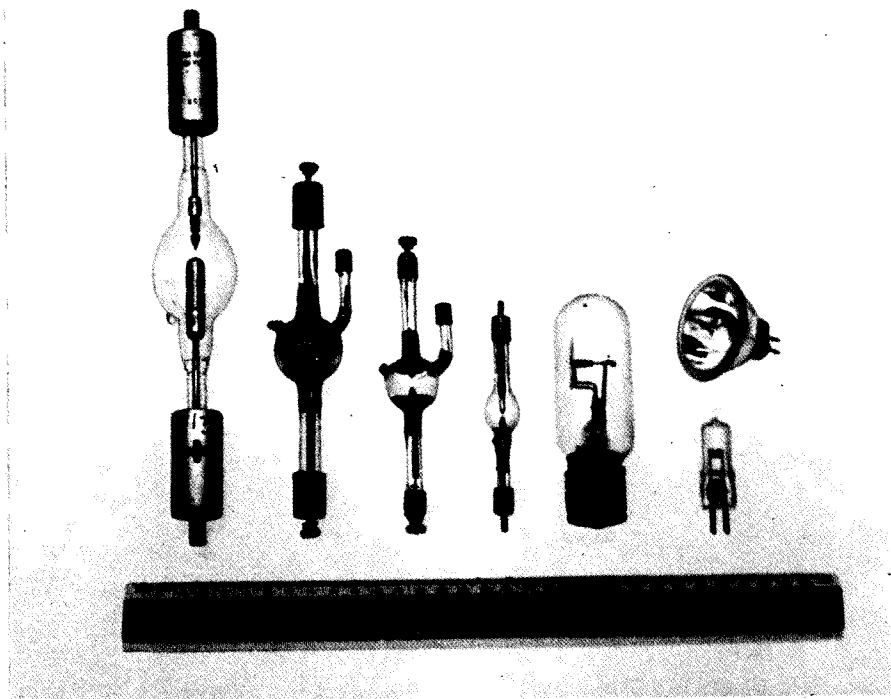


Фото 6. Лампы для воспроизведения голографических изображений отражательных голограмм (слева направо): ДКСШ-1000; ДРШ-500; ДРШ-250-3; ДРШ-250-2; ДАЦ-50; КГИ-24-150 (с отражателем); КГМ-30-300

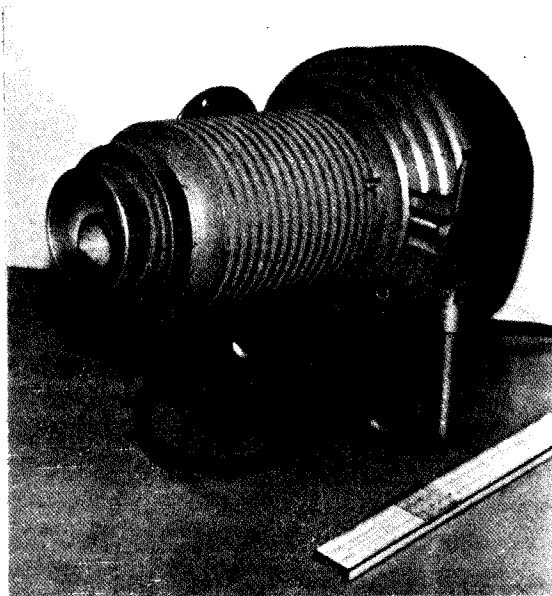


Фото 7. Осветитель НИКФИ для воспроизведения изображений голограмм

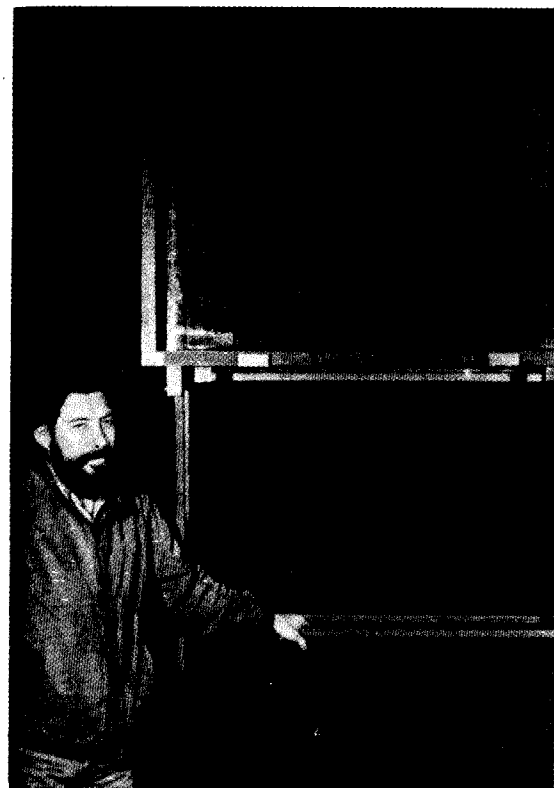


Фото 8. Голографический цветной экран

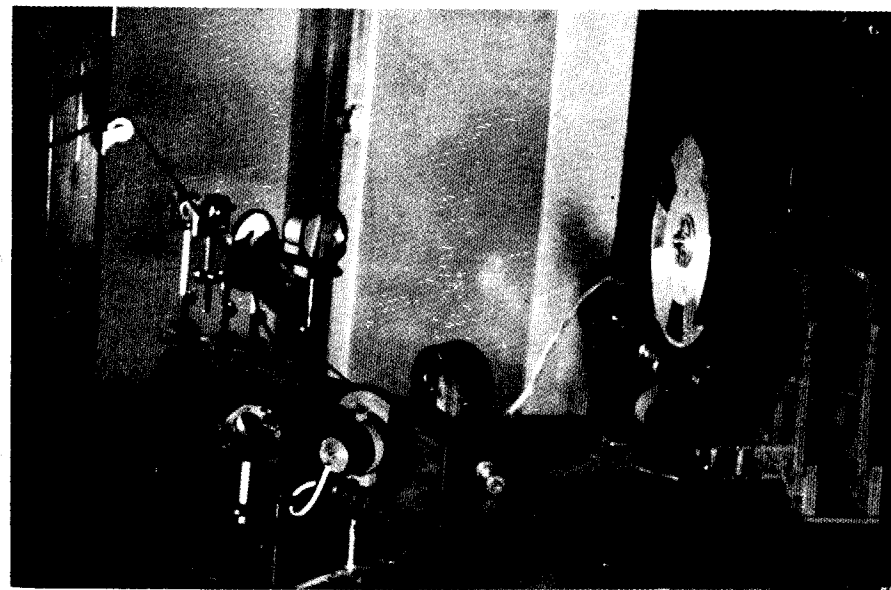


Фото 9. Голографический цветной кинопроектор

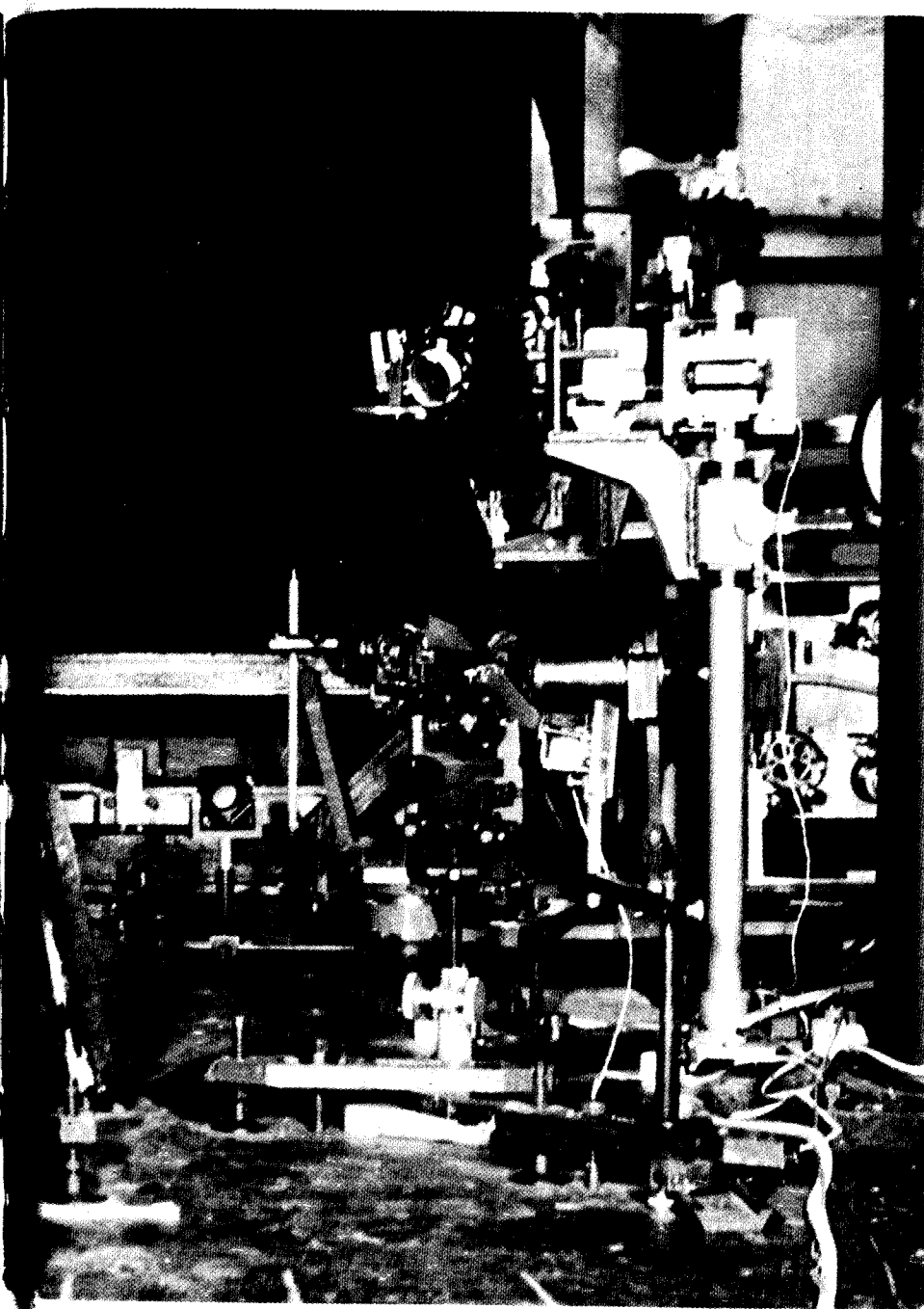


Фото 10. Съемочная площадка первого экспериментального голографического цветного мультипликационного фильма

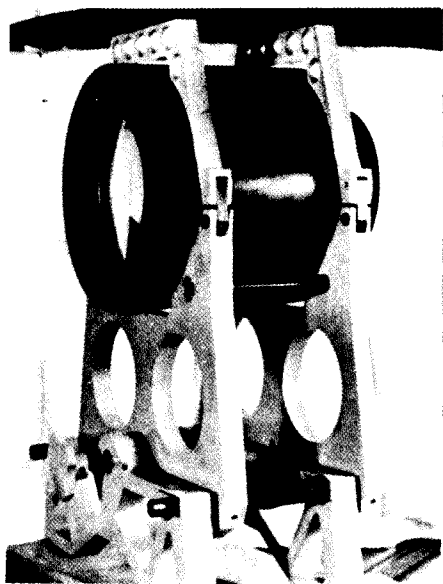


Фото 11. Кинопроекционный голографический объектив ОПГ-1 с диаметром зрачка 200 мм и фокусным расстоянием 250 мм

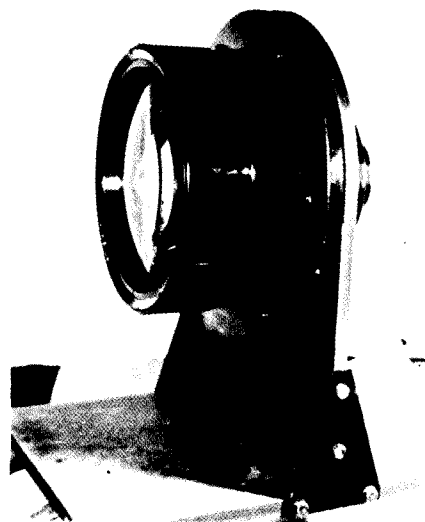


Фото 12. Объектив «Рейксар» с диаметром зрачка 200 мм и фокусным расстоянием 150 мм

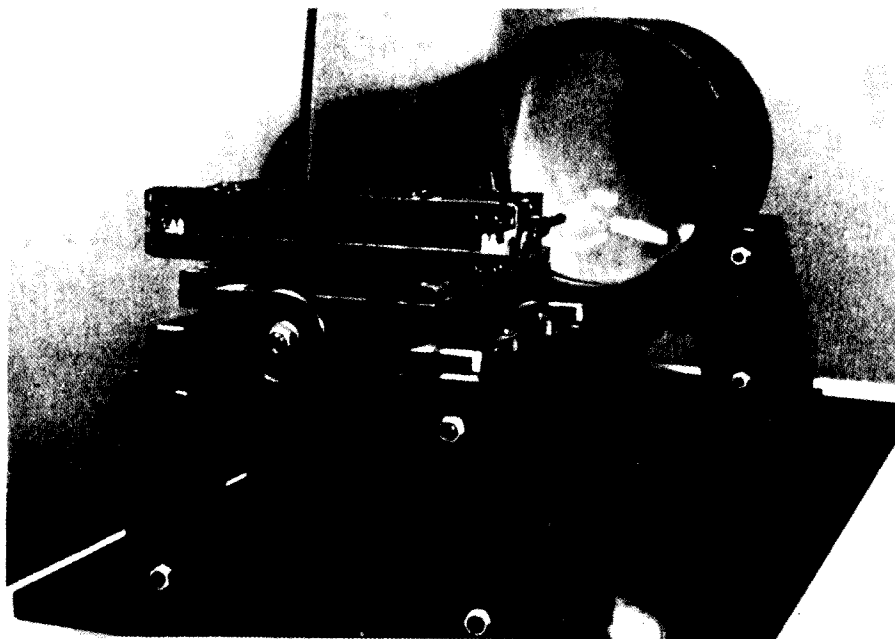


Фото 13. Блок оптического преобразования Фурье

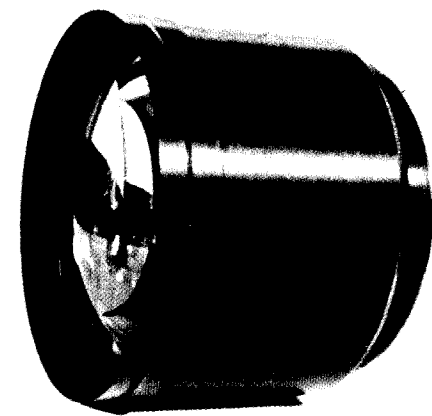


Фото 14. Киносъемочный голографический объектив ОКГ-2 с диаметром зрачка 200 мм и фокусным расстоянием 150 мм

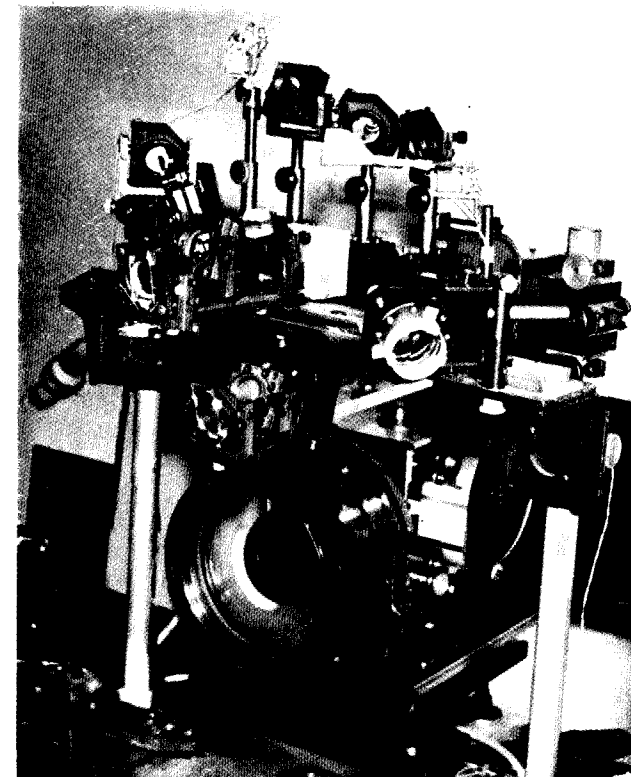


Фото 15. Оптическая система, формирующая освещение стены мультимплексационного экспериментального фильма

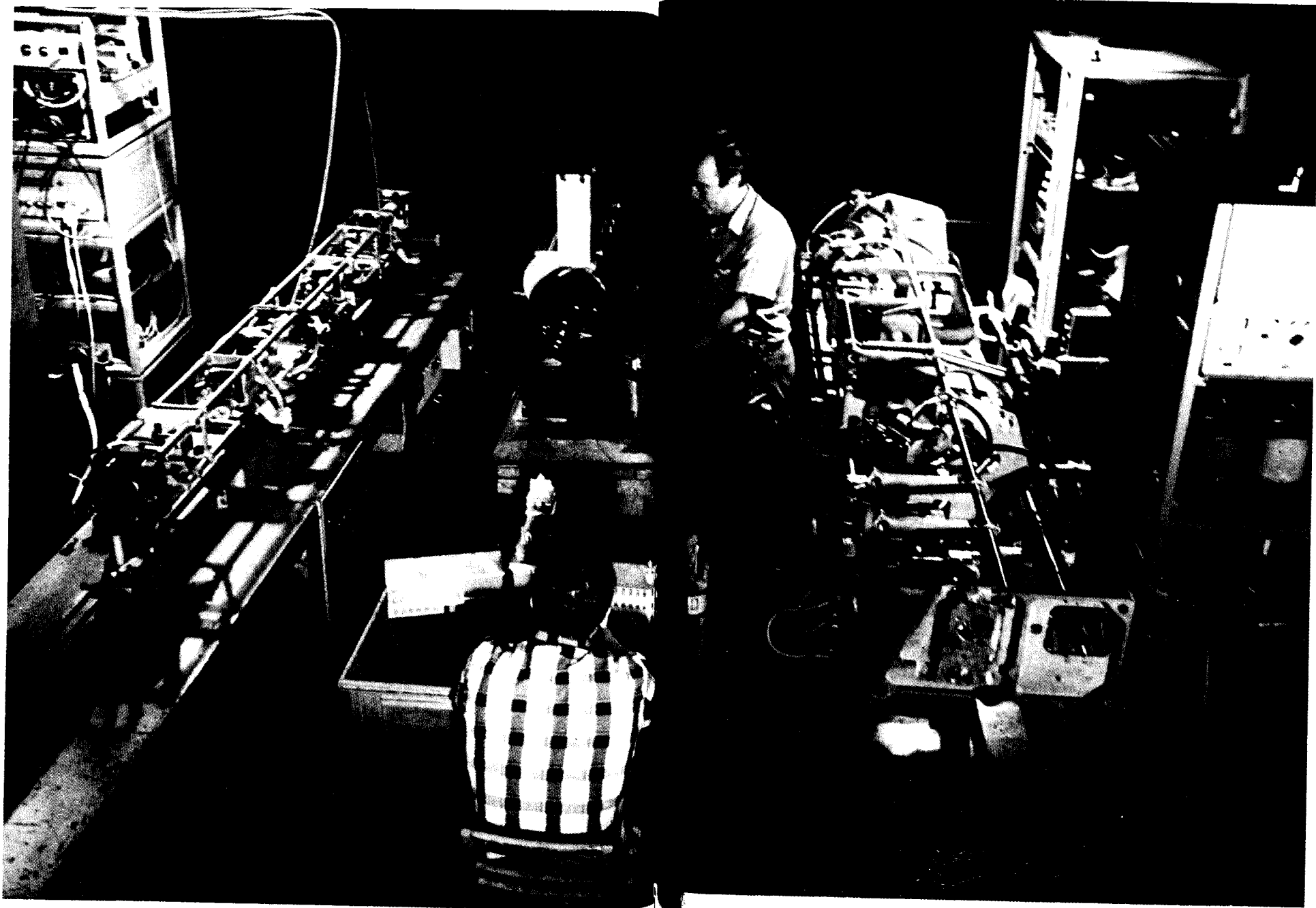


Фото 16. Установка для цветной импульсной голографической киносъемки. Слева — лазер на гранате; справа — лазер на рубине; в середине — съемочная голографическая кинокамера

Фото 18. Кадры импульсного
голографического фильма



Фото 17а. Кадры мультипликационного цветного голографического фильма

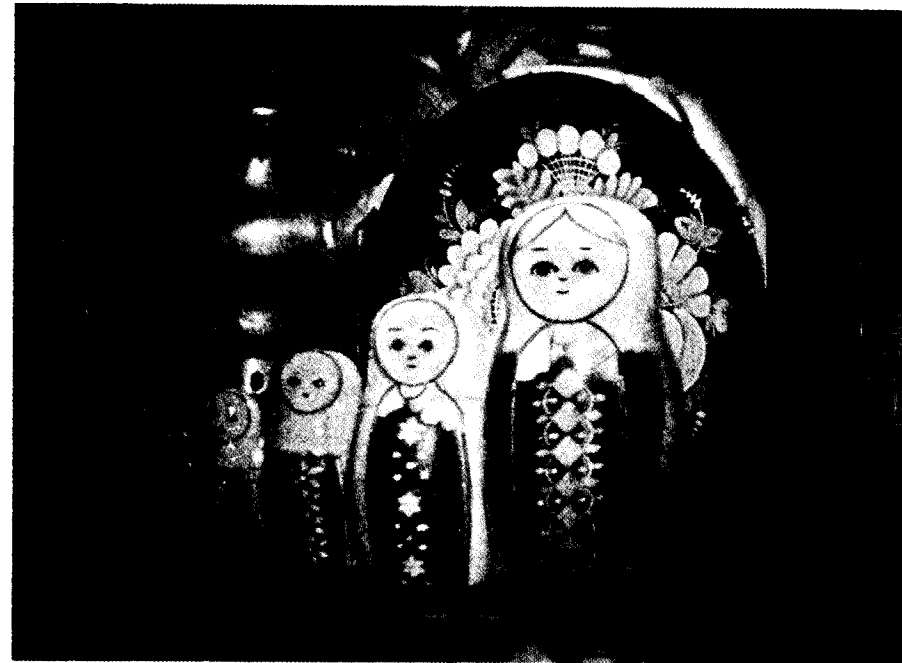


Фото 17б. Кадр из голографического цветного фильма

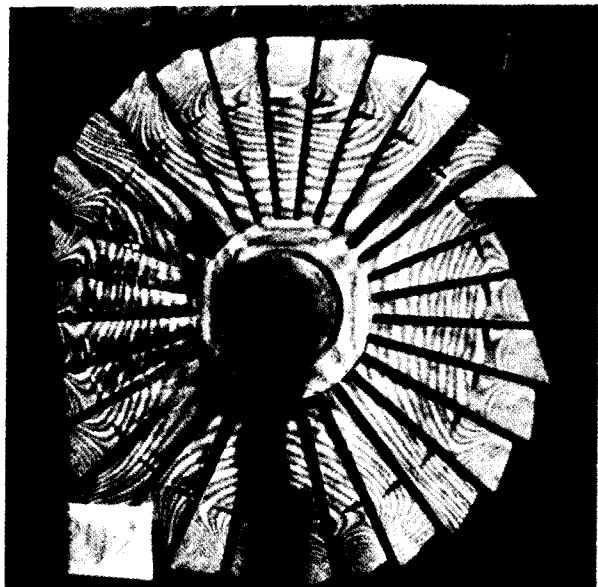


Фото 19. Киноголографическая интерферограмма вращающегося колеса турбины диаметром 1,5 м, полученная двухимпульсным методом



Фото 20. Киноголографическая интерферограмма вращающейся лопатки компрессора, полученная методом усреднения во времени

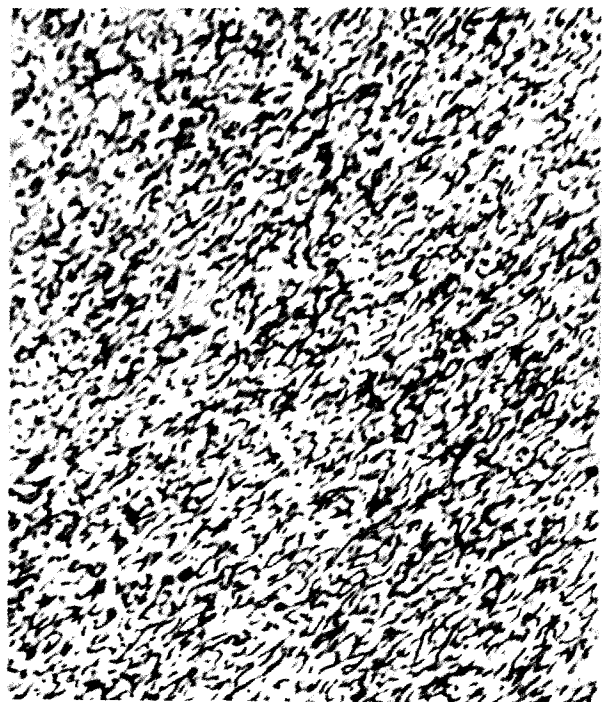


Фото 21. Спекл-шумы

Основное достоинство импульсной голографии — не требуется амортизированных голографических столов, так как длительности экспонирования составляют от десятков наносекунд до нескольких сотен микросекунд. Следовательно, снижаются требования к помещению для съемки. Становится возможным создание передвижных съемочных голографических установок для работы в нестационарных условиях — в музеях, на выставках. Снижаются требования к жесткости объектов съемки, появляется возможность съемки подвижных объектов, портретов людей.

В настоящее время для голографии можно использовать рубиновые лазеры, дающие темно-красное излучение. При восстановлении изображения даже с монохромной отражательной голограммы, снятой рубиновым лазером, искажается цветопередача, с искажениями передается контраст, возникают нарушения масштаба. Поэтому такими лазерами можно снимать только неглубокие объекты, для которых эти искажения несущественны. Для цветной съемки длина волны рубинового лазера непригодна. Отечественные импульсные лазеры на гранате существуют пока только в виде лабораторных образцов. Кроме того, отечественная промышленность еще не выпускает высококачественные заводские фотоматериалы для импульсной голографии.

К элементам оптической схемы предъявляются более жесткие требования по стойкости к мощному импульсному лазерному излучению. Например, точечная диафрагма легко разрушается мощным лазерным импульсом. Возможно использование в качестве диафрагм алмазных фильер, применяемых для протягивания металлической проволоки при ее производстве. Алмазная диафрагма, в отличие от металлической, слабо поглощает свет, но сильно рассеивает ту часть лучей света, которая нарушала бы гомоцентричность опорного пучка.

При весьма больших значениях мощности импульса лазерного излучения (единицы джоуля при продолжительности импульса в десятки наносекунд) сконцентрированный линзой лазерный пучок света в месте диафрагмы ионизирует воздух, что приводит к недопустимо сильному поглощению излучения. Чтобы устранить этот недостаток, в мощных импульсных установках применяют алмазные диафрагмы, которые размещают в вакуумных камерах, что исключает возможность ионизации воздуха. Однако широкого применения для получения изобразительных голограмм такие устройства пока не получили.

Требования к освещению объектов, предметных композиций и к художественным эффектам при импульсной съемке такие же, как и с лазерами непрерывного действия. Предпочтительнее многопучковая схема освещения с рассеивающей пластинкой, особенно для голографического портрета.

В будущем развитие импульсной изобразительной голографии, в том числе и цветной, зависит от создания специализированных лазеров, например на красителях, а также соответствующих фотоматериалов.

Копированную голограмму получают двумя этапами: сначала снимают голограмму-оригинал, а затем восстановленное лазерным светом изображение вторично голографируют. Схемы копирования приведены на рис. 14, 16 и 17. Процесс копирования позволяет тиражировать голограммы даже в том случае, когда нет возможности повторно работать непосредственно с объектом, например при съемке ценных музейных экспонатов. Кроме того, во время копирования можно добиться некоторого улучшения качества голограммы, а также изменить положение результирующего восстановленного изображения относительно самой голограммы: получить частично или полностью выступающее из голограммы «предэкранное» изображение.

Голограмма-оригинал должна иметь высокую дифракционную эффективность. Требования к уровню шума при монохромной голограмме несколько снижаются, поскольку копирование осуществляется в узком спектральном диапазоне лазерного излучения, а шум — широкополосный. Более жесткое требование предъявляется к правильному режиму экспонирования голограммы-оригинала и точной передачи градаций яркости, для чего необходимо работать на восходящем почти линейном участке экспозиционной характеристики (см. рис. 36), не переходя за максимум. В большинстве случаев при съемке голограмм, не предназначенных для копирования, можно работать на всем диапазоне экспозиционной характеристики, хотя при этом несколько искажается передача полутонов. При двукратном голографировании (оригинал — копия) линейность рабочей характеристики очень важна. Правильно экспонированная голограмма обычно более зашумлена для восстановления в белом свете, но при восстановлении лазерным светом одной длины волны уровень шума приемлем.

При изготовлении голограммы-оригинала необходимо соблюдать режим обработки и хранения таким, чтобы толщина фотоэмульсии оставалась постоянной от съемки оригинала до копирования, чтобы при дальнейшем копировании не возникали искажения, устраняемые при восстановлении изображения оригинала той же длиной волны, какая была использована при его записи.

Когда в качестве оригинала служит отражательная голограмма, эмульсионный слой защищают от воздействия влаги и от пыли обезвоженным черным нитролаком, который одновременно работает как противоореальное покрытие, уменьшающее переотражения и увеличивающее контраст. При копировании с пропускающей голограммы такая защита невозможна.

Лучше изготавливать голограмму-оригинал на тонкослойной эмульсии. Тогда угловая селективность уменьшается, требования к постоянству толщины слоя снижаются.

Особенно важно учитывать при процессе копирования поляризационные свойства света. Конечно, надо снимать под углами, опре-

деляемыми условиями воспроизведения. Но надо стараться использовать углы Брюстера при записи голограммы-оригинала, а следовательно, и при копировании. В. А. Ванин предложил в некоторых случаях делать прямую съемку под углом, удобным для освещения, а затем увеличивать толщину слоя голограммы для копирования под углом Брюстера.

Требования к освещающим пучкам следующие. Теоретически оптимальные результаты по точности передачи масштаба, резкости, градаций яркости должны получаться при копировании в сопряженных пучках, т. е. сходящихся, если при съемке оригинала использовали расходящиеся пучки. На практике удовлетворительное по шумам качество имеют и оригинал и копия, снятые в расходящихся пучках, когда легко «вычистить» пучок. Однако при этом ограничивается угол обзора голограммы. Лучше же всего голограмму-оригинал снимать в сходящемся пучке, а копировать сопряженным расходящимся. Хотя первый пучок трудно «вычистить», возникающие шумы в значительной мере не будут копироваться; а второй пучок «вычистить» просто. Ограничения по углу обзора в результате не будут.

Надо отметить еще один эффект. При копировании с пропускающей голограммы (см. рис. 17) можно использовать несколько меньшую фотопластинку, так как при освещении не образуется тени. При копировании с отражательной голограммы (см. рис. 16) образуются тени от рамы или края стекла и часть пластинки голограммы-копии оказывается нерабочей. Это приходится учитывать в процессе формирования композиции, размещения объектов и использования фона.

Все сказанное относится и к процессам копирования цветных голограмм, только требования к допустимому уровню шума ужесточаются, поскольку воспроизведение ведется белым светом.

1.4.4. Техника безопасности при изготовлении голограмм

Наряду с обычными правилами и нормами, связанными с предупреждением воздействия на человека электрического тока высокого напряжения, обеспечением требуемой санитарной вентиляции, принятием необходимых противопожарных мер, при изготовлении голограмм весьма важным является соблюдение санитарных норм и правил работы с лазерами.

По своей физической природе излучение лазеров, используемых при изготовлении голограмм, является электромагнитным излучением, спектр которого лежит в видимой части. Поэтому опасное воздействие лазерного излучения на человека имеет ту же физико-биологическую природу, что и других широко применяемых и постоянно встречающихся источников света.

Отсутствие в лазерном излучении ультрафиолетовой слагающей делает его в этом отношении менее опасным, чем солнечное излу-

чение и излучение ксенонных кинопроекторных ламп, широко применяемых для кинопроекции.

Однако лазеры, даже при сравнительно малых энергиях излучения, в результате фокусирования могут создавать на внешних и особенно на внутренних тканях человека, таких, как сетчатка глаза, опасные энергетические освещенности очень больших значений.

Опасное действие лазерного света зависит от интенсивности излучения и его длительности. Особенно высоких значений интенсивность лазерного излучения может достигать на сетчатке глаза вследствие фокусирующего действия хрусталика глаза. При этом энергетическая освещенность сетчатки зависит от углового размера зрачка, который в свою очередь определяется средней — фоновой — освещенностью роговицы глаза.

Количественно интенсивность излучения на облученной поверхности равна энергетической освещенности, т. е. отношению потока излучения, падающего на участок поверхности, к площади этого участка. При определении степени опасности лазерного облучения обычно пользуются понятием энергетической экспозиции — отношением энергии излучения, падающего на участок поверхности, к площади этого участка, т. е. энергетическую экспозицию определяют как произведение энергетической освещенности на длительность облучения.

Биологические эффекты воздействия лазерного излучения на организм зависят от энергетической экспозиции или энергетической освещенности, длительности импульса (продолжительности интервала непрерывного воздействия света), от биологических и физико-химических свойств облучаемых тканей и от длины волны света, что связано с различной степенью поглощения тканями организма излучений разной длины волны.

Биологические эффекты, возникающие при воздействии лазерного излучения на организм, делятся на две группы: 1) первичные эффекты — органические изменения, возникающие непосредственно в облучаемых тканях; 2) вторичные эффекты — неспецифические изменения, возникающие в организме в ответ на облучение.

Предельно допустимый уровень лазерного излучения в видимом диапазоне, не вызывающего первичных биологических эффектов, регламентируется действующими в СССР нормами и правилами, величиной энергетической экспозиции H_H на роговице глаза и определяется по следующей формуле:

$$H_H = H_1 k_1 k_2, \quad (I.14)$$

где H_1 — предельно допустимая энергетическая экспозиция на роговице глаза (Дж/см^2) в зависимости от длительности воздействия τ и углового размера α источника излучения по отношению к объекту при максимальном диаметре зрачка глаза определяется по табл. 14; k_1 — поправочный коэффициент на длину волны света λ и диаметр зрачка d_z , определяемый по табл. 15; k_2 — поправочный

Таблица 14

Энергетическая экспозиция H_1 на роговице глаза в зависимости от длительности воздействия τ и углового размера α источника излучения при максимальном диаметре зрачка глаза

Длительность воздействия τ , с	Угловой размер α (рад) источника излучения					
	до 10^{-3} точечный	от 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-3}$	от $5 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-2}	от 10^{-2} до $5 \cdot 10^{-2}$	от $5 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-1}	от 10^{-1} до 2,5
10^{-9}	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$
10^{-8}	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
10^{-7}	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
10^{-6}	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
10^{-5}	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$
10^{-4}	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
10^{-3}	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$
10^{-2}	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$
10^{-1}	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$
1	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$
10^1	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-1}$
10^2	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-1}$
10^3	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,6$
10^4	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$3,0$
$3 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$	$4,0$

Таблица 15

Поправочный коэффициент k_1 на длину волны λ лазерного излучения и диаметр зрачка глаза

Диаметр зрачка d_3 , см	Длина волны λ (мкм) лазерного излучения						
	от 0,40 до 0,42	от 0,42 до 0,45	от 0,45 до 0,9	от 0,9 до 1,1	от 1,1 до 1,2	от 1,2 до 1,3	от 1,30 до 1,4
0,8	2,3	1,4	0,8	1,0	2,3	7,0	23
0,7	3,0	1,8	1,0	1,3	3,0	9,1	30
0,6	4,1	2,5	1,4	1,8	4,1	13	41
0,5	6,0	3,6	2,1	2,6	6,0	18	60
0,4	9,2	5,6	3,2	4,0	9,2	28	92
0,3	16	9,9	5,7	7,1	16	50	160
0,2	37	22	13	16	37	110	370

Зависимость диаметра зрачка d_3 от фоновой Φ_p освещенности роговицы

Φ_p , лк $1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$	8	$1 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
d_3 , см 0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2

Таблица 16

Поправочный коэффициент k_2 на частоту повторения импульсов f и длительность воздействия серии импульсов t

Длительность воздействия t , с	Частота повторения импульсов f , Гц					
	до 10	от 10 до 50	от 50 до 100	от 100 до 250	от 250 до 500	от 500 до 1000
10^{-1}	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
1	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
10^1	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$9,2 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
10^2	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
10^3	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
10^4	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

коэффициент на частоту повторения импульсов f и на длительность воздействия серии импульсов t , определяемый по табл. 16.

Предельно допустимый уровень лазерного излучения на роговице глаза (в видимом диапазоне), не вызывающего вторичных биологических эффектов H_b , определяется по следующей формуле:

$$H_b = H_2 \Phi_p 10^{-1}, \quad (I.15)$$

где H_2 — энергетическая экспозиция на роговице глаза (Дж/см^2) в зависимости от длины волны излучения λ и диаметра зрачка глаза d_3 , определяемая по табл. 16; Φ_p — фоновая освещенность рого-

вицы глаза (лк); f — частота повторения импульсов (Гц); t — длительность воздействия (с).

Согласно табл. 14 предельно допустимая энергетическая экспозиция на роговице глаза для углового размера источника излучения $\alpha < 10^{-3}$ рад при максимальном диаметре зрачка глаза, при длительности воздействия импульса лазерного излучения $\tau = 10^{-7}$ с равна $H_1 = 7,1 \cdot 10^{-6}$ Дж/см^2 .

При прямом падении на глаз лучей импульсного рубинового лазера при энергии 1 Дж, диаметре светового лазерного пучка 1 см, длительности импульса 10^{-7} с энергетическая экспозиция на роговице глаза достигает $H = 1,27$ Дж/см^2 , что является совершенно недопустимым по условиям техники безопасности.

Опасно также прямое попадание лазерного света в глаза человека и после того, как пучок света, вышедший из лазера, расширен линзой. Если для приведенного примера диаметр светового пучка лазера будет увеличен от 1 см до 3 м, т. е. приблизительно в 10^5 раз по сечению, то и в этом случае энергетическая экспозиция на роговице глаза будет достигать $H = 1,41 \cdot 10^{-5}$ Дж/см^2 , т. е. еще будет превышать допустимый уровень.

При голографических съемках людей допустимо освещение их только рассеянным лазерным светом. Для получения такого рассеянного света можно применять мелкоструктурные линзовые растрсы, матовые и молочные стекла, диффузно отражающие свет пластинки, голографические рассеивающие пластинки.

При достаточно больших (по отношению к объектам съемки) угловых размерах элементов осветительных лазерных устройств, рассеивающих свет, можно обеспечить уровень энергетической экспозиции ниже предельно допустимого значения. Например, в рассмотренном случае рубинового лазера с длительностью импульса $\tau = 10^{-7}$ с при угловом размере диффузно рассеивающего свет выходного элемента осветительного устройства $\alpha = 0,2$ рад, при фоновой освещенности $\Phi_p = 100$ лк, частоте съемки $f = 25$ Гц, длительности воздействия $t = 100$ с величины, входящие в формулы (I.14) и (I.15), имеют следующие значения согласно табл. 14, 15, 16:

$$H_1 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/см}^2; \quad d_3 = 0,5 \text{ см}; \quad k_1 = 2,1;$$

$$k_2 = 4,6 \cdot 10^{-2};$$

$$H_2 = 9,9 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/см}^2.$$

Для указанных значений предельно допустимые значения энергетической экспозиции равны:

$$H_{\pi} = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 4,6 \cdot 10^{-2} = 2,03 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/см}^2,$$

для вторичных биологических эффектов:

$$H_b = 9,9 \cdot 10^{-2} \cdot 100 \cdot 0,1 = 0,99 \text{ Дж/см}^2.$$

Полученные значения предельно допустимых уровней энергетической экспозиции значительно превышают фактический уровень

энергетической экспозиции в приведенном примере киносъемки рубиновым лазером с энергией импульса 1 Дж и диаметром светового пучка на объекте съемки 3 м. При этом энергетическая экспозиция на объекте $H=0,141$ Дж/м² соответствует следующему значению энергетической экспозиции на киноплёнке. Примем равными: коэффициент пропускания света съёмочным объективом $k_L=0,8$; коэффициент отражения света поверхностью снимаемого объекта $\rho=0,8$; относительное отверстие съёмочного объектива $\epsilon=\frac{1}{0,75}$; коэффициент равномерности освещения снимаемой сцены $k_Q=1$. Тогда по формуле (II.224) энергетическая экспозиция на голографической киноплёнке (ее объектная часть) равна:

$$H_s = \frac{0,141 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \left(\frac{1}{0,75}\right)^2 10^3}{4 \cdot 1} = 40,1 \text{ эрг/см}^2.$$

Следует отметить, что указанное в данном примере значение энергетической экспозиции на киноплёнке соответствует уже достигнутым значениям чувствительности разрабатываемых голографических киносъёмочных плёнок, определяемой по объектной слагающей экспозиции.

Строгое соблюдение правил техники безопасности необходимо не только при работе с лазерами импульсного действия, но также и с лазерами непрерывного действия. Например, если длительность воздействия света аргонового лазера при длине волны света $\lambda=0,514$ мкм достигает $\tau=0,1$ с, а угловой размер источника излучения $\alpha < 10^{-3}$ рад, то, согласно табл. 14, предельно допустимая энергетическая экспозиция составляет $H_1=2,2 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² для максимального значения диаметра зрачка глаза ($d_3=0,7$ см).

При прямом попадании в глаз света аргонового лазера при мощности излучения 6 Вт, диаметре светового пучка 7 мм, длительности облучения 0,1 с энергетическая экспозиция роговицы глаза достигает $H_1=160$ Дж/см², что совершенно недопустимо по условиям техники безопасности.

В случае расширения светового пучка до диаметра 1 м энергетическая экспозиция роговицы глаза снижается примерно в $2 \cdot 10^4$ раз и становится равной $H=7,84 \cdot 10^{-3}$ Дж/см², что также превышает предельно допустимый уровень.

Лазеры непрерывного действия не применяют для съемки живых предметов. Однако важно иметь в виду, что если в пучке лазерного света с высокой плотностью энергии излучения окажется предмет с зеркально отражающей поверхностью, то отражающиеся от него лучи будут также опасны для глаз обслуживающего персонала.

В связи с изложенным при изготовлении голограмм для предотвращения неблагоприятного воздействия лазерного излучения на человека необходимо соблюдать следующие меры предосторожности:

1) исключить возможность попадания в глаза лучей лазера, прямых и отраженных от зеркальных поверхностей;

2) производить настройку и юстировку лазерных устройств при минимальной энергии излучения лазера; при этом необходимо использовать очки с защитными стеклами, поглощающими основное излучение лазера (марки стекол, используемые в противолазерных очках, даны в табл. 17);

Таблица 17

Марки стекол, рекомендуемые для использования в противолазерных очках

Длина волны, мкм	0,48—0,51	0,53	0,69	0,89	1,06
Марки стекла, ГОСТ 9411-75	ОС-12 ОС-13 ОС-23-1	ОС-12 ОС-13 ОС-23-1	СЗС-21 СЗС-22	СЗС-21 СЗС-22	СЗС-21 СЗС-22 СЗС-24

3) детали установки, стены, потолок должны быть окрашены темной матовой краской;

4) работу следует производить по возможности при хорошем освещении помещения, так как при этом происходит уменьшение диаметра зрачка глаза;

5) при длительной работе с мощными лазерами необходимо проветривать помещение.

К работе на установках по изготовлению голограмм допускаются лица в возрасте не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр и получившие инструктаж по технике безопасности. Лица, работающие на установках по изготовлению голограмм, должны регулярно осматриваться у окулистов.

1.4.5. Техника воспроизведения голографических изображений

Демонстрирование изобразительных голограмм должно обеспечивать комфортность и естественность восприятия зрителем. Это достигается учетом тех требований, которые определяются условиями воспроизведения.

Качество изображения хорошей голограммы (без видимых дефектов, с высокой яркостью, малым уровнем шумов, с правильно расположенными и освещенными при съемке объектами) определяется параметрами восстанавливающего источника света: длиной волны и спектром излучения, формой пучка, интенсивностью, а также правильным взаимным расположением источника света и голограммы.

Толстослойная голограмма теоретически свободна от хроматизма вследствие спектральной селективности. Практически это пол-

ностью не выполняется, так как голограмма обычно недостаточно толстая. Кроме того, в пограничных слоях эмульсия-стекло и эмульсия-воздух всегда записывается тонкая дифракционная решетка, а на границе эмульсия-воздух еще и рельефная решетка. Эти решетки не имеют спектральной селективности, и хроматизм в результате дифракции на них составляет порядка 1%. Разноцветные изображения, восстанавливаемые тонкими решетками, накладываются на изображение толстослойной голограммы, обуславливая его хроматизм, для устранения которого применяют светофильтры.

В качестве источников света для воспроизведения глубоких монохромных изображений с отражательной голограммы целесообразно использовать ртутные лампы с конденсорной оптикой или просто линзой и с оранжевым фильтром, пропускающим линию 0,578 мкм. Эти лампы имеют малое тело свечения, большую яркость и линейчатый спектр. Для неглубоких объектов пригодны лампы накаливания (см. раздел 1.2.6). Часто используют свет от диaproектора.

Для воспроизведения цветных изображений необходим источник белого света с непрерывным или линейчатым спектром с требуемым набором линий.

Один из важных факторов, определяющих качество изображения,— шум голограммы, обусловленный рассеянием света в фотослое по разным причинам. Шум в виде вуали снижает контраст изображения и воспринимается как неприятная дымка в объеме изображаемого пространства. Правильно выбранный спектральный состав света может несколько уменьшить этот эффект, так как изображение строится только узкой полосой спектра восстанавливающего источника, а шум не имеет свойств спектральной селективности. С этой точки зрения также более удобен линейчатый спектр и полезно применить оранжевый светофильтр, устраняющий зеленую и синюю части спектра. При изготовлении цветных голограмм предъявляются гораздо более жесткие требования к допустимому уровню шума, потому что для восстановления цветного изображения используют источник света с широким спектром. Можно ставить узкополосные фильтры, формирующие линейчатый спектр, соответствующий спектральным линиям записи.

Все, что сказано относительно расположения источника, справедливо и для пропускающей голограммы. Однако для ее восстановления требуется источник света с высокой монохроматичностью, в том числе лазер. При использовании последнего приходится применять дополнительные средства, разрушающие присущий лазерному излучению пятнистый шум, или спеклы.

Выше были определены условия правильного восстановления голографических изображений (см. раздел 1.1.2). Большинство объектов в естественных условиях освещается сверху. Поэтому при рассматривании голографического изображения объекта он воспринимается также естественно, когда тени и блики на нем зарегистрированы в процессе освещения при съемке сверху под острым углом. Подходящими являются углы, близкие к углу Брюстера. Восстанов-

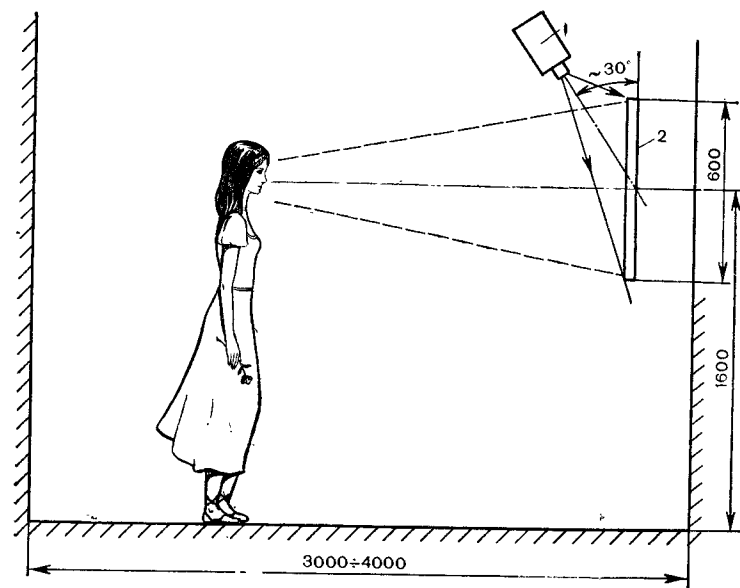


Рис. 50. Схема размещения голограммы на выставке при ее вертикальном положении: 1 — осветитель; 2 — голограмма

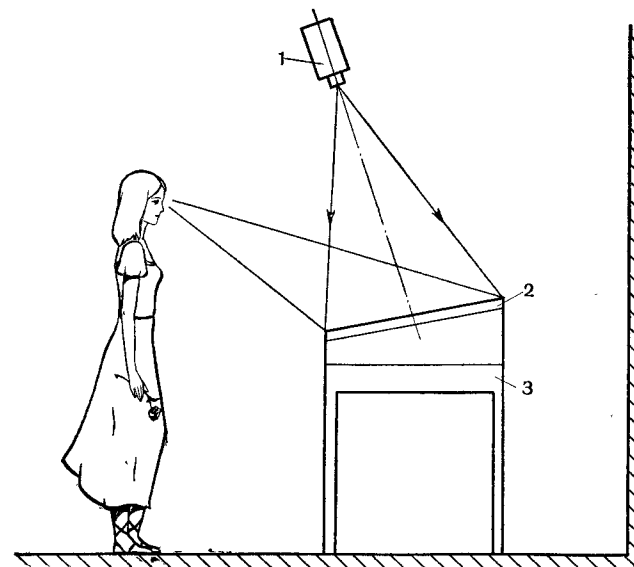


Рис. 51. Схема размещения голограммы при ее горизонтальном положении: 1 — осветитель; 2 — голограмма; 3 — демонстрационный стенд

ливающий источник при этом может быть укреплен на потолке, на стене высоко под потолком, на специальной стойке или в подвесе. Восстанавливающий пучок, падающий на голограмму, не должен перекрываться головой или корпусом зрителя, который может подойти близко к голограмме для рассматривания мелких деталей предметов, особенно произведений искусства (рис. 50 и 51). Горизонтальное или вертикальное положения голограммы определяются ее содержанием и являются такими же, как при съемке. При установке света необходимо учитывать блик от стекла, для уменьшения которого в случае угла Брюстера можно применить поляризованный свет, полученный с помощью поляроидной пленки. Освещение снизу или сбоку в общем случае исключено, так как не дает возможности подойти к голограмме и избежать блика.

В изобразительной голографии в качестве осветительных приборов для восстановления монохромных изображений с большой глубиной нашли применение серийные театральные прожекторы типа ПУФ-500 с ртутными лампами ДРШ-500 (тело свечения размером 4,5 мм) и конденсорной линзой. Для выделения оранжевой линии в специальную рамку устанавливают пленочный светофильтр. Предусмотрена некоторая возможность фокусирования; прибор удобен для освещения сверху под острым углом. Имеется более новая модель подобного осветителя типа ПРТЛ-500 также с лампой ДРШ-500. Эти осветители обеспечивают высокую четкость изображения глубиной более 0,5 м.

В НИКФИ разработан и изготовлен специальный осветитель для восстановления изобразительных голограмм с лампой ДРШ-250-2, имеющей наименьший размер светящегося тела среди серийных ламп такого типа (0,8 мм) при достаточно высоком световом потоке. Осветитель имеет оптическую схему (рис. 52), состоящую из трехлинзового конденсора из кварцевого стекла (для предупреждения растрескивания от нагрева) и двухлинзового объектива, обеспечивающих малые сферические aberrации. Оптическая система фокусирует изображение светящегося тела источника в плоскость ди-

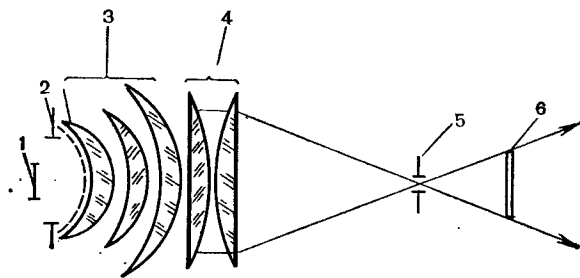


Рис. 52. Оптическая схема осветителя НИКФИ для восстановления изобразительных голограмм: 1 — лампа ДРШ-250-2; 2 — полевая диафрагма с защитной сеткой; 3 — трехлинзовый конденсор из кварцевого стекла марки КУ-2; 4 — двухлинзовый объектив из стекла ТФ-5; 5 — диафрагма; 6 — сменный светофильтр

афрагмы размером 1,6 мм, назначение которой — улучшать гомотричность пучка и спектральный состав, отсекая тепловое красное излучение раскаленных электродов и рассеянное излучение. Выделение зеленой линии (0,546 мкм) или оранжевой (0,578 мкм) осуществляется набором сменных стеклянных светофильтров (для зеленой линии комплект ОС-11, ПС-7 и СЗС-2, для оранжевой — ОС-13 и ЗС-7). Угол охвата конденсора осветителя 1,7 стеррад. Осветитель имеет герметичный корпус, обеспечивающий защиту от озона, образующегося в помещении от УФ излучения лампы, и выступающие ребра для конвекционного охлаждения, а также снабжен поворотной турелью для настройки угла оптической оси излучения. В конструкции предусмотрена сетка для защиты линз конденсора в случае взрыва лампы ДРШ-250-2. Общий вид осветителя приведен на фото 7. Часть выставки изобразительных голограмм показана на фото 5.

Изобразительные голограммы все больше находят применение в экспозициях музеев, на различных выставках для демонстрации самих принципов и возможностей голографии. Будучи средством максимально достоверного копирования произведений искусства, исторических ценностей, разного рода реликвий, голографические выставки имеют право на самостоятельное существование. Имеющийся в НИКФИ опыт стационарных и передвижных тематических голографических выставок показал, что изобразительные голограммы вызывают у зрителя неослабевающий интерес, обусловленный как реалистичностью восприятия, так и познавательной ценностью экспозиций. Следует развивать это направление голографии, используя новые ее достижения, например в области передачи цвета, необходимо создавать технические средства для съемки и демонстрирования голограмм.

Помимо того, наряду с задачей достоверного копирования произведений искусства, уже созданных мастерами, изобразительная голография развивается как самостоятельная область художественного творчества, позволяющая создавать пространственные цветные композиции, обладающие большой силой эмоционального воздействия на зрителя. За рубежом имеется опыт таких работ. В них заняты известные скульпторы-голографисты, художники-голографисты, владеющие голографической техникой и обладающие индивидуальными творческими возможностями.

Как известно, сущностью кинематографического процесса и его отличительными особенностями являются регистрация и воспроизведение изображений движущихся предметов и развивающихся во времени явлений, что определяет общий характер технических средств того или иного вида кинематографа: художественного, учебного, информационного, пропагандистского или исследовательского.

Главными задачами кинематографической науки и техники являются, во-первых, поиск и создание способов передачи новых признаков предметов, что служит основой новых систем кинематографа, обладающих большими художественно-выразительными возможностями или же позволяющих более эффективно исследовать и совершенствовать различные процессы; во-вторых, изыскание и разработка путей устранения искажений в передаче отдельных признаков предметов, уменьшение неправильных сочетаний этих признаков для улучшения качества изображения; в-третьих, изыскание и разработка путей получения заданной передачи информации с выделением тех признаков предметов, которые должны усиливать восприятие и с ослаблением других признаков, мешающих восприятию или затрудняющих выполнение исследования.

В свете указанных задач создание голографического кинематографа с регистрацией и воспроизведением трехмерных изображений представляет собой весьма актуальную проблему для ускорения научно-технического прогресса во многих важных отраслях науки, культуры и промышленности.

Среди большого числа предложений по созданию голографического кинематографа в книге рассматриваются принципы, разработанные и впервые экспериментально проверенные в НИКФИ в 1976 г., в основе которых лежат следующие четыре идеи. Во-первых, для киносъемки и кинопроекции трехмерных голографических изображений используют объективы с широким зрачком (около 200 мм), позволяющим зарегистрировать на голографической киноплёнке множество изображений снимаемого объекта, каждое из которых отличается ракурсом, соответствующим определенной точке, расположенной в том или ином месте зрачка объектива. Широкий зрачок позволяет при кинопроекции воспроизвести множество изображений объекта в разных ракурсах, которые сливаются в единое трехмерное изображение. Трехмерное изображение снимаемой сцены уменьшается съёмочным объективом до размеров кадра на плёнке. При кинопроекции голографическое изображение, воспроизводимое голограммой-кадром фильма, увеличивается проекционным объективом до размеров, соответствующих размерам снятой сцены.

Во-вторых, для кинопроекции трехмерных голографических изображений используют точечно-фокусирующий множительный го-

лографический экран. При проекции объемного изображения на такой экран оно фокусируется в пространстве и размножается по числу зрительных зон; зрители, находящиеся в пределах этих зон, видят одновременно проецируемое одинаковое трехмерное изображение.

В-третьих, для съемки и копирования трехмерных голографических киноизображений применяют голографические киноплёнки со сравнительно толстым эмульсионным слоем (более 10 мкм). При этом голограммы обладают угловой и спектральной селективностью, что позволяет независимо друг от друга воспроизводить цветоделенные составляющие цветного изображения (синюю, зеленую и красную) с правильной передачей цвета и без ложных изображений.

В-четвертых, сочетание двух методов съемки. В первом — для киносъемки в помещении применяют лазерный когерентный свет; во втором — обычный некогерентный свет, когда киносъемку производят вне помещения. В этом случае в киносъёмочном аппарате размещают линзовый растр — пластинку, состоящую из матрицы малых линз. Трехмерное цветное многоракурсное изображение регистрируется на цветной киноплёнке, а затем воспроизводится с помощью такого же растра и переводится в голографическое изображение. Кинокадры, снятые первым методом с помощью лазеров и вторым методом в обычном свете с помощью растра, включают в единый голографический кинофильм.

Системы голографического объемного кинематографа, разрабатываемые на основе указанных принципов, можно разделить на два основных класса:

- 1) системы первого класса с передачей множества ракурсов изображения по горизонтали и вертикали;
- 2) системы второго класса с передачей множества ракурсов только по горизонтали.

Системы первого класса имеют преимущество полной передачи объема, и ракурс изображения при изменении положения зрителя меняется как при горизонтальных, так и при вертикальных смещениях глаз зрителя, т. е. точно так же, как для реальных объектов. Однако это преимущество иногда не реализуется. Например, если зритель сидит в кинозале, то более характерными являются горизонтальные, а не вертикальные перемещения его головы.

Системы второго класса несколько более просты и экономичны по техническому решению, имеют меньшие размеры и массу съёмочной аппаратуры и плёнки.

Системы голографического кинематографа каждого класса в свою очередь можно разделить на два основных вида:

- 1) системы с квазисфокусированными голограммами, в которых регистрируемое голографическое изображение формируется вблизи плёнки;
- 2) системы с квази-Фурье голограммами, в которых каждый элемент изображения формируется на большом расстоянии от плёнки и регистрируется почти всей поверхностью голограммы-кадра.

Системы второго класса с передачей только горизонтальных ракурсов могут быть осуществлены так же, как системы смешанного вида, в которых в горизонтальной плоскости регистрируются квазисфокусированные голограммы, а в вертикальной — квази-Фурье голограммы.

Термины «квазисфокусированная голограмма» и «квази-Фурье голограмма» применены в том смысле, что точное фокусирование или точное оптическое преобразование Фурье в плоскости пленки возможно только для плоских изображений. В случае трехмерных изображений термин «квази» означает, что указанные оптические процессы выполняются только для главных плоскостей трехмерных изображений.

Преимущество систем первого вида с квазисфокусированными голограммами заключается в полной передаче объема с большой глубиной резкости, возможности использования для восстановления вместо лазеров более простых и экономичных источников света — газоразрядных ламп с линейчатым спектром излучения, не создающих интерференционной зернистости изображения.

Преимущество систем второго вида с квази-Фурье голограммами заключается в возможности непрерывного движения пленки во время кинопроекции.

Смешанные системы первого и второго вида могут сочетать преимущества как первых, так и вторых систем.

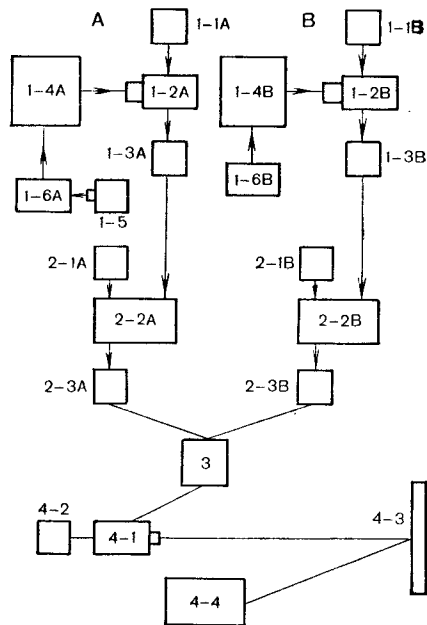


Рис. 53. Блок-диаграмма системы голографического кинематографа

Кроме указанных классов и видов систем голографического кинематографа целесообразно разделение на системы с цветным и монохромным изображением. В зависимости от назначения может оказаться рациональнее использовать систему того или иного класса или вида.

На рис. 53 показана блок-диаграмма системы голографического кинематографа, предназначенной для кинотеатрального применения. Здесь А — ветвь, соответствующая киносъемке в когерентном свете; В — ветвь, соответствующая киносъемке в обычном некогерентном свете; 1-1А — первичная голографическая киноплёнка; 1-1В — обрабатываемая киноплёнка; 1-2А и 1-2В — киносъёмочные аппараты; 1-3А — первичный голографический фильм (голограмма — фильм — оригинал); 1-3В — фильм, снятый на обрабатываемую плёнку; 1-4А и 1-4В — снимаемые сцены; 1-5 — лазер; 1-6А и 1-6В — осветительные устройства; 2-1А и 2-1В — вторичная голографическая киноплёнка (предназначенная для копирования); 2-2А и 2-2В — копировальные аппараты; 2-3А и 2-3В — вторичные голографические фильмы (голограммы — фильмы — копии); 3 — смонтированный фильм; 4-1 — кинопроектор; 4-2 — источник света; 4-3 — голографический экран; 4-4 — зрительские места.

1.5.1. Съёмка голографических фильмов

На рис. 54 показана схема съёмки голографического кинофильма с регистрацией на голографической плёнке трехмерного цветного квазисфокусированного изображения с множеством ракурсов по горизонтали и вертикали. Свет от лазеров трех длин волн 1 направляется в устройства 4 формирования освещающего пучка 5. Свет, отраженный от объекта 6, проходит через киносъёмочный объектив 7, имеющий диаметр зрачка около 200 мм. Объектив формирует трехмерное уменьшенное изображение 8 вблизи голографической киноплёнки 9, на которой оно регистрируется. Система светоделительных пластинок 2, зеркал 3 и других оптических элементов (например, расширительных линз 10) строит опорные пучки 11 от всех лазеров. Плёнка в киносъёмочном аппарате движется прерывисто. В каждом кадре на голографической плёнке регистрируется интерференционная картина, которая после обработки образует голограммную структуру в виде микроскопических полос с различными значениями показателя преломления света.

На рис. 55 показана схема съёмки голографического кинофильма с регистрацией на голографической киноплёнке трехмерного цветного квазисфокусированного изображения с множеством только горизонтальных ракурсов. Эта схема отличается от предыдущей тем, что съёмочный объектив 6 при ширине зрачка около 200 мм имеет малую высоту (около 20 мм) и на плёнке 9 регистрируется практически только один вертикальный ракурс объекта 5. На одной оси со съёмочным объективом расположена оптическая насадка 7 с цилиндрическими линзами, которая дополнительно сильно уменьшает высоту изображения 8, что дает экономию плёнки. В осталь-

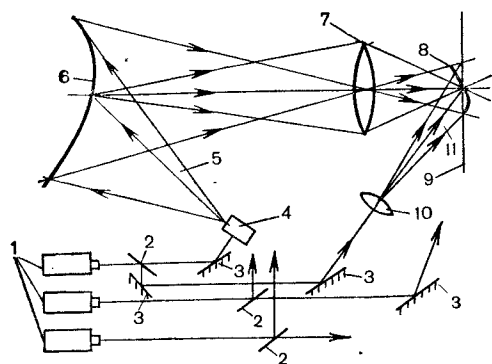


Рис. 54. Схема съемки голографического кинофильма с регистрацией трехмерного цветного квазисфокусированного изображения

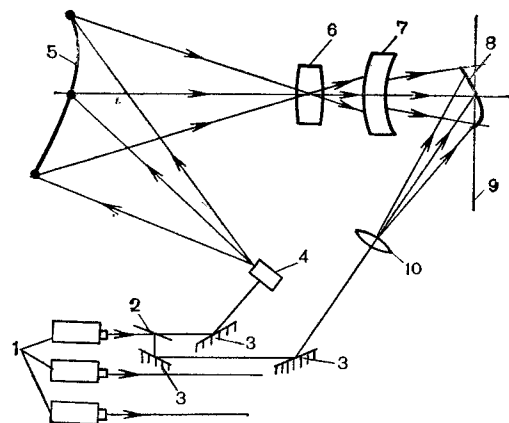


Рис. 55. Схема съемки голографического кинофильма с регистрацией трехмерного цветного квазисфокусированного изображения с множеством только горизонтальных ракурсов

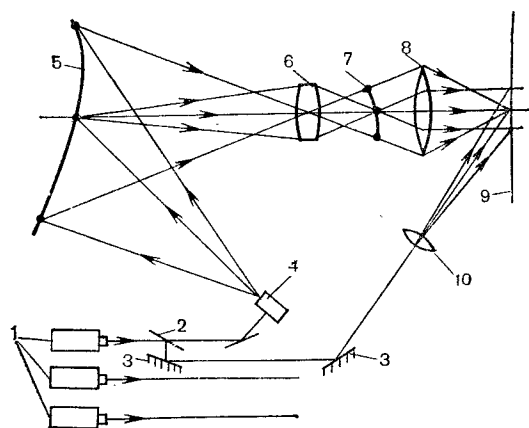


Рис. 56. Схема съемки голографического фильма с регистрацией голограмм Фурье с множеством ракурсов по горизонтали

ном принцип съемки по схеме рис. 55 такой же, как и по схеме рис. 54.

На рис. 56 показана схема съемки цветного голографического фильма с регистрацией на пленке голограмм Фурье с множеством ракурсов по горизонтали. Освещение объекта аналогично предыдущим случаям. Отраженный от объекта свет проходит через кино съемочный объектив 6, имеющий большую ширину зрачка (около 200 мм) и малую высоту (около 5—10 мм).

Объектив 6 формирует уменьшенное изображение 7 объекта 5 вблизи фокальной плоскости объектива 8, осуществляющего оптическое преобразование Фурье и выполняющего еще вторую функцию — фокусирование изображения зрачка съемочного объектива 6 на голографической пленке 9 в виде узкой полоски шириной около 50 мм и высотой около 1—2 мм. Киносъемку производят кадр за кадром.

На рис. 57 показана схема съемки голографического фильма с регистрацией только горизонтальных ракурсов изображения и с получением в горизонтальных плоскостях сфокусированных голограмм, а в вертикальных плоскостях — голограмм Фурье. Схема освещения объекта 5 аналогична предыдущим. Киносъемочный объектив 6 имеет также большую ширину и малую высоту зрачка. В отличие от схемы рис. 56 объектив оптического преобразования Фурье 7 вместо сферических имеет цилиндрические линзы; оптическое преобразование Фурье производится только в вертикальных плоскостях. Уменьшенное по горизонтали изображение 8 формируется вблизи пленки 9. Киносъемку производят так же — кадр за кадром. Схема с преобразованием Фурье только по вертикали отличается более простой и компактной цилиндрической оптикой по сравнению со схемой рис. 56, в которой преобразование Фурье производится как по вертикали, так и по горизонтали.

На рис. 58 показана схема съемки кинофильма с трехмерным изображением, полученным растровым методом в некогерентном свете на цветную кинопленку обычной структуры. При этом регистрируется множество ракурсов изображения только по горизонтали. На этой схеме свет, отраженный от объекта 1, проходит через кино съемочный объектив 2, имеющий большую ширину и малую высоту зрачка и содержащий как сферические, так и цилиндрические линзы, благодаря чему он имеет более длинное фокусное расстояние по горизонтали, чем по вертикали.

Лучи света, выходящие из объектива 2, проходят через растр 3, состоящий из большого числа вертикально расположенных вплотную друг к другу цилиндрических линз. Параметры объектива 2 и растра 3, а также их положение по отношению к пленке выбирают таким образом, что каждый малый элемент изображения поверхности главной плоскости снимаемого объекта точно фокусируется на пленке 4 как в горизонтальных, так и вертикальных плоскостях. При этом каждый малый элемент изображения поверхности объекта фокусируется на пленке под несколькими линзами. Эти изображения под разными линзами соответствуют различным ракурсам изобра-

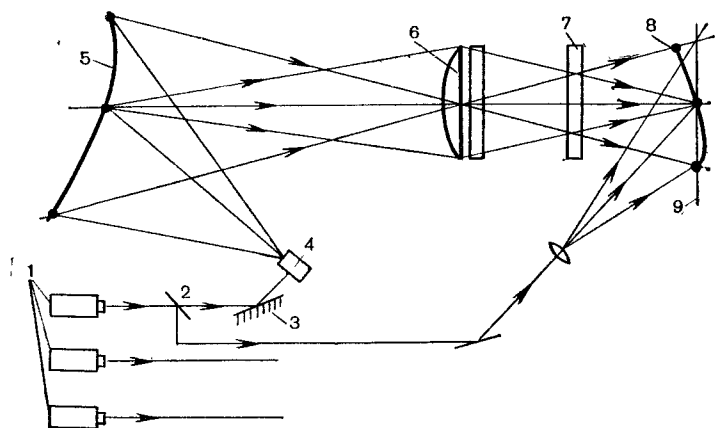


Рис. 57. Схема съемки голографического фильма с регистрацией горизонтальных ракурсов и получением сфокусированных голограмм в горизонтальной плоскости и голограмм Фурье в вертикальной

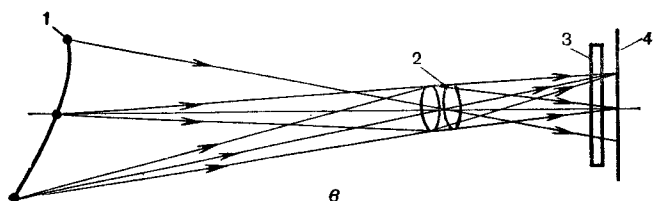
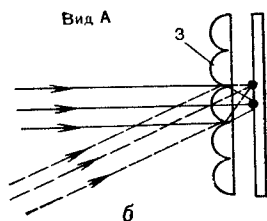
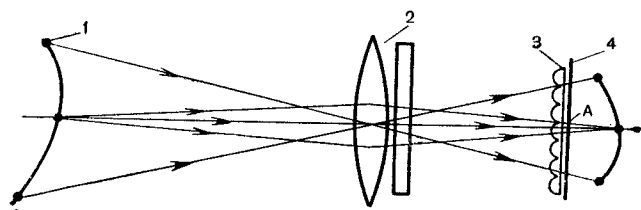


Рис. 58. Схема съемки растровым методом в некогерентном свете на цветную кинопленку обычной структуры: а, б — вид сверху; в — вид сбоку

жения, поскольку они формируются пучками света, проходящими через различные участки зрачка объектива.

На рис. 59 изображена схема съемки кинофильма с трехмерным изображением многообъективным методом в некогерентном свете. Здесь так же, как и в предыдущей схеме, регистрируется множество ракурсов изображения только по горизонтали. Эта схема пред-

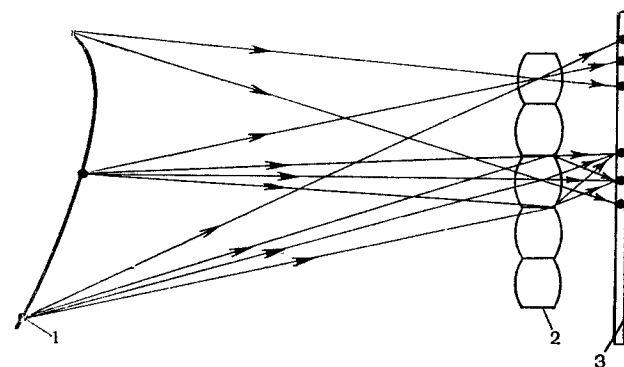


Рис. 59. Схема съемки кинофильма многообъективным методом в некогерентном свете

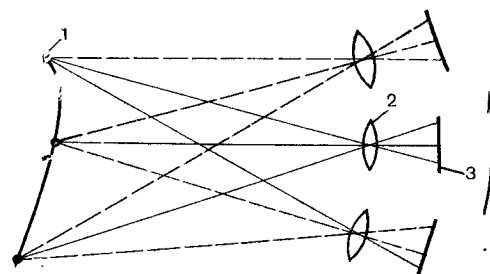


Рис. 60. Схема съемки кинофильма в некогерентном свете на обычную кинопленку с помощью движущегося киносъемочного аппарата

усматривает последующий перевод множества отдельных киноизображений каждого кадра в единое голографическое изображение, где 1 — объект съемки, освещенный обычным некогерентным светом; 2 — киносъемочный оптический блок, состоящий из множества расположенных вплотную друг к другу по горизонтали объективов; 3 — цветная обращаемая кинопленка в плоскости кадрового окна, в которой фокусируется изображение. Кинопленка движется в киносъемочном аппарате прерывисто.

На рис. 60 показана схема съемки кинофильма с трехмерным изображением в некогерентном свете на обычную кинопленку с помощью обычного движущегося киносъемочного аппарата. На

этой схеме 1 — снимаемый объект; 2 — киносъемочный объектив; 3 — киноплемка. Данная схема может найти лишь ограниченное применение для съемки фильмов с трехмерным изображением, так как имеет существенный недостаток, обусловленный возможностью съемки сцен таким способом только в случае весьма медленных движений снимаемых объектов по отношению друг к другу.

1.5.2. Копирование голографических фильмов и перевод многокадровых киноизображений в голографические

Первичные кинокадры, снятые различными способами, рассмотренными в разделе 1.5.1, можно перевести в кадры единого голографического кинофильма. На рис. 61 показана схема копирования контактным способом без промежуточной оптики. Первичная голограмма-фильм 1 располагается вблизи вторичной голографической киноплемки 2. Восстанавливающий пучок когерентного света 3 проходит через первичную голограмму-фильм и воспроизводит трехмерное голографическое изображение 4. Дифрагированная составляющая нулевого порядка, пройдя через оригинал, участвует в формировании голограммы-копии в качестве опорной волны. Воспроизводимое изображение 4 регистрируется на вторичной голографической киноплемке 2.

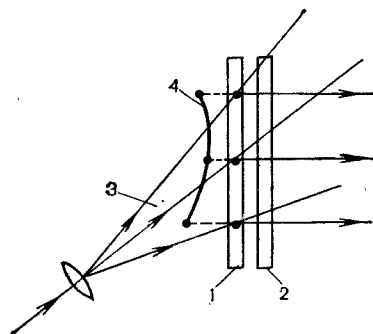


Рис. 61. Схема копирования голографического кинофильма без промежуточной оптики

Во время экспонирования обе пленки должны быть неподвижны, если применяются лазеры непрерывного действия. Использование импульсных лазеров более предпочтительно, так как копировальные аппараты могут быть выполнены конструктивно проще, без сложных antivибрационных устройств. Так можно копировать как сфокусированные, так и Фурье-голограммы.

Преимущества рассматриваемого способа — его простота и отсутствие промежуточной оптики, вносящей рассеяние и аберрации. Недостаток этого способа связан с тем, что соотношение интенсивностей опорного и объектного пучков при регистрации изображения вторичной голограммой задается соотношением интенсивностей пучков, выходящих из первичной голограммы в направлениях нулевого и первого порядка дифракции.

Этот недостаток устраняется при копировании с промежуточной оптикой, когда интенсивности восстанавливающего пучка для первичной голограммы и опорного — для вторичной могут быть выбраны независимо от условий получения оптимального режима.

На рис. 62 изображена схема копирования голографического фильма с промежуточной оптикой. Пучок света лазера 1 расщепляется на два, из которых формируются восстанавливающий 2 и опорный 3 пучки, для первичной голограммы-фильма 4 и вторичной голографической киноплемки 5. Воспроизведенное трехмерное изображение 6 вблизи первичной голограммы-фильма 4 преобразу-

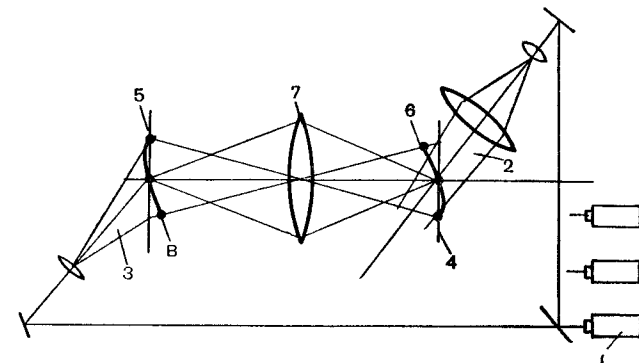


Рис. 62. Схема копирования голографического кинофильма с промежуточной оптикой

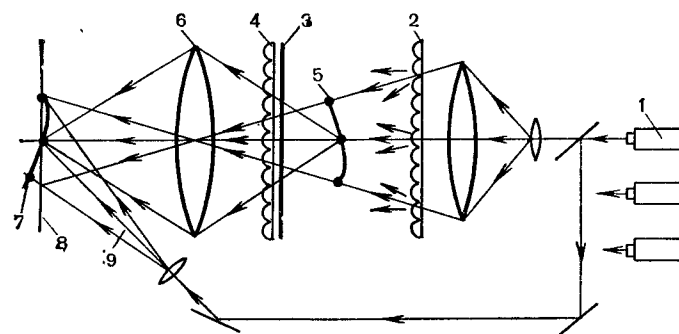


Рис. 63. Схема перевода растрового киноизображения в голографическое

ется промежуточной оптикой 7 во вторичное трехмерное изображение 8 вблизи вторичной голографической киноплемки 5 и регистрируется на ней. Схема применима как для сфокусированных голограмм, так и для голограмм Фурье.

На рис. 63 показана схема перевода растрового киноизображения в голографическое (синтеза голограммы). В этой схеме пучок света, выходящий из каждого лазера 1, расщепляется на два. Один через светорассеивающий растр 2 освещает первичный кинофильм 3 с зарегистрированным растровым изображением. Лучи света, прошедшие пленку 3, затем проходят растр 4 и формируют

мнимое трехмерное изображение 5, которое преобразуется оптическим блоком 6 в трехмерное изображение 7 вблизи вторичной голографической киноплёнки 8. На эту плёнку направляется также опорный пучок 9 от того же лазера и регистрируется трехмерное голографическое изображение.

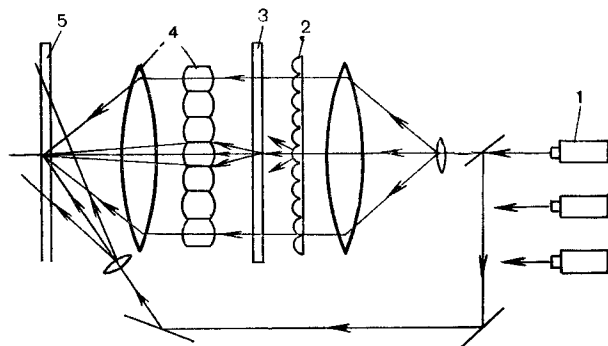


Рис. 64. Схема перевода киноизображения, снятого в некогерентном свете многообъективным методом, в голографическое

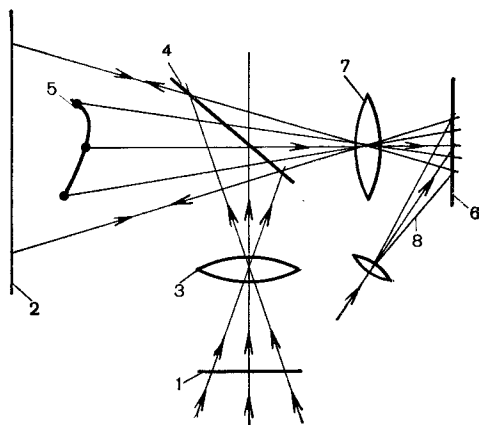


Рис. 65. Схема голографической киносъемки по методу фронт-проекции

На рис. 64 показана схема перевода киноизображения, полученного путем съемки в некогерентном свете многообъективным методом, в голографическое. Пучок света каждого лазера 1 расщепляется на два, один из которых направляется через линзы и светорассеивающий линзовый растр 2 на плёнку 3. Зарегистрированные на этой плёнке изображения объекта, отличающиеся друг от друга ракурсами, с помощью оптического блока 4 проецируются в плоскость голографической плёнки 5, которая одновременно освещается

опорным пучком от того же лазера 1. В процессе печати от момента одной экспозиции до момента следующей обе плёнки перемещаются строго на величину, равную шагу кадра.

На голографической киноплёнке можно получать комбинированные кадры путем пересъемки ранее снятых кадров и совмещения их с вновь снимаемыми. На рис. 65 изображена схема голографической киносъемки по методу фронт-проекции.

По этой схеме двухмерное изображение заднего фона 1, предварительно снятое на обычную киноплёнку, проецируется на ретро-рефлексный экран 2 в когерентном свете с помощью кинопроеционного объектива 3 и полупрозрачного зеркала 4. Снимаемый объект 5 освещается когерентным светом того же лазера, от которого используется свет для кинопроектора. Комбинированное изображение регистрируется на голографической киноплёнке 6 в киносъемочном аппарате, имеющем объектив 7 с большим зрачком. Опорный пучок 8 получается от общего лазера.

1.5.3. Проекция голографических кинофильмов

Проекцию голографических кинофильмов можно производить с помощью лазеров или газоразрядных ламп с малым телом свечения и с линейчатым спектром излучения.

На рис. 66 показана схема проекции голографических кинофильмов в случае квазисфокусированных изображений с передачей горизонтальных и вертикальных ракурсов. Свет, выходящий из газоразрядной лампы 1 или лазера, направляется в виде восстанавливающего пучка 4 на голограмму-фильм 2, вблизи которой воспроизводится трехмерное уменьшенное изображение 3, которое увеличивается кинопроеционным объективом 5 со зрачком шириной около 200 мм. Увеличенное трехмерное изображение 6 отражается голографическим экраном 7, как зеркалом, и одновременно размножается на большое число трехмерных изображений 6', 6'' по числу зрительных зон. При этом из каждой зрительной зоны 8', 8'' видно только одно изображение. При проекции плёнка в проекторе продвигается прерывисто кадр за кадром.

На рис. 67 изображена схема проекции голографических кинофильмов в случае квазисфокусированных изображений с передачей только горизонтальных ракурсов. Свет, выходящий из газоразрядной лампы или лазера 1, направляется в виде восстанавливающего пучка на голограмму-фильм 2, каждый кадр которого имеет большую ширину и малую высоту. Вблизи плёнки 2 воспроизводится уменьшенное трехмерное изображение 3, сильно сжатое (анаморфированное) по вертикали, которое растягивается (деанаморфируется) по вертикали оптической приставкой 4 с цилиндрическими линзами и затем увеличивается объективом 5 с большим зрачком по ширине (около 200 мм). В пространстве формируется трехмерное изображение 6 больших размеров, которое отражается голографическим экраном 7, как зеркалом, и одновременно размно-

жается на изображения $6'$, $6''$ по числу зрительных зон. Из каждой зоны $8'$, $8''$ зритель видит только одно изображение.

Ширина зрительной зоны определяется шириной зрачка объектива 5, высота зрачка которого во много раз меньше его ширины. В дополнение к точечно-фокусирующим свойствам голографиче-

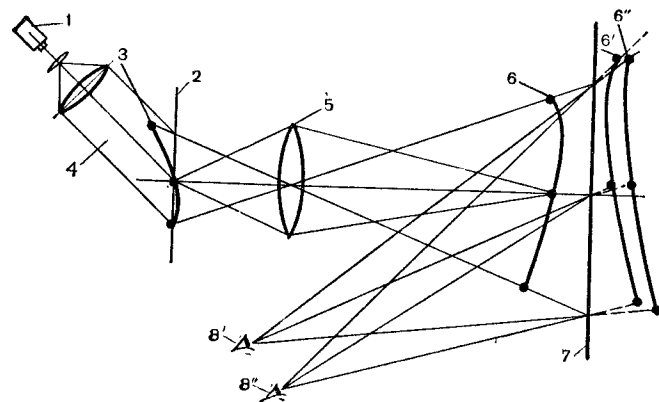


Рис. 66. Схема проекции голографических кинофильмов с квазифокусированными изображениями и передачей горизонтальных и вертикальных ракурсов

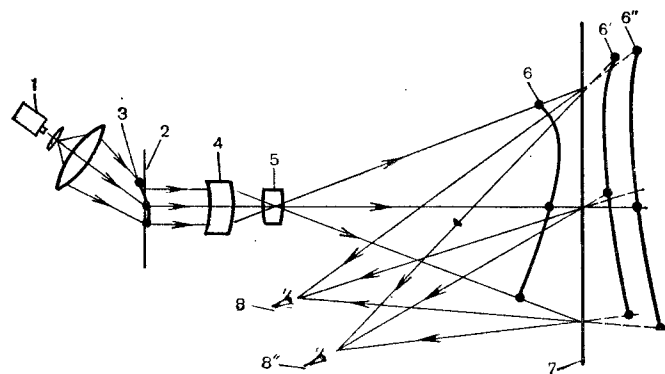


Рис. 67. Схема проекции голографических кинофильмов с квазифокусированными изображениями и передачей горизонтальных ракурсов

ский экран 7 рассеивает свет по вертикали в пределах весьма малого угла и обеспечивает достаточную для условия комфортного наблюдения высоту зрительной зоны.

На рис. 68 показана схема проекции голографических фильмов в случае квази-Фурье изображений с передачей только горизонтальных ракурсов. Свет, выходящий из лазера 1, направляется в

виде восстанавливающего пучка на голограмму-фильм 2, каждый кадр которого имеет вид узкой горизонтальной полоски. Восстановленный пучок света, дифрагированный голограммой-фильмом 2 с помощью объектива 3, осуществляющего обратное преобразование Фурье, формирует в пространстве трехмерное изображение 4, ко-

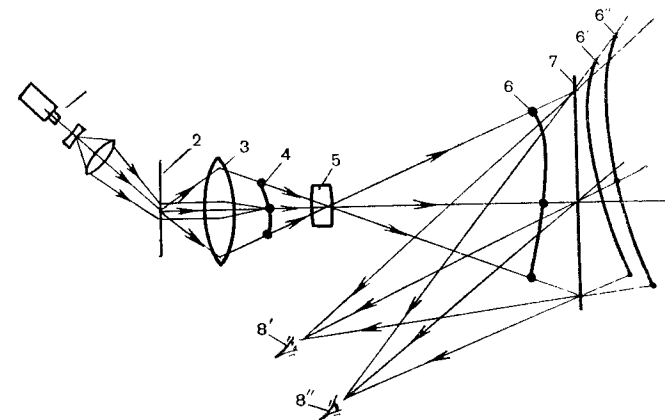


Рис. 68. Схема проекции голографических фильмов с квази-Фурье изображениями и передачей горизонтальных ракурсов

торое затем увеличивается кинопроекционным объективом 5, имеющим зрачок в форме узкой горизонтальной щели. Сформированное в пространстве увеличенное трехмерное изображение 6 отражается от голографического экрана 7 и направляется в зрительные зоны $8'$, $8''$. Из каждой зрительной зоны зритель видит одно из отраженных и размноженных голографическим экраном изображений.

1.5.4. Проекция статических голографических изображений

Проекция статических голографических изображений, которая также называется голографической диапроекцией, эпипроекцией или слайд-проекцией, может осуществляться по приведенным в предыдущем разделе схемам голографической кинопроекции, показанным на рис. 66—68. При этом вместо кинофильма используют голографический диафильм; каждая голограмма воспроизводит длительное время статическое изображение, которое зрители рассматривают с помощью голографического экрана. Серия последовательно проецируемых голограмм может быть сделана в виде голограмм, выполненных на отдельных пластинках, т. е. голографических слайдов.

Голографические слайды и диафильмы можно изготавливать по схемам, применяемым для получения изобразительных голограмм,

их копирования (см. раздел I.1), а также по схемам, разработанным для съемки и копирования голографических фильмов (см. разделы I.5.1; I.5.2).

Голографическая слайд-проекция может получить широкое применение не только для больших, но и малых аудиторий, поэтому практическое значение имеют более простые схемы проекции с лампами вместо лазеров. Более предпочтительно также использование квазисфокусированных голограмм со сравнительно небольшой глубиной изображения и близким расстоянием от элементов изображения до голограммы, как перед голограммой, так и позади нее. При этом расположение голограммы относительно воспроизводимого изображения может выбираться в процессе печати (см. разделы I.1.6 и I.5.2).

Для проекции статических голографических изображений целесообразнее использовать отражательные голограммы с толстым слоем, которые обладают более высокой спектральной селективностью.

I.5.5. Прямой и обратный перевод обычных двухмерных киноизображений в голографические

Наряду с регистрацией и воспроизведением трехмерных изображений голографические процессы можно применять и для перевода обычных двухмерных киноизображений в голографические с последующим копированием и воспроизведением таких плоских изображений со следующими целями:

1) долговременного хранения кинофильмов в виде голограммы-фильма, обеспечивающей лучшую сохраняемость зарегистрированного изображения;

2) сокращения расхода киноплёнки за счет малых размеров голограммы-кадра;

3) упрощения аппаратуры для воспроизведения киноизображений за счет малой скорости движения пленки, а также за счет непрерывного ее движения (для Фурье-голограмм).

На рис. 69 показана принципиальная схема перевода обычного киноизображения в голографическое. Пучки света лазеров 1 с красным, зеленым и синим излучением разделяются на два канала. Каждый таким образом, что три из шести разноцветных пучка проходят через светорассеивающий растр 2 и затем через негатив обычного фильма с плоским изображением 3. Далее лучи проходят через объектив 4, осуществляющий оптическое преобразование Фурье, в результате чего лучи, выходящие из точечного элемента поверхности пленки 3 в виде расходящегося пучка, выходят из объектива 4, образуя параллельный пучок, который проходит через всю поверхность кадра на голографической киноплёнке 5. Фазовый фильтр 6 уменьшает интерференционную зернистость изображения (спеклы). На ту же голографическую киноплёнку 5 направляются остальные три пучка, формируя опорный пучок 7.

Зарегистрированные таким образом голограммы негативов ки-

нофильма используют для печати промежуточного негатива на цветной киноплёнке обычной структуры (обращаемой), а с него печатают копии кинофильма. Промежуточный голографический фильм направляют на длительное хранение.

На рис. 70 показана принципиальная схема перевода голографического изображения в обычное киноизображение промежуточного негатива. Свет лазеров 1 с красным, зеленым и синим излу-

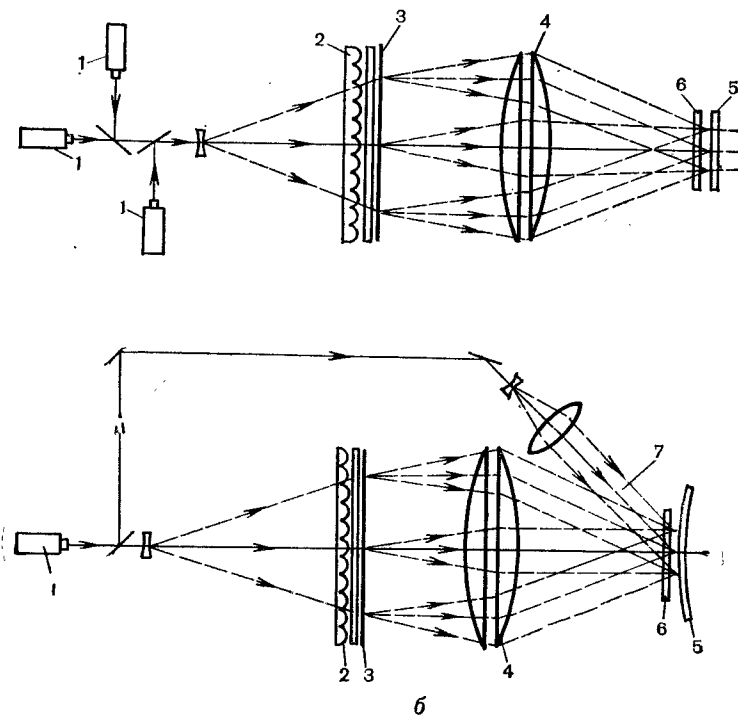


Рис. 69. Схема перевода обычных киноизображений в голографические: а — вид сверху; б — вид сбоку

нием образует восстанавливающие пучки, падающие на голограмму-фильм 2 таким образом, что направление лучей света сохраняется точно таким же, как при его получении. При этом для уменьшения спеклов производят быструю развертку восстанавливающего пучка с помощью дефлектора 3 таким образом, что малое пятно этого пучка света сканирует по поверхности, освещая последовательно всю поверхность кадра за время его неподвижного положения. Восстановленное изображение 2 проецируется объективом 4 в плоскость промежуточного негатива 5.

Другим примером возможного применения процесса перевода двухмерного киноизображения в голографическое является голографическая кинотелевизионная система. В этой системе двухмер-

ное изображение обычных кинофильмов переводят на голографическую киноплёнку, как в рассмотренном примере. Затем голограмму-фильм копируют, а копии используют для получения с помощью телевизионного кинопроектора видеосигналов, которые усиливают и передают по замкнутой телевизионной системе к телевизионным приемникам, на экранах которых воспроизводят двухмерные кино-

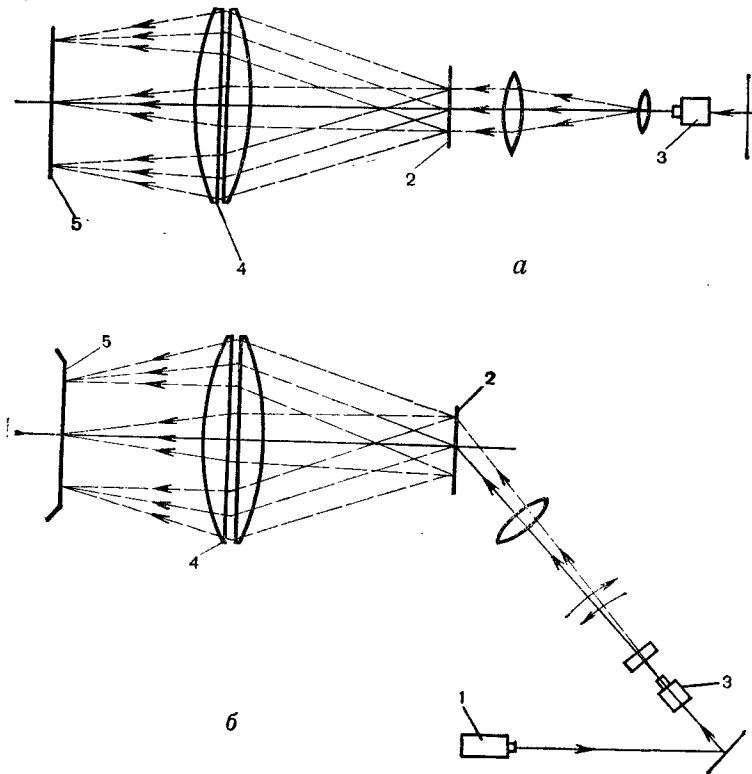


Рис. 70. Схема перевода голографического изображения в обычное киноизображение промежуточного негатива: а — вид сверху; б — вид сбоку

изображения, ранее зарегистрированные на голографической киноплёнке.

Примером системы голографического кинематографа с передачей двухмерного изображения является система «Голотейп», разработанная фирмой RCA (США), в которой используют рельефные фазовые голограммы на фоторезисте в качестве оригинала и на поливиниловой плёнке — голограммы-копии.

Для голографического кинематографа и изобразительной голографии необходима оптика с характеристиками, существенно отличающимися от обычных, присущих кинофотографической оптике. Свойства голографической оптики зависят от того, предназначена ли она для получения голограмм или для воспроизведения голографического изображения.

При изготовлении голограмм используют лазерный свет с высокой степенью когерентности. Поэтому даже небольшие дефекты на поверхности и в толще оптических сред, вызывающие рассеяние света, а также переотражения на границах оптических сред приводят к интерференционным помехам в виде темных и светлых пятен различной формы и размеров. Поэтому к оптике, работающей в когерентном свете, предъявляют более высокие требования, чем к оптике, используемой при обычном некогерентном свете.

Важнейшие оптические приборы для голографического кинематографа — это объективы для съёмки и проекции, а также экраны для проекции трехмерных голографических изображений. Кроме того, используют следующие оптические приборы.

Микрообъективы и точечные диафрагмы. В системе микрообъектив — диафрагма объектив должен иметь малые aberrации для параллельного пучка лазерного света на входе объектива, при этом основная часть лучистого потока должна проходить через малое отверстие диафрагмы.

Линзовые растры для съёмки многоракурсных изображений и их перевода в голографические с малым светорассеянием и незначительной разницей фокусных расстояний отдельных цилиндрических линз для обеспечения высокой резкости и контраста изображения.

Зеркала и светоделительные пластинки для направления лазерных пучков света. Эти оптические элементы должны обладать высокой свето-термической прочностью, заданными значениями коэффициента отражения и пропускания и малыми потерями на рабочих длинах волн.

Гибкие световоды для подведения лазерных пучков к подвижным устройствам (например, съёмочным аппаратам и осветительным приборам). Гибкие световоды должны иметь малые потери, достаточную гибкость и прочность, а кроме того, не снижать степень когерентности в результате вибраций, перемещения световодов и температурных изменений.

1.6.1. Объективы

Главной особенностью объективов, формирующих трехмерное изображение в голографическом кинематографе и изо-

бразительной голографии, является большая ширина зрачка, чтобы передать множество ракурсов изображения для наблюдения двумя глазами в комфортных условиях, когда возможно небольшое перемещение головы наблюдателя в пределах зрительной зоны без потери трехмерного восприятия.

Ширина зрачка объектива для съемки и проекции голографических фильмов должна быть не менее 150—250 мм, что достаточно для сидящих зрителей и не приводит еще к чрезмерно громоздким размерам объективов.

В системах кинематографа с передачей горизонтальных и вертикальных ракурсов высота зрачка объектива может достигать примерно тех же значений, что и ширина. В случае передачи только горизонтальных ракурсов высота зрачка может лежать в пределах 5—20 мм.

Вторая особенность объективов, используемых для съемки, синтеза, копирования и проекции голографических фильмов, — их большое относительное отверстие, т. е. достаточно короткое фокусное расстояние 100—200 мм при большой ширине зрачка. Такое сравнительно короткое фокусное расстояние обусловлено необходимостью получить широкий угол поля зрения объектива при возможных меньших размерах кадра на пленке. При этом справедливо следующее соотношение:

$$\alpha_L = 2 \arctg \frac{b_F \left(1 - \frac{f_L}{l}\right)}{2f_L}, \quad (I.16)$$

$$f_L = \frac{b_L}{\epsilon_b},$$

где α_L — угол поля зрения объектива; b_F — ширина кадра на пленке; b_L — ширина зрачка; f_L — фокусное расстояние; l — расстояние от объектива до объекта съемки (или до экрана); ϵ_b — относительное отверстие объектива по горизонтали. Например, для киносъемочного объектива при $b_F = 50$ мм; $b_L = 200$ мм; $f_L = 150$ мм; $l = 1200$ мм по формуле (I.16) получаем: $\alpha_L = 18,7'$; $\epsilon_b = 1,33$.

Голографические объективы с относительным отверстием 1 : 0,75 уже разработаны. Следует полагать, что в будущем могут быть разработаны объективы с относительным отверстием 1 : 0,5.

Вследствие очень большого относительного отверстия голографических объективов трудным является получение малых сферических и хроматических aberrаций. Снижение aberrаций часто достигается использованием большого числа линз. Однако в объективах, работающих в когерентном свете, микроскопические дефекты на поверхности и в толще линз вызывают рассеяние света, приводящее к интерференционным помехам. Снижение сферических и хроматических aberrаций в обычных кинофотообъективах часто достигается введением в объективы диафрагм, что вызывает виньетирование, т. е. исключение лучей света, проходящих через периферию зрачка и формирующих изображение по краю поля. Такой

способ тоже мало пригоден для голографических объективов, в которых недопустимо виньетирование.

Несмотря на указанные трудности, задача получения приемлемых значений сферических и хроматических aberrаций для киноголографических объективов существенно упрощается тем, что каждое элементарное голографическое изображение одного ракурса формируется узким пучком света, проходящим через малое сечение зрачка объектива. Поэтому допустимые значения сферических и хроматических aberrаций голографических объективов следует устанавливать для элементарных пучков света с диаметром поперечного сечения пучка, соответствующим диаметру зрачка глаза наблюдателя, примерно равному 4 мм; из условия получения хорошего качества изображения их можно принять равными 2 угловым минутам для указанных элементарных пучков.

Использование в процессе копирования голографических фильмов объективов тех же типов, что при съемке и проекции, но в обратном ходе лучей света дает взаимную компенсацию не только сферической и хроматической aberrаций, но и дисторсии и астигматизма (в случае цилиндрической оптики). При этом не компенсируется светорассеяние из-за микроскопических дефектов поверхности и материала линз, а также обусловленное дифракцией света вследствие ограниченных апертур.

На фото 14 показан объектив ОКГ-2, выполненный НИКФИ и НПО «Экран» для съемки голографических кинофильмов с получением квазисфокусированных изображений. Фокусное расстояние объектива 150 мм; диаметр зрачка 200 мм; относительное отверстие 1 : 0,75; поле зрения соответствует размеру кадра 52×47 мм на пленке шириной 70 мм, с шагом кадра 47,5 мм; виньетирование полностью отсутствует; задний отрезок объектива 76 мм; что обеспечивает введение опорного пучка под углом 56°. Монохроматические aberrации исправлены для длины волны света 0,546 мкм; ахроматизация выполнена для длин волн света 0,434 мкм и 0,656 мкм.

На рис. 71 показана схема объектива ОКГ-2. Диаметр внешней оправы объектива 238 мм, а его длина 183 мм.

На фото 11 показан объектив ОПГ-1, выполненный в НИКФИ для проекции голографических фильмов с регистрацией квазисфокусированных изображений. Фокусное расстояние объектива 250 мм; диаметр зрачка 200 мм; относительное отверстие 1 : 1,25; поле зрения соответствует размеру кадра 52×47 мм на пленке шириной 70 мм, с шагом кадра 47,5 мм; виньетирование полностью отсутствует; задний отрезок объектива 140 мм, что обеспечивает введение опорного пучка.

На рис. 72 показана оптическая схема проекционного объектива ОПГ-1.

Для получения изобразительных голограмм с перекопированием, например голографических портретов, можно применять объективы с большим фокусным расстоянием, чем в голографическом кинематографе. Это объясняется тем, что при том же угле поля зре-

ния объектива ширина голограммы может быть значительно больше, чем при киносъемке (см. формулу (1,16)). Диаметр зрачка объектива может быть достаточно большим, например 300—500 мм, а схема объектива — простейшей, например из двух простых линз, так как при копировании возможна компенсация основных аберраций в обратном ходе лучей. Большой диаметр линз обеспечивает получение большой зоны видения, из которой можно наблюдать голографический портрет одновременно нескольким зрителям.

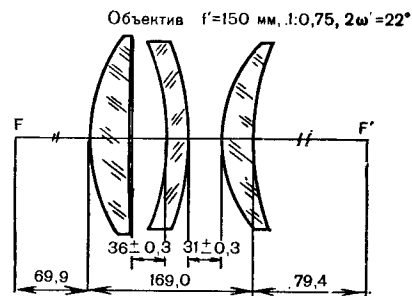


Рис. 71. Схема киносъемочного голографического объектива ОКГ-2

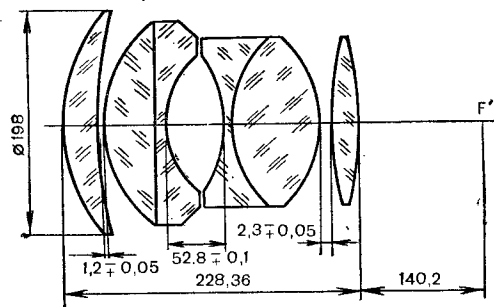


Рис. 72. Схема проекционного объектива ОПГ-1

1.6.2. Блоки оптического преобразования Фурье

Если в фокальной плоскости объектива расположена плоская поверхность объекта 2 так, чтобы лазерный свет, отраженный или прошедший через нее, проходил через объектив 1 и далее через фотопленку 3, освещенную опорным пучком 4, то регистрируется Фурье-голограмма (рис. 73). При этом лучи света, выходящие из точки 5 поверхности объекта в разных направлениях, на выходе объектива образуют параллельный пучок, т. е. проходят через фотослой пленки 3 в одном направлении.

Таким образом, при оптическом преобразовании Фурье каждой точке на поверхности объекта соответствует строго определенное направление лучей света в регистрирующем слое, т. е. линейные

координаты поверхности объекта преобразуются в угловые координаты лучей света объектного пучка голограммы.

При воспроизведении голографического изображения в случае изменения направления восстанавливающих лучей света на противоположное 4 по сравнению с процессом получения голограмм происходит обратное преобразование Фурье. Воспроизводимое изобра-

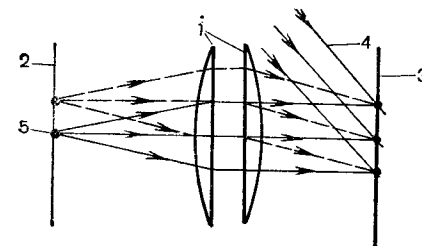


Рис. 73. Схема регистрации голографического изображения методом оптического преобразования Фурье

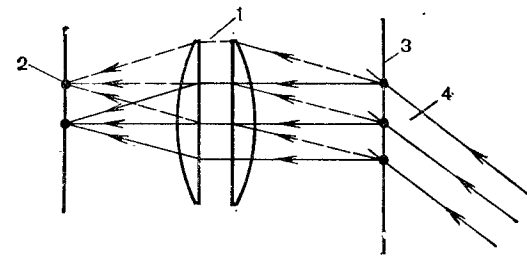


Рис. 74. Схема воспроизведения голографического изображения путем обратного оптического преобразования Фурье

жение формируется в обратном ходе лучей (рис. 74). Важная особенность рассматриваемого процесса заключается в том, что каждый малый элемент воспроизводимого изображения 2 формируется с помощью объектива 1 лучами света 4, которые выходят параллельным пучком с большей части поверхности голограммы 3.

На рис. 74 видно, что при перемещении голограммы в плоскости, перпендикулярной оптической оси, направления восстановленных лучей, выходящих из голограммы, не изменяются, поэтому поперечный сдвиг голограммы Фурье не вызывает смещения воспроизводимого изображения.

Точное преобразование Фурье осуществляется только для плоского изображения, совпадающего с фокальной плоскостью объектива. Если изображение трехмерное и его глубина невелика, то этот процесс можно считать квази-Фурье преобразованием. Смещение воспроизводимого изображения (при непрерывном движении

голограммы) оказываются незначительными. При этом благоприятным фактором является сплющивание изображения вдоль оптической оси в случае его уменьшения при киносъемке: если объектив уменьшает поперечные размеры в M_L раз, продольные размеры уменьшаются в M_L^2 раз.

В системе голографического кинематографа как для съемки, так и для проекции объектив, осуществляющий преобразование

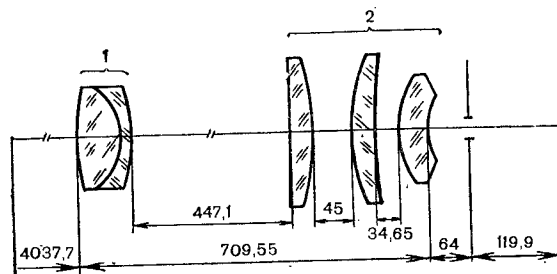


Рис. 75. Схема устройства оптического блока преобразования Фурье для киносъемки голографических фильмов с регистрацией горизонтальных ракурсов: 1 — щелевой объектив; 2 — объектив Фурье

Фурье, выполняется как часть оптического блока, в который входит также основной объектив, уменьшающий (при киносъемке) или увеличивающий (при кинопроекции) трехмерное изображение.

В НИКФИ разработан блок оптического преобразования Фурье для киносъемки голографических фильмов с регистрацией только горизонтальных ракурсов изображения (фото 13). Блок состоит из щелевого объектива и объектива Фурье. Фокусное расстояние щелевого объектива 300 мм, а объектива Фурье — 115 мм; размеры входного зрачка блока по ширине 150 мм, по высоте 10 мм; поперечные размеры изображения на выходе щелевого объектива и на входе объектива Фурье по ширине 64,5 мм, по высоте 47,6 мм; размеры кадра на пленке по ширине 45,5 мм, по высоте 0,92 мм.

На рис. 75 показана схема оптического блока со щелевым преобразованием Фурье. Применены сферические линзы, и оптическое преобразование Фурье производится как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях. Увеличение оптического блока равно 0,1. Расстояние от задней поверхности линзы до выходного зрачка блока, в котором расположена пленка, равно 64 мм, что достаточно для введения опорного пучка.

1.6.3. Голографические экраны

Голографические экраны для проекции трехмерных голографических изображений, обладающие свойством фокусирования и размножения изображения, предложены в НИКФИ.

Ранее разработанные Д. Габорм голографические экраны, не обладающие свойствами точечного фокусирования и собирающие

отраженный или проходящий свет в широкие зоны, не пригодны для проекции голографических изображений с полной передачей объема.

В зависимости от класса в голографическом кинематографе можно использовать голографические экраны двух различных видов.

В системах первого класса с передачей ракурсов изображения по горизонтали и вертикали применяют точно-фокусирующие голографические экраны. В системах второго класса с передачей ракурсов изображения только по горизонтали используют линейно-фокусирующие голографические экраны.

Голографические экраны бывают отражающими и просветными. Отражающие экраны для целей кинопроекции представляют наибольший интерес, так как обладают тем преимуществом, что кинопроекторная установка занимает меньше места, поскольку между экраном и кинопроектором могут располагаться зрители, особенно в случае большой аудитории.

Просветные голографические экраны имеют возможность более простого совмещения в единой конструкции кинопроектора и экрана; это удобно для небольших установок, рассчитанных на ограниченное число зрителей.

Голографические экраны, предназначенные для кинопроекции фильмов с трехмерным изображением, должны обладать:

высокой дифракционной эффективностью (50÷70%), обеспечивающей получение достаточно высокой яркости при приемлемых значениях светового потока кинопроектора;

малым светорассеянием, обеспечивающим сохранение высокого контраста просцируемого изображения; причем отношение сигнал/шум 50—100 (в пределах зоны видения) следует считать приемлемым;

малыми хроматическими aberrациями; расхождение между дифрагированными лучами разных длин волн (синей, зеленой и красной), падающими на малый элемент поверхности экрана в одном направлении, не должно превышать 1÷2 угловых минут во избежание появления цветных контуров изображения;

малыми aberrациями, обеспечивающими достаточно большие размеры зрительных зон; поперечные aberrационные смещения дифрагированных лучей в пределах 5÷10 мм в зрительной зоне следует считать приемлемыми;

равномерностью дифракционной эффективности экрана по его полю в каждой зоне видения, составляющей 5÷10% в случае плавных изменений и 2÷4% в случае резких изменений; равномерность дифракционной эффективности экрана от одной зрительной зоны к другой должна быть в пределах 10—20%.

отсутствием посторонних лучей света в зрительных зонах; блик от поверхности стекла экрана должен отражаться вне зоны видения; дифрагированные лучи дифракции минус первого и высших порядков, формирующие ложные изображения, также не должны проходить через зрительные зоны.

Следует подчеркнуть, что голографический экран, предназначенный для проекции трехмерных изображений, обязательно должен обладать фокусирующим действием, чтобы получить достаточно большие угловые размеры наблюдаемой сцены. Если, например, изготовить экран с помощью плоских зеркал, то угловые размеры

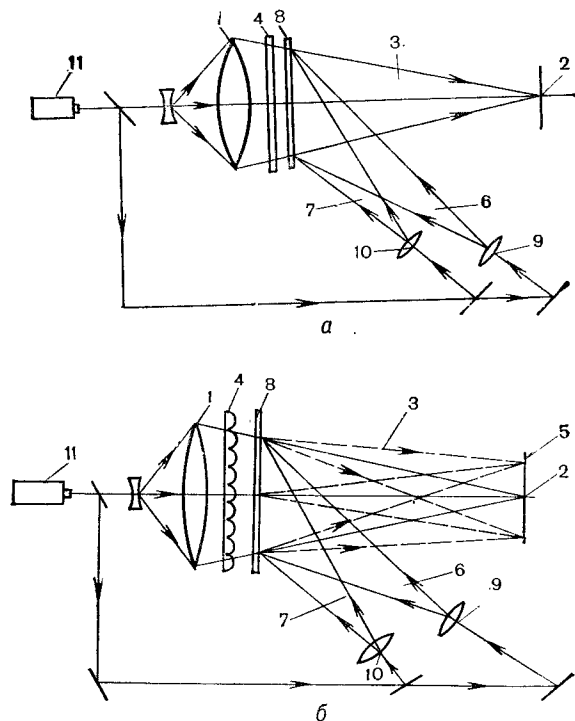


Рис. 76. Схема изготовления отрагательного фокусирующего множительного голографического экрана с помощью большой линзы; а — вид сверху; б — вид сбоку

изображения будут ничтожно малы и будут равняться угловым размерам зрачка проекционного объектива по отношению к зрителю. Кроме того, зрительные зоны будут перекрывать друг друга, а зритель будет видеть вместо слитного изображения множество изображений зрачков объектива.

На рис. 76 показана схема изготовления отрагательного фокусирующего множительного голографического экрана, где 1 — большая линза, создающая сходящийся опорный пучок света 3; 2 — первичный фокусирующий центр экрана; 4 — линейный растр с горизонтально расположенными цилиндрическими линзами, рассеивающими свет по вертикали в виде отрезка 5 (растр используется только при изготовлении линейно-фокусирующих экранов); 6, 7 — объектные пучки; 8 — фотопластинка — будущий голографический

экран; 9, 10 — вторичные фокусирующие центры экрана; 11 — лазер (при изготовлении экрана и для проекции цветных киноизображений используют лазеры трех длин волн).

При использовании голографического экрана возможно как очередное экспонирование из каждого вторичного фокусирующего центра 9, 10, так и одновременное из всех центров. Первый способ отличается отсутствием ложных интермодуляционных решеток, возникающих за счет взаимодействия сигнальных пучков между собой. Второй способ имеет преимущество большей глубины модуляции коэффициента преломления света голографическими решетками при

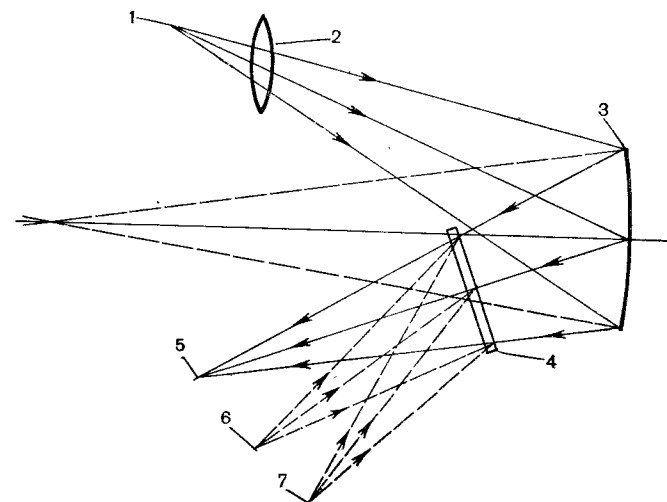


Рис. 77. Схема изготовления отрагательного фокусирующего множительного голографического экрана с разделением в пространстве опорного и объектного пучков

одинаковой толщине и структуре слоя и одинаковой суммарной экспозиции.

Голографический экран, изготовленный по схеме, показанной на рис. 76, без использования раstra 4, обладает точно-фокусирующим действием. Расходящийся пучок точечного источника, расположенного в первичном фокусирующем центре 2, отразится от экрана 4, сфокусируется во вторичных центрах 9, 10. Если расположить в первичном фокусирующем центре зрачок проекционного объектива, то у вторичных фокусирующих центров 9, 10 возникнут зрительные зоны, в пределах которых зрители смогут видеть спроецированное изображение по всему полю экрана.

Голографический экран, изготовленный с использованием раstra 4, имеет линейно-фокусирующие свойства. Если при этом источник света в виде щелевого объектива расположить в первичном фокусирующем центре 2, отраженные от экрана пучки света сфокусируются у вторичных центров 9, 10 ... и возникнут зрительные зоны, имеющие в поперечном сечении прямоугольную форму.

Для получения сходящегося пучка света при изготовлении голографических экранов можно применить вместо линзы (1 на рис. 76) зеркало (рис. 77). На этом рисунке 1 — центр пучка света, падающего от лазера на зеркало; 2 — оптический компенсатор aberrаций астигматизма; 3 — зеркало, фокусирующее опорный пучок

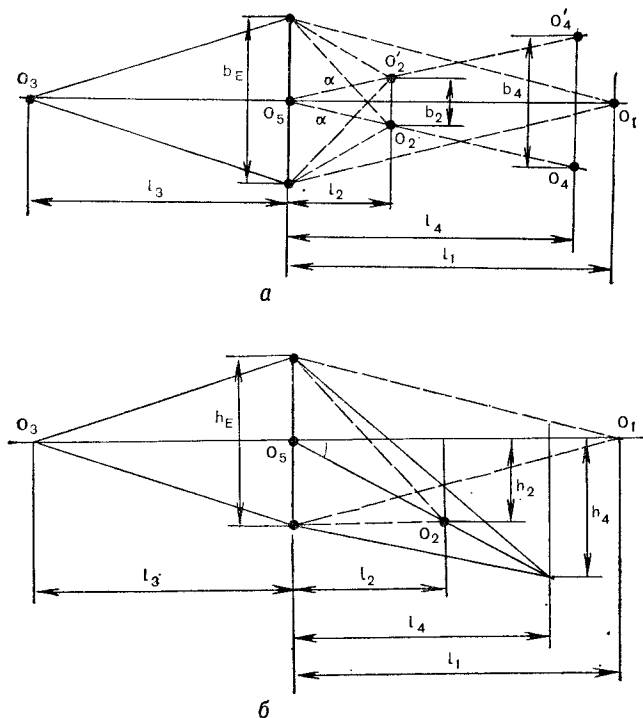


Рис. 78. Схема изготовления точечно-фокусирующего множительного голографического экрана в расходящихся пучках: а — вид сверху; б — вид сбоку

чок в первичном центре экрана 5; 4 — фотопластинка, будущий голографический экран; 6, 7 — центры объектных пучков света, падающих на фотопластинку 4.

Первая проекция голографического монохромного киноизображения была осуществлена в НИКФИ на голографический экран размером 0,6×0,8 м с двумя зонами видения, изготовленный в 1976 г. путем лабораторного полива на стекло эмульсионного слоя типа ПЭ, также синтезированного в НИКФИ. Фотопластинку экспонировали аргоновым лазером на длине волны света $\lambda_s = 514$ нм. При проекции использовалась длина волны $\lambda_k = 578$ нм.

При изготовлении образца экрана по схеме, показанной на рис. 78, экспонирование осуществлялось в расходящихся пучках. На этом рисунке O_1 — центр опорного пучка света при экспониро-

вании фотопластинки; O_2, O'_2 — центры объектных пучков; O_3 — первичный фокусирующий центр голографического экрана (местоположение центра зрачка проекционного объектива); O_4, O'_4 — вторичные фокусирующие центры (местоположение зрителей); O_5 — центр экспонируемой фотопластинки (голографического экрана), имеющей ширину b_E и высоту h_E .

Для параксиальных пучков справедливы соотношения:

$$\frac{1}{f_b} = \frac{\cos^2 \alpha}{l_2} - \frac{1}{l_4}; \quad \frac{1}{f_h} = \frac{\cos^2 \beta}{l_2} - \frac{1}{l_4}, \quad (I.17)$$

где f_b, f_h — фокусные расстояния голографического экрана, соответственно, для горизонтальной и вертикальной плоскостей.

Как видно из соотношений (I.17), для уменьшения астигматизма, приводящего к сокращению размеров зоны видения, целесообразно углы наклона объектных лучей в горизонтальной α и вертикальной β плоскостях выбирать близкими друг к другу.

При проекции изображения на голографический экран, изготовленный по схеме рис. 78, справедливы соотношения:

$$\frac{\cos^2 \alpha}{l_{4b}} = \frac{1}{f_b} - \frac{1}{l_3}; \quad \frac{\cos^2 \beta}{l_{4h}} = \frac{1}{f_h} - \frac{1}{l_3}, \quad (I.18)$$

где l_{4b}, l_{4h} — расстояния от экрана до вторичного фокусирующего центра, соответственно, для горизонтальной и вертикальных плос-

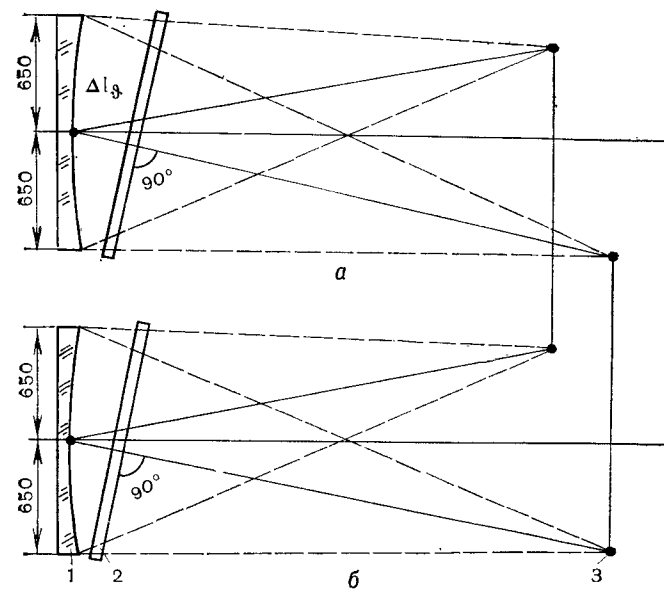


Рис. 79. Схема изготовления точечно-фокусирующего множительного голографического экрана с помощью большого зеркала без разделения в пространстве опорного и объектного пучков: а — вид сбоку; б — вид сверху

костей фокусирования дифрагированных пучков света (параксиальных).

Голографический экран, выполненный по схеме рис. 78 и использованный для первой проекции голографических киноизображений, имел следующие параметры:

$$\begin{aligned} l_1 &= 3,5 \text{ м} \quad l_2 = 1,1 \text{ м} \quad l_3 = 3,5 \text{ м} \quad l_4 = 3,2 \text{ м} \\ b_E &= 0,8 \text{ м} \quad h_E = 0,6 \text{ м} \quad b_4 = 0,5 \text{ м} \quad h_4 = 0,15 \text{ м} \\ b_2 &= 0,172 \text{ м} \quad h_2 = 0,0516 \text{ м} \end{aligned}$$

На рис. 79 показана схема изготовления точно-фокусирующего множительного голографического экрана. Экспонирование фотопластины для каждой зоны производилось последовательно. Опорный гомоцентрический пучок лазерного света падал на зеркало диаметром 1300 мм с фокусным расстоянием 2000 мм (1 на рис. 79). Отраженный от зеркала объектный пучок света проходил через фотопластинку 2 со стороны, противоположной опорному пучку. Луч света от центра 3, падающий на центр поверхности зеркала с наружным отражающим покрытием для всех зон, составлял с поверхностью фотопластины угол 90° .

1.6.4. Зеркальные и растровые экраны

Простейшим экраном, пригодным для проекции трехмерных голографических изображений, является зеркало с вогнутой поверхностью, например сферической, фокусирующей свет (рис. 80). Если проекционный объектив 1 со зрачком большого диа-

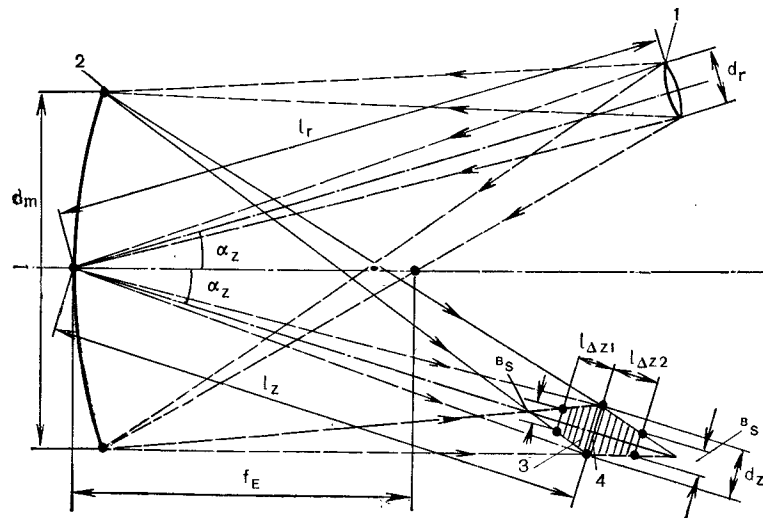


Рис. 80. Экран в виде большого зеркала с вогнутой поверхностью для проекции трехмерных голографических изображений

метра расположен от зеркала 2 на расстоянии, большем, чем фокусное расстояние зеркала, отраженные от зеркала лучи света образуют зрительную зону 3. В главной плоскости (поперечном сечении) зоны 4 формируется изображение зрачка объектива лучами, отраженными от поверхности зеркала.

Вследствие оптических aberrаций изображения зрачка объектива, формируемые отдельными небольшими участками поверхности зеркала, оказываются несколько смещенными по отношению друг к другу. Поэтому размер зрительной зоны, через каждую точку поперечного сечения которой проходят лучи, отраженные от всей поверхности зеркала, оказывается несколько меньше, чем определяемый следующим соотношением:

$$d_z = d_r \frac{l_z}{l_r}, \quad (1.19)$$

где d_r , d_z — диаметр, соответственно, зрачка проекционного объектива и зрительной зоны; l_r , l_z — расстояние от центра зеркала до главной плоскости проекционного объектива и главной плоскости зрительной зоны.

Оптические aberrации увеличиваются при возрастании угла между оптическими осями зеркала и объектива, и значительное увеличение угла в результате сильного астигматизма может привести даже к полному исчезновению зрительной зоны, когда в пространстве перед зеркалом не будет точки, из которой можно увидеть всю поверхность экрана, освещенного через проекционный объектив.

Если оптические оси зеркала и объектива лежат в горизонтальной плоскости, то расстояние от экрана до зрительной зоны определяется соотношением:

$$\frac{1}{l_z} = \frac{1}{f_E \cos \alpha_z} - \frac{1}{l_r}, \quad (1.20)$$

где f_E — фокусное расстояние зеркала; α_z — угол между оптическими осями зеркала и объектива в горизонтальной плоскости.

Вследствие астигматизма высота зрительной зоны в ее главном, поперечном сечении при наличии угла α_z становится меньше, чем величина, определяемая соотношением (1.19), и равна:

$$h_z = d_z - (d_m - d_z) (1 - \cos^2 \alpha_z), \quad (1.21)$$

где h_z — высота зрительной зоны; d_m — диаметр зеркала.

Рассмотрим пример. Примем $d_m = 3$ м; $d_r = 0,4$ м; $l_r = 13$ м; $\alpha_z = 20^\circ$; $f_E = 6,64$ м.

По формуле (1.20) получаем:

$$l_z = \frac{1}{\frac{1}{6,64 \cos 20^\circ} - \frac{1}{13}} = 12 \text{ м.}$$

По формуле (1.19) получаем:

$$d_z = 0,4 \frac{12}{13} = 0,369 \text{ м.}$$

Влияние астигматизма на размеры зрительной зоны может характеризоваться расстоянием между линиями фокусирования для меридиональной и сагиттальной плоскостей вдоль оптической оси зрительной зоны. Когда оптические оси зеркала и объектива лежат в горизонтальной плоскости, указанное расстояние равно:

$$l_{\Delta z0} = l_z \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_z} - 1 \right). \quad (1.22)$$

Для рассмотренного примера по формуле (1.22) получаем:

$$l_{\Delta z0} = 12 \left(\frac{1}{\cos^2 20^\circ} - 1 \right) = 1,59 \text{ м.}$$

Зрительная зона имеет максимальную ширину в своей главной плоскости. При продольном перемещении по оптической оси ширина зрительной зоны уменьшается. Глубина зрительной зоны, в пределах которой зритель видит двумя глазами весь экран по его ширине, определяется следующим соотношением:

$$l_{\Delta z} = \left(1 - \frac{b_s}{d_z} \right) \frac{l_z}{\frac{d_m}{d_z} \cos \alpha_z \pm 1}, \quad (1.23)$$

где $l_{\Delta z}$ — расстояние от главной плоскости зрительной зоны до плоскости, соответствующей ширине зоны, равной базису зрения b_s (расстоянию между глазами человека). Знак (+) соответствует границе зоны в сторону к экрану ($l_{\Delta z1}$), знак (—) соответствует границе зоны в сторону от экрана ($l_{\Delta z2}$).

Для приведенного примера, полагая $b_s = 0,07 \text{ м}$, получаем по формуле (1.23):

$$l_{\Delta z} = \left(1 - \frac{0,07}{0,4} \right) \frac{12}{\frac{3,0}{0,369} \cos 20^\circ \pm 1};$$

$$l_{\Delta z1} = 1,15 \text{ м}; \quad l_{\Delta z2} = 1,49 \text{ м.}$$

Приведенные примеры даны для случая горизонтального угла между осями объектива и зеркала. Аналогичным путем могут быть определены размеры зрительных зон и в более общем случае, когда угол между осями объектива и зеркала имеет как горизонтальную, так и вертикальную составляющие.

Для проекции трехмерных голографических изображений можно применять, кроме того, растровые экраны, которые используют в системах безочковой проекции стереоскопических изображений. К числу таких экранов относятся линзо-растровые отражательные экраны; линзо-растровые просветные экраны; зеркально-растровые экраны.

На рис. 81 показана схема отражательного линзо-растрового экрана, изобретенного С. П. Ивановым, состоящая из следующих элементов: 1 — перспективный растр из линз с конической поверхностью, расположенных веерообразно (вплотную друг к другу) по отношению к центру 2; 3 — диффузно отражающая поверхность,

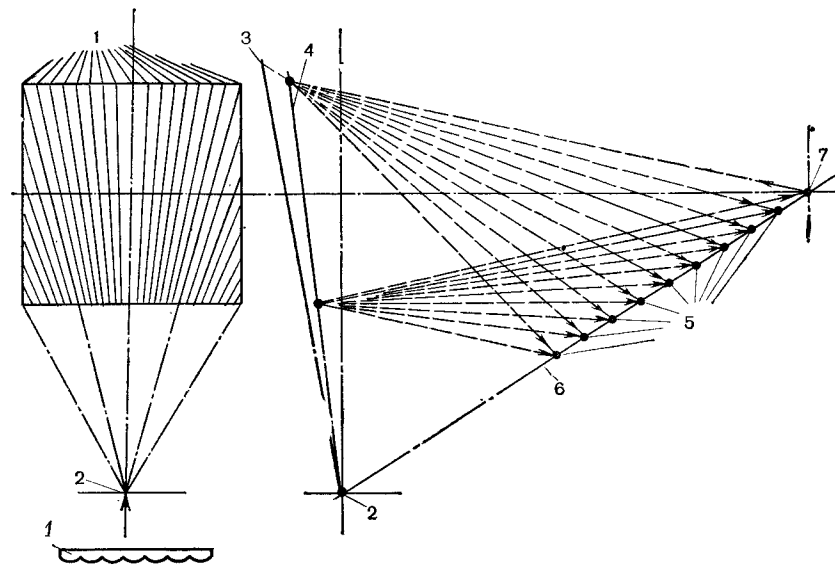


Рис. 81. Схема перспективного отражательного линзо-растрового экрана

установленная наклонно к линзам экрана приблизительно на расстоянии, равном их фокусному расстоянию; это расстояние, так же как и фокусное расстояние каждой линзы, уменьшается в направлении экрана сверху вниз.

Если главная плоскость линзового растра 4, с которой совпадают главные плоскости отдельных линз, и плоскость отражающей поверхности экрана 3 пересекаются по линии, проходящей через центр системы 2, фокусирующие центры 5 экрана располагаются в плоскости 6, которая также проходит через центр 2. Если в одном из фокусирующих центров экрана расположить проекционный объектив 7, остальные фокусирующие центры станут центрами зрительных зон, число которых определяется фокусным расстоянием линз растра и их шагом, т. е. расстоянием между смежными линзами. Поперечные размеры линз должны быть настолько малы, чтобы их угловые размеры по отношению к зрителю были в пределах разрешающей способности глаза, что делает незаметной растровую структуру экрана.

Перспективный линзо-растровый экран является линейно-фокусирующим только в горизонтальной плоскости и строит зоны видения для многих рядов зрителей.

На рис. 82 показан просветный линзо-растровый экран, где 1, 2 — линейные линзовые растры с одинаковыми параметрами; 3 — рассеивающий свет слой с диффузнонаправленным пропусканием. Пучок света, выходящий из точки 4, проходя через экран, фокусируется во множестве точек 5, лежащих в одной плоскости.

Линзо-растровый экран, показанный на рис. 82, имеет существенный недостаток — расположение зрителей только в одном ряду, что ограничивает области его практического применения.

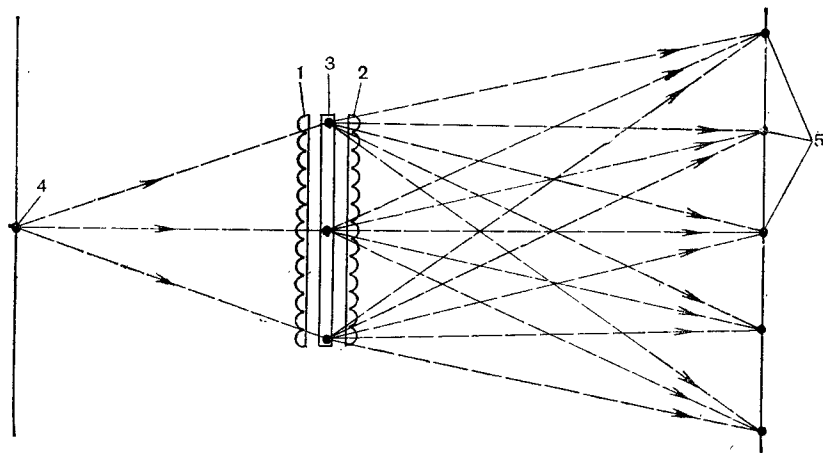


Рис. 82. Схема просветного линзо-растрового экрана

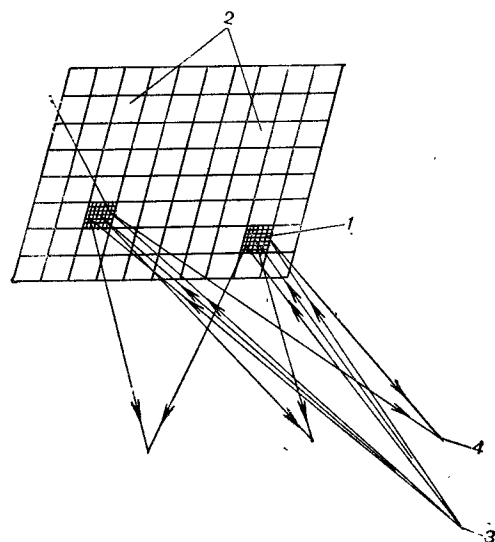


Рис. 83. Схема отражательного точечно фокусирующего зеркально-растрового экрана

Линзо-растровые экраны (рис. 81, 82) по сравнению с голографическими имеют меньшую светосилу и глубину резкости, что обусловлено фокусированием только в одной плоскости и применением диффузных поверхностей.

На рис. 83 показана схема точечно-фокусирующего зеркально-растрового экрана, разработанного М. С. Ивановым. Экран состоит из множества очень малых по размерам элементарных зеркал 1 с плоской отражающей поверхностью. Они образуют группы 2 с угловыми размерами по отношению к зрителю меньшими, чем разрешающая способность глаза. В каждой группе 2 каждое элементарное зеркало 1 отражает лучи света, падающие из первичного фокусирующего центра 3 в соответствующий вторичный фокусирующий центр 4. Число вторичных фокусирующих центров соответствует числу зрительных мест. Первичный фокусирующий центр 3 соответствует проекционному объективу.

Практическому применению такого вида экранов для больших аудиторий препятствует большая сложность, трудоемкость их изготовления, обусловленная очень большим числом элементарных зеркал, которое определяется следующим соотношением:

$$N = N_R N_z, \quad (1.24)$$

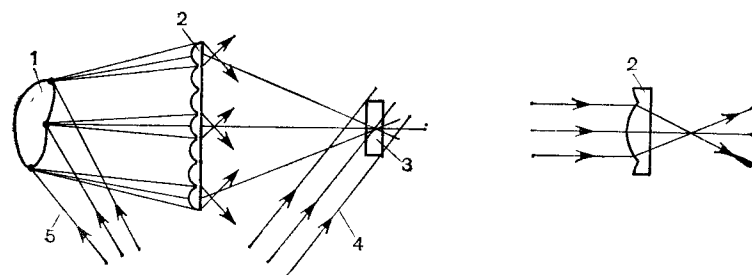
где N_z — число зрительских мест; N_R — число элементов разрешения, необходимых для передачи резкого изображения при заданных угловых размерах наблюдаемого изображения. Например, если принять $N_R = 2,5 \cdot 10^6$; $N_z = 4 \cdot 10^2$, то необходимое число элементарных зеркал в экране достигает, согласно формуле (1.24):

$$N = 2,5 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^2 = 10^9.$$

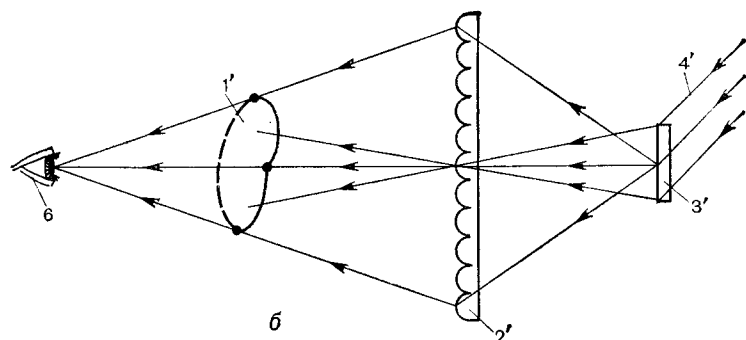
1.7.1. Краткий исторический обзор работ по созданию голографического кинематографа и голографического телевидения

Метод рассеивающей пластинки был предложен Гейнсом и Бруммом. В этом методе (рис. 84, а) объект 1 освещается когерентным светом 5. Лучи, отраженные от объекта, проходят через пластинку 2. Часть преломленных лучей проходит через киноплёнку 3, которая освещается также опорным пучком 4. На небольшой голограмме можно зарегистрировать изображение большого объекта 1 в широком диапазоне ракурсов, зависящем от ширины пластинки 2.

На рис. 84, б показана схема воспроизведения киноизображения. Голографический фильм 3' освещается восстанавливающим пучком 4' в противоположном направлении. Дифрагированные лучи проходят от фильма 3' к аналогичной рассеивающей пластинке 2',



а

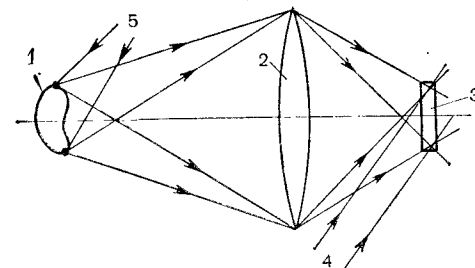


б

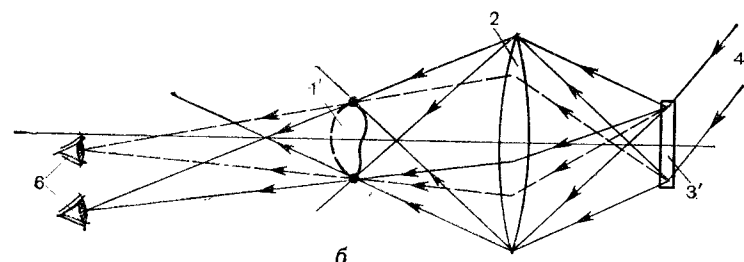
Рис. 84. Схема съемки (а) и воспроизведения (б) голографического фильма методом рассеивающей пластинки

преломляются и формируют в пространстве большое голографическое изображение 1', рассматриваемое зрителями 6. Это изображение является псевдоскопическим, однако возможно произвести обращение изображения в ортоскопическое.

Метод рассеивающей пластинки имеет низкую световую эффективность, так как малая часть световых лучей проходит через кино-



а



б

Рис. 85. Схема съемки (а) и воспроизведения (б) голографического фильма методом большой линзы

плёнку во время съемки. Но основной недостаток этого метода заключается в очень низком отношении сигнал/шум. Резкость и контраст изображения получаются неудовлетворительными, что можно объяснить следующим образом.

Размер рассеивающего элемента пластинки должен быть очень малым, меньше зрачка человеческого глаза, чтобы зритель не замечал структуру пластинки, а для достижения высокой резкости изображения необходимо, чтобы точность падения дифрагированных лучей на пластинку была очень высокой. Цель, в которую должен попасть дифрагированный луч, должна быть в сотни раз меньше, чем рассеивающий элемент. Для большой аудитории это означает, что aberrации восстановленных лучей должны быть меньше угловой секунды, что на практике достигнуть невозможно.

Метод большой линзы был исследован Лейтом, Бруммом и Хсиао. В этом методе (рис. 85, а) объект 1 освещается пучком когерентного света 5. Лучи, отраженные от объекта 1, фокусируются большой линзой 2 на киноплёнку 3, куда также падает опорный пучок

чок 4. Небольшой голографический фильм 3 может фиксировать изображение большого объекта 1. Диапазон ракурсов зависит от диаметра линзы 2. Изображение воспроизводится по схеме рис. 85, б. Голографический фильм 3' освещается восстанавливающим пучком 4'. Восстановленные лучи проходят от фильма 3' через лин-

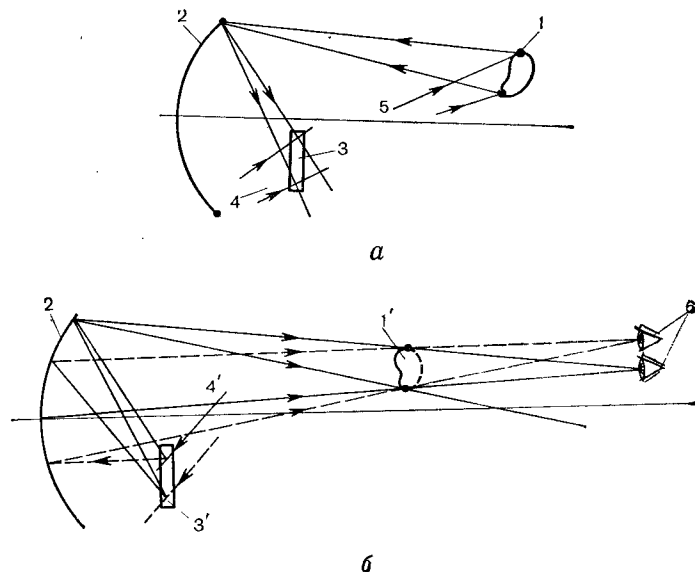


Рис. 86. Схема съемки (а) и воспроизведения (б) голографического фильма методом большого зеркала

зу 2, которая формирует в пространстве псевдоскопическое изображение 1' объекта для зрителя 6. Можно также осуществить обращение этого изображения.

Подобный метод не применим для большой аудитории, так как потребуется иметь линзу диаметром в несколько метров, что трудно осуществить. Кроме того, угол поля зрения линзы очень мал вследствие большого расстояния между линзой и пленкой (порядка одного градуса и менее), что тоже неприемлемо для кинематографа.

Метод большого зеркала рассматривал Ю. Н. Денисюк. Этот метод (рис. 86, а) похож на метод большой линзы, указанный выше. Большой объект 1 освещается когерентным пучком света 5. Лучи, отраженные вогнутым зеркалом 2, проходят через кинолентку 3 одновременно с опорным пучком 4.

На рис. 86, б показана схема воспроизведения киноизображения. Восстановленный пучок 4' дифрагирует на голограмме-фильме 3', отражается зеркалом 2 и формирует изображение 1' в пространстве. Зритель 6 может видеть объемное изображение 1'. Недостатки этого метода такие же, как метода большой линзы, поэтому не

представляется возможным пользоваться большими зеркалами ни для съемки, ни для проекции в больших аудиториях.

Метод больших цилиндрических линз предложен Д. Джоном. Этот метод отличается от метода большой линзы тем, что вместо сферических используют большие цилиндрические линзы (рис. 87, а).

В одном из вариантов изобретения применяют два разных вида оптики для съемки и проекции: большие цилиндрические линзы и

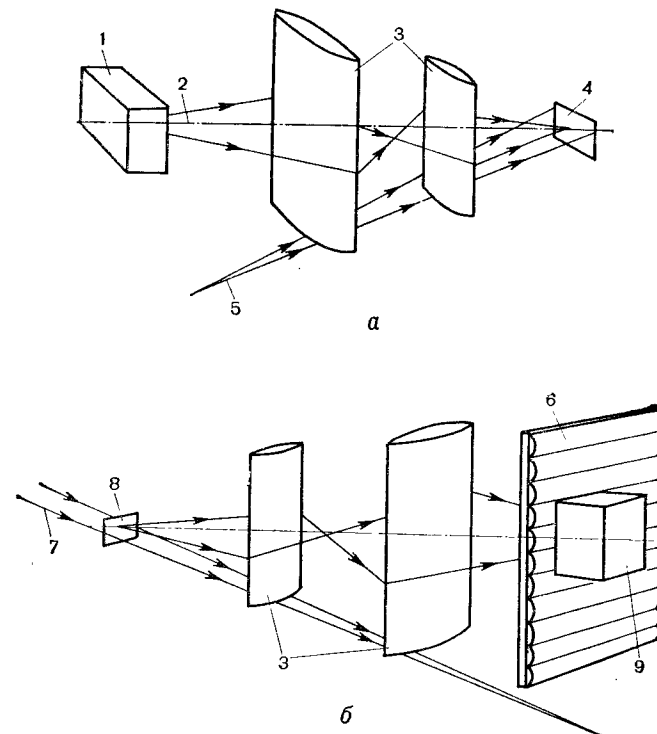


Рис. 87. Схема съемки (а) и воспроизведения (б) голографического фильма методом больших цилиндрических линз: 1 — объект; 2 — объектный пучок; 3 — цилиндрические линзы; 4 — голографическая пленка; 5 — опорный пучок; 6 — рассеивающая пластинка; 7 — восстанавливающий пучок; 8 — голограмма-фильм; 9 — восстановленное изображение

рассеивающую пластинку (рис. 87, б). Методу свойственны те же недостатки, что и предыдущим.

Голографический экран с зональным фокусированием был изобретен Д. Габорм. Его главное оптическое свойство заключается в следующем (рис. 88). Гомоцентрический пучок, падающий на экран 2 из определенной точки 1, отражается к зрительским местам. Отраженный свет формирует много параллельных зон 3, близко расположенных одна к другой. Поэтому каждый глаз видит только

одно изображение на экране. Изображения для правого и левого глаза являются различными. Экран был предложен для стерекинопроекции с одной стереопарой. Зритель может воспринимать стереоизображение без очков.

Данный метод имеет недостатки, которые присущи стереоскопическим методам, использующим одну стереопару: неестественное

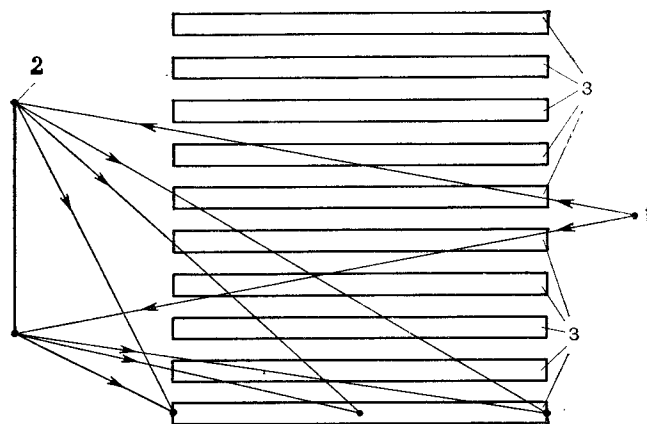


Рис. 88. Схема проекции трехмерного стереоскопического киноизображения с помощью зонально-фокусирующего голографического экрана

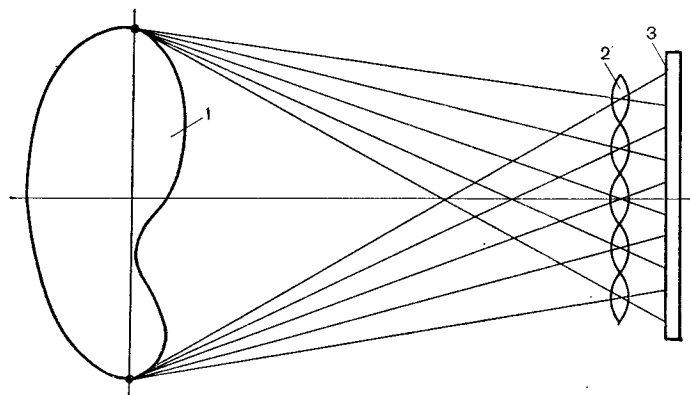


Рис. 89. Схема съемки в некогерентном свете многообъективным методом

сочетание конвергенции и аккомодации; отсутствие непрерывного изменения ракурса при смещении головы зрителя; зона стереоскопического видения слишком узкая, т. е. свободное поперечное смещение головы зрителя мало. Чтобы применить экран Габора для

цветной стереопроекции, необходимо изготовить специальный проектор. Это нужно для того, чтобы избежать недопустимых хроматических aberrаций.

Голографический экран с зональным фокусированием непригоден для проекции трехмерных голографических изображений, так как малый элемент голографического изображения передается им в виде большого пятна и невозможно обеспечить резкость голографического изображения.

Многообъективная съемка в некогерентном свете и преобразование первичного изображения в голограмму были предложены

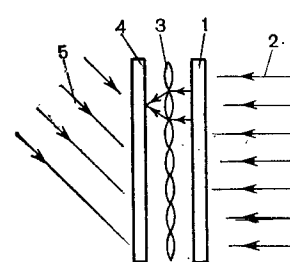


Рис. 90. Схема перевода изображений, снятых в некогерентном свете с помощью множества линз малого размера, в голографические

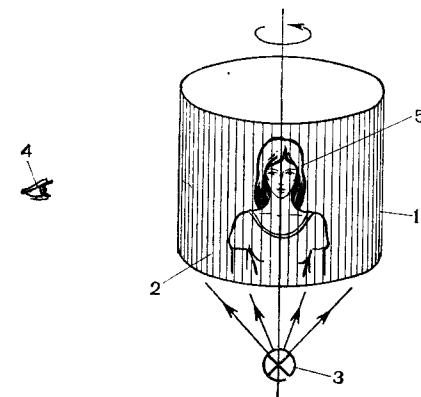


Рис. 91. Голографический барабан

Ю. Н. Денисюком. Схема многообъективной киносъемки показана на рис. 89. Объект 1 освещается некогерентным светом. Позади каждого объектива 2 на киноплёнке 3 одновременно регистрируются отдельные изображения, отличающиеся ракурсом. Эти изображения голографируются на одном и том же кадре, но под различными углами. Затем голографический фильм может быть воспроизведен.

Данный метод использован как важный элемент в системе голографического кинематографа, разработанной НИКФИ (см. раздел 1.5.1).

Р. Поль (США) изобрел метод изготовления голограмм с предварительной съемкой в некогерентном свете через множество маленьких линз 3. После этого первичные изображения 1 с помощью лучков 2, 5 когерентного света преобразуются в отражательные голограммы 4 (рис. 90). Однако применение этой схемы позволяет снимать на киноплёнку только малые объекты, и не предусмотрено никаких средств показа объемных киноизображений в больших аудиториях.

Голографический барабан был впервые предложен Кройсом (США) (рис. 91). Г. Грегуш, Т. Джонг с сотрудниками разработали процессы изготовления голографических барабанов на пленке 2, расположенной в виде цилиндра вокруг объекта. Круговая голограмма 5 образовывалась из большого количества узких вертикальных голограмм 1, записанных из плоских киноизображений, полученных методом объезда объекта.

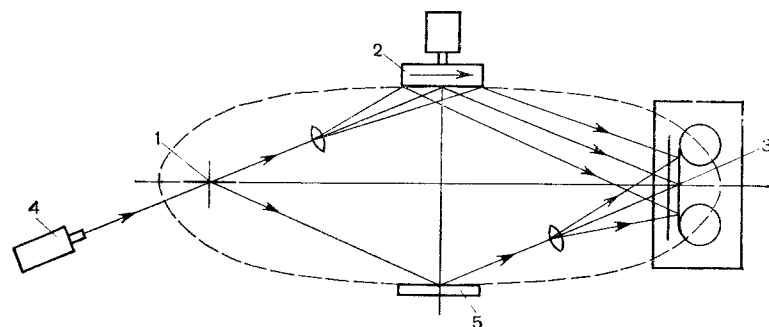


Рис. 92. Схема киносъемки объектов, движущихся по эллипсу

В СССР Ш. Д. Какичашвили в 1969 г. продемонстрировал круговые голограммы на цилиндрической пленке, снятые однократным экспонированием с помощью рубинового и гелий-неонового лазеров и оригинальной осветительной оптики. Круговые голограммы восстанавливаются с помощью лазера или точечной лампы накаливания 3 и наблюдаются на просвет зрителем 4, и объект виден внутри цилиндра, при вращении которого изображение может перемещаться. Метод нельзя использовать при создании продолжительных кинофильмов для больших аудиторий. Зритель 4 может видеть только очень кратковременное передвижение изображения 5.

Метод голографической киносъемки объектов, движущихся по эллипсу (рис. 92), был предложен Г. Куртцом (США) в 1973 г. Пригоден он для голографической киносъемки только в том случае, если объект 2 перемещается по эллипсу. При этом в одном из фокусов эллипса 1 расположен центр гомоцентрического пучка, освещающего объект съемки 2. Во втором фокусе расположено кадровое окно киносъемочного аппарата, через которое продергивается голографическая пленка 3. Так как длина пути распространения света от центра пучка (первый фокус) до объекта и затем до голографической кинопленки 3 не изменяется при перемещении объекта по эллипсу, можно производить голографическую киносъемку. На рис. 92: 1 — светоделительная пластинка; 4 — лазер; 5 — зеркало. Очень серьезным недостатком данного метода, препятствующим его практическому применению, является строго заданная траектория движения объекта съемки.

Метод голографической съемки и проекции с помощью комплекта плоских зеркал был предложен Т. Окоши (Япония) в 1976 г. При съемке (рис. 93, а) объект 1 освещается лазерным светом 2, который отражается от объекта и направляется зеркалами 3 на голографический фотослой 4, на который одновременно подается опорный пучок света 5 от того же лазера. Применение нескольких зер-

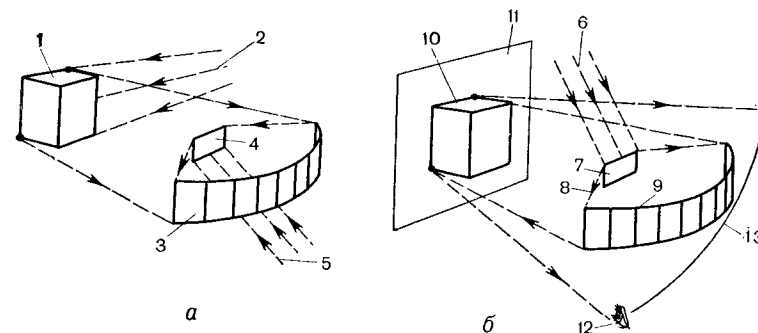


Рис. 93. Схемы голографической съемки (а) и проекции (б) с помощью комплекта плоских зеркал

кал позволяет зарегистрировать трехмерное изображение объекта в широком диапазоне ракурсов. При проекции (рис. 93, б) восстанавливающий пучок 6 лазерного света направляется на голограмму 7. Дифрагированный на голограмме пучок 8 падает на зеркала 9 и, отраженный от этих зеркал, формирует в пространстве трехмерное изображение 10 оригинального объекта. Это изображение, отраженное в зеркальном экране 11, рассматривается зрителем 12 в зрительной зоне 13.

Недостатком данной системы является низкая световая эффективность при съемке, обусловленная отсутствием объектива, поэтому можно снимать и воспроизводить лишь сцены малых размеров.

Все рассмотренные методы могут найти применение в различных областях для визуализации объемных изображений, но не имеют серьезных перспектив для художественного голографического кинематографа.

В марте 1985 г. К. Эйзикман и Г. Фиман (Франция) сняли короткий голографический кинофильм на 126-мм голографическую кинопленку фирмы «Agfa-Gevaert». Для киносъемки использовалась киносъемочная камера с непрерывным движением пленки и импульсный лазер Jag JK Lasers. Трехмерное монохромное голографическое киноизображение воспроизводилось с помощью устройства Visu-Laser 3D при частоте 24 кадра в секунду и при размере кадра 100×100 мм. Так как принципы данной системы не были опубликованы, то не представляется возможным оценить перспективы ее развития. Авторы системы предполагают к 1990 г. открыть голографический кинотеатр.

По мнению авторов книги, имеются технические возможности открыть отечественный голографический кинотеатр и показать в нем голографическую кинопрограмму с цветным трехмерным изображением по системе, разработанной в НИКФИ (см. главу I.5).

Поиски путей создания голографического телевидения ведутся со времени получения первых голографических изображений в лазерном свете. Однако произведенные на протяжении истекших лет оценки до сих пор не привели к появлению каких-либо конкретных идей, которые могли бы быть положены в основу создания систем голографического телевидения. Это обусловлено принципиальными особенностями телевизионных процессов, которые значительно уступают кинематографическим по максимальному количеству информации, которое может быть передано. При этом телевизионные системы более сложные и требуют более значительных затрат на их осуществление.

Потенциальные возможности телевизионных систем по передаче трехмерных многоракурсных изображений вместо двухмерных оказываются ниже потенциальных возможностей кинематографических систем. Переход на передачу трехмерных изображений требует увеличения объема информации более чем на порядок.

Современные телевизионные системы по сравнению с кинематографическими имеют экраны значительно меньших размеров, поэтому и зрители находятся на меньшем расстоянии от экрана. По этой причине использование предэкранного пространства в телевизионных системах для воспроизведения трехмерного изображения потребует передачи значительно большего числа ракурсов, чем при использовании предэкранного пространства в кинематографических системах.

В телевизионных системах все основные звенья: передающая трубка, видеомэгнитофон, телевизионный тракт, воспроизводящее устройство имеют недостаточно широкую полосу пропускания пространственных частот изображения, что обуславливает большие трудности решения задачи передачи трехмерных многоракурсных изображений.

Наиболее близкой перспективой передачи трехмерных изображений по телевидению является передача цветных стереоскопических изображений с двумя ракурсами. Такая система требует увеличения количества передаваемой информации по сравнению с обычной системой телевидения только в два раза, что технически вполне осуществимо.

Проверенные экспериментально в СССР, США, ФРГ такие стереоскопические системы дают высокое качество трехмерного изображения. Стереотелевизионные системы, в которых трехмерное изображение наблюдают с помощью поляризационных очков или растров (без очков), хорошо совмещаются с киноголографическими системами. При этом из трехмерных изображений голографического кинофильма могут быть легко извлечены две составляющие изображений горизонтальных ракурсов для передачи по телевидению.

1.7.2. Экспериментальные работы НИКФИ по созданию голографического кинематографа

После первых положительных результатов по съемке монохромного голографического кинофильма, продемонстрированного в 1976 г., в НИКФИ велись работы по проверке принципов цветного голографического кинематографа и созданию технических средств, которые включают: лазеры для съемки, копирования и проекции; оптику (киносъемочные и проекционные объективы, большие зеркала и линзы, различные оптические элементы); фотоматериалы

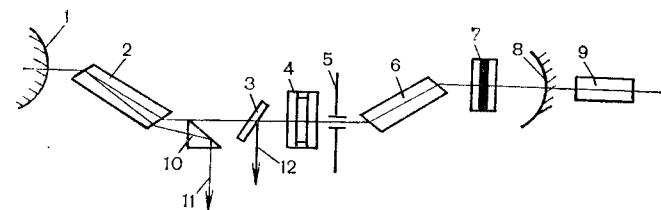


Рис. 94. Оптическая схема лазера на рубине: 1 — глухое зеркало усилителя; 2 — активный элемент усилителя; 3 — светоделительная пластинка; 4 — резонансный отражатель; 5 — диафрагма; 6 — активный элемент генератора; 7 — фототропный затвор; 8 — глухое зеркало генератора; 9 — юстировочный гелий-неоновый лазер ОКГ-13; 10 — призма; 11 — выходное излучение для освещения сцены; 12 — выходное опорное излучение

(пленки для съемки и копирования с лазерами непрерывного действия и импульсными, пластинки для голографического экрана); процессы обработки и проявочные машины; съемочную, копировальную и проекционную аппаратуру; вспомогательное электронное и механическое оборудование.

В настоящее время мы еще не располагаем импульсными лазерами и фотоматериалами с параметрами, достаточными для высококачественной голографической киносъемки. Зато благодаря значительному прогрессу в области особомелкозернистых фотоматериалов для изобразительной голографии на их основе удалось создать высококачественные двухслойные цветные кинопленки для съемки с лазерами непрерывного действия. Таким образом, работы в НИКФИ строились по двум направлениям: 1) создание импульсной лазерной техники и импульсных фотоматериалов и эксперименты по павильонным съемкам игрового голографического экспериментального фильма; 2) создание двухслойных цветных пленок и проверка принципов цветного голографического кинематографа путем экспериментальной съемки мультипликационного фильма с лазерами непрерывного действия.

Лазеры. Для импульсной цветной голографической киносъемки разработаны экспериментальные образцы двух твердотельных лазеров на промышленных активных элементах — рубине и гранате.

Оптическая схема лазера на рубине приведена на рис. 94. Лазер состоит из задающего генератора и двухпроходного усилителя. Ге-

нератор включает: активный элемент 6, резонатор, диафрагму 5, фототропный затвор 7, импульсную ксеноновую лампу-вспышку накачки. Активный элемент — кристалл рубина диаметром 10 мм с фрезерованной активной частью прямоугольного сечения 10×3 мм, длиной 120 мм. Рубиновый стержень имеет лейкосапфировые наконечники, срезанные под углом Брюстера. Прямоугольное сечение облегчает стержень, улучшает теплоотвод и распределение энергии в сечении пучка. Резонатор лазера образуется глухим задним сферическим зеркалом 8 с радиусом кривизны 2 м и двухэлементным резонансным отражателем 4, обеспечивающим селекцию продольных мод и служащим зеркалом. Длина резонатора около 1,8 м выбрана экспериментально из условия оптимизации уровня энергии и однородности излучения. Перед выходным зеркалом установлена диафрагма 5 диаметром 1—1,2 мм для селекции поперечных мод. Такая конструкция резонатора позволяет получить распределение энергии в пучке, близкое к дифракционному. При наблюдении в дальней зоне распределение имеет главный максимум и четко выраженные зоны Френеля. Длина волны генерации 0,694 мкм.

Модуляция добротности осуществляется фототропным затвором 7, представляющим собой кювету толщиной 3 мм с раствором криптоцианина в метаноле. При работе в частотном режиме применяют магнитную мешалку, восстанавливающую оптическую однородность раствора красителя за период между импульсами генерации.

Усилитель включает: рубиновый стержень 2 круглого сечения диаметром 8 мм с активной частью, длиной 120 мм и лейкосапфировыми наконечниками, срезанными под углом Брюстера; глухое заднее зеркало 1 с радиусом кривизны 2 м, частично компенсирующее линзовость кристалла рубина; импульсную ксеноновую лампу накачки.

Получены следующие рабочие характеристики рубинового лазера: энергия излучения задающего генератора 30 мДж; энергия на выходе двухпроходного усилителя 0,1 Дж; частота повторения импульсов 6 Гц; длительность импульсов в режиме модуляции добротности 50 нс.

Конструктивно лазер выполнен в виде рамы из инваровых стержней, соединенных между собой перегородками из алюминиевого сплава. На раме закреплены головки генератора и усилителя и оптические элементы схемы. Головки генератора и усилителя идентичны и имеют трубчатую конструкцию, закрытую с двух сторон фланцами. Внутри конструкции находится осветитель в виде кварцевого цилиндрического блока, в цилиндрические продольные отверстия которого вставляются линейная лампа-вспышка и рубиновый стержень. Кварцевый блок снаружи имеет стойкое многослойное диэлектрическое отражающее покрытие с коэффициентом отражения, близким к 100% в сине-зеленой области, и пропускающее красное и ИК излучение. Трубчатая конструкция предусматривает водяное охлаждение элементов головки от водопроводной сети.

Оптическая схема экспериментального импульсного лазера на

гранате приведена на рис. 95. Лазер включает задающий генератор, двухкаскадный усилитель, устройство согласования генератора и усилителя и преобразователь излучения во вторую гармонику.

Задающий генератор состоит из активного элемента 4 на кристалле граната размером 3×35 мм круглого сечения и резонатора, образованного выходным резонансным отражателем 5 и резонанс-

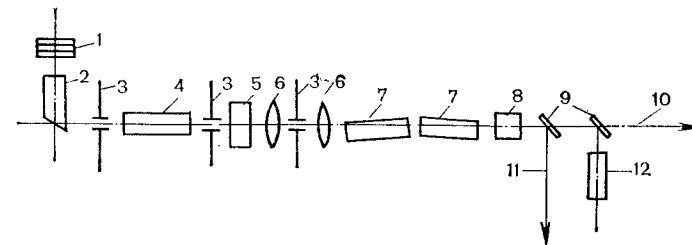


Рис. 95. Оптическая схема лазера на гранате: 1 — трехэлементный резонансный отражатель; 2 — электрооптический затвор; 3 — диафрагма; 4 — активный элемент генератора; 5 — резонансный отражатель; 6 — телескоп; 7 — активный элемент усилителя; 8 — преобразователь излучения во вторую гармонику; 9 — светоделительная пластинка; 10 — выход освещающего сцену пучка; 11 — выход опорного пучка; 12 — юстировочный гелий-неоновый лазер ОКГ-13

ным отражателем 1 в виде трехэлементной стопы. Длина волны генерации 1,06 мкм. Модуляция добротности осуществляется электрооптическим затвором на кристалле DKDP. Резонансный отражатель обеспечивает селекцию продольных мод и одночастотный режим. Для селекции поперечных мод применены две диафрагмы 3 диаметром 1,5 мм. Для накачки используют ксеноновую импульсную лампу-вспышку.

Усилитель выполнен на двух кристаллах граната размером 6×90 мм круглого сечения, которые наклонены под углом $\pm 2^\circ$ к оптической оси для уменьшения возможности возникновения режима свободной генерации в усилительном каскаде. Излучение задающего генератора и усилителя согласуется телескопической системой 6 с диафрагмой 3, обеспечивающей развязку каскадов генерации и усиления. Для накачки усилительного каскада также используют ксеноновую лампу-вспышку.

Излучение с выхода усилителя с помощью нелинейного кристалла преобразуется во вторую гармонику с длиной волны 0,53 мкм.

Конструкция лазера на гранате подобна конструкции рубинового лазера. Несущая рама также выполнена из четырех инваровых стержней с поперечными элементами жесткости из алюминиевого сплава, на которых установлены юстировочные приспособления для настройки элементов лазера. Головки задающего генератора и усилителя имеют трубчатую конструкцию, в которой размещается посеребренный кварцевый блок с активным элементом и лампой накачки. Охлаждение — от автономной замкнутой системы водным раствором хромовокислого калия с внешним контуром теплообмена от городского водопровода.

Получены следующие характеристики лазера: энергия задающего генератора 5—7 мДж; длительность импульса генератора 20 нс; энергия с выхода усилителя 0,3—0,4 Дж; длительность импульса 15 нс; после удвоения частоты энергия 0,1 Дж, длительность импульса 12 нс. Частота повторения импульсов до 24 Гц.

Экспериментальная оценка работы образцов рубинового и гранатового лазеров показала возможность их использования в частотном режиме для съемки киноголограмм (см. ниже описание им-

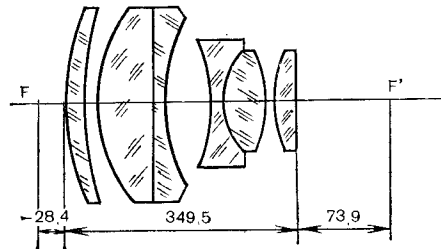


Рис. 96. Оптическая схема проекционного объектива с диаметром зрачка 290 мм

пульсной киноголографической установки). Выявлены следующие необходимые направления доработки экспериментальных образцов. Для рубинового лазера достигнутая частота повторения 6 Гц является предельной при данном способе охлаждения и блоке питания. Это ограничение устранимо. Для повышения частоты повторения требуются более совершенная система охлаждения и более мощный блок питания. Частоту повторения можно также увеличить, повысив эффективность накачки путем использования люминесцирующих охлаждающих сред и ртутных ламп накачки.

Возможен принципиально другой путь: для генерации в красном диапазоне использовать лазер на гранате, работающий с частотой повторения до 24 Гц, отдельный или тот же, что и для генерации зеленого излучения. При этом получают генерацию на линии 1,318 мкм с последующим удвоением частоты до 0,659 мкм.

Оптика. Импульсные съемки производились с объективом ОКГ-2, проекция — с ОПГ-1 (см. раздел 1.6.1). В цветных мультипликационных съемках использовался объектив Рейксар с диаметром зрачка 200 мм, фокусным расстоянием 150 мм и лучше исправленным хроматизмом (фото 12). Для экспериментальной системы голографического кинематографа рассчитан объектив со световым диаметром зрачка 290 мм и фокусным расстоянием 250 мм (относительное отверстие 1 : 0,89), углом поля зрения 15°20', исправленный для длины волны 0,546 мкм и ахроматизированный для длин волн 0,434 и 0,656 мкм (рис. 96).

Для съемки голографического экрана изготовлено сферическое вогнутое алюминированное стеклянное зеркало диаметром 1,3 м с радиусом кривизны 4 м и фокусным расстоянием 2 м. Зеркало фор-

мировало сходящийся гомоцентрический пучок большого диаметра и позволяло получить высококачественный цветной голографический экран (см. ниже). Разрабатывается сферическое зеркало диаметром 2,5 м, с радиусом кривизны 8 м, фокусным расстоянием 4 м.

Создана вакуумная установка катодного напыления и разработаны методики интерференционных покрытий, стойких к лазерному излучению и механически прочных для всех длин волн. На ней изготовлены зеркала для экспериментальных лазеров и оптических схем съемки, копирования и проекции, а также многослойные диэлектрические покрытия для осветительной оптики импульсных лазеров.

Фотоматериалы. В распоряжении голографистов еще нет серийно выпускаемых фотоматериалов для цветной голографии — ни на стекле, ни на гибкой подложке. Благодаря большому количеству исследований разработаны материалы только для монохромной съемки типа ЛОИ, ПЭ, имеющие при сравнительно высокой чувствительности достаточное отношение сигнал/шум. В НИКФИ были оптимизированы процессы синтеза и сенсibilизации эмульсий типа ПЭ и созданы фотослои, чувствительные к зеленой и красной областям спектра, с высокой дифракционной эффективностью и отношением сигнал/шум для съемки отражательных и пропускающих голограмм с лазерами непрерывного излучения. На основе этих слоев разработаны способы двухслойного полива на стекло для цветной изобразительной голографии и изготовления экранов и на гибкую подложку для цветной киносъемки на двух длинах волн. Экспозиционные характеристики двухслойного цветного фотоматериала для изобразительной голографии приведены на рис. 97.

Для голографического кинематографа изготовлена двухслойная киноплёнка шириной 70 мм.

Особомелкозернистая эмульсия синтезировалась методом последовательного вымораживания и оттаивания. На триацетатную основу с сажевым противоореальным слоем поливались два слоя: нижний, сенсibilизированный к зеленой зоне спектра ($\lambda = 0,514$ мкм), верхний — к красной ($\lambda = 0,647$ мкм). Общая толщина эмульсионного слоя 15—18 мкм. Пленки испытывались по схеме в сходящихся пучках при соотношении энергий в пучках 1 : 1 и угле между ними 40°. Двухслойные образцы экспонировались отдельно: на длине волны 0,633 мкм для оценки параметров красночувствительного слоя и 0,514 мкм — зеленочувствительного. Пленки обрабатывались в проявителях Д-19 и МГ-6, отбеливались ферроцианидным отбеливателем со стабилизацией в растворе йодистого калия. Зависимость полученного отношения сигнал/шум от экспозиции при обработке в Д-19 (кривая 1) и МГ-6 (кривая 2) приведена на рис. 98. Зависимость дифракционной эффективности от экспозиции для длин волн записи 0,633 и 0,514 мкм (кривые 1 и 2, соответственно) приведена на рис. 99. Восстановление производилось на длинах волн записи. При обработке в МГ-6 в течение 16 мин получены следующие наилучшие результаты. При записи на 0,633 мкм:

$\eta = 72\%$; $H = 5500$ эрг/см²; $\frac{S}{N} = 106$. При записи на 0,514 мкм:
 $\eta = 45\%$; $H = 6300$ эрг/см²; $\frac{S}{N} = 46$. Пленка обладает высокой стабильностью параметров во времени: испытания непосредственно после полива пленки и год спустя (при хранении в холодильнике) показали близкие результаты.

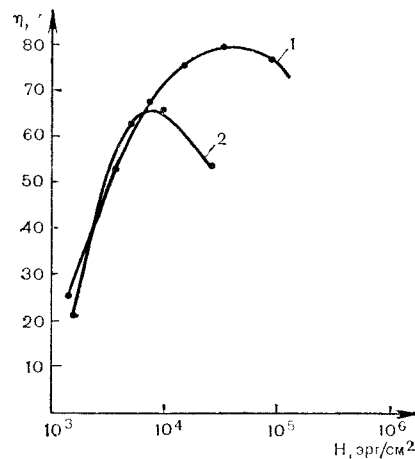


Рис. 97. Зависимость дифракционной эффективности от экспозиции цветного двухслойного отбеленного фотоматериала для изобразительной голографии и изготовления экрана при раздельном экспонировании: 1 — длина волны записи 0,633 мкм; 2 — длина волны записи 0,514 мкм

Фотоматериал для отражательного цветного экрана исследовался в следующих направлениях.

Особенностью голографического множительного фокусирующего экрана является необходимость регистрации в одном фотослое большого числа голограмм, что ведет к снижению дифракционной эффективности.

В результате оптимизации параметров фотоматериала для экрана (толщины слоя, показателя поглощения неэкспонированного слоя, отношения содержания серебра к желатине) и условий экспонирования при последовательной съемке голограмм получены следующие данные. Дифракционная эффективность n -й голограммы η_n не следует закону $\eta_n = \frac{\eta_1}{n^2}$, где n — число наложенных голограмм, η_1 — дифракционная эффективность при однократной записи, как следует из литературы, а убывает медленнее, что подтверждено экспериментально (рис. 100). Первые эксперименты по записи фрагментов голографического цветного экрана на фотоматери-

але с двумя слоями, чувствительными к зеленому (внешний слой) и красному (внутренний) диапазонам спектра дали положительные результаты. Однако изучение спектральной селективности образцов и опыты по проекции цветных голографических изображений показали, что вследствие боковых лепестков отражательный экран, записанный красным излучением, может иметь в зеленой области

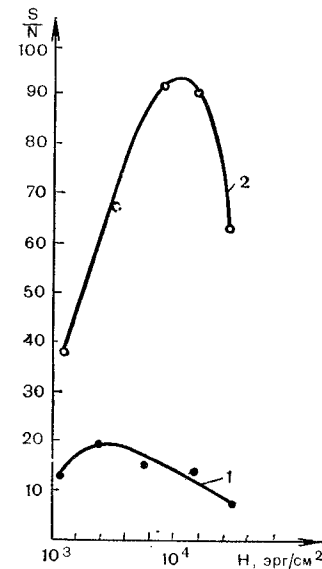


Рис. 98. Зависимость отношения сигнал/шум (S/N) от экспозиции для двухслойной цветной голографической киноплёнки НИКФИ

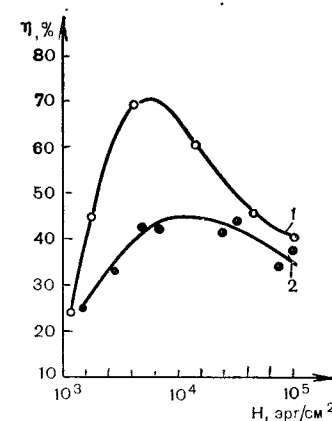


Рис. 99. Зависимость дифракционной эффективности от экспозиции для двухслойной цветной голографической киноплёнки НИКФИ

дифракционную эффективность до нескольких процентов, что может привести к заметным зрителям ложным изображениям при цветной проекции (рис. 101).

С целью устранения боковых лепестков полномасштабный экран, использованный затем для проекции цветного фильма, был изготовлен в виде многослойной модели, где для дополнительной спектральной фильтрации между светочувствительными слоями был нанесен дополнительный фильтровый слой желатины, содержащий краситель с резким спадом пропускания в области 0,58 мкм (рис. 102).

Экспериментальные киносъемки с импульсными лазерами производились на фотопленках фирмы «Agfa-Gevaert». Для съемок с рубиновым лазером использовалась пленка 8E75HD, с гранатовым — 8E56.

Процессы обработки. Параметры фотоматериалов типа ПЭ (НИКФИ) для записи монохромных отражательных голограмм

(изобразительных или экрана, снятых с непрерывным лазером в красной области) были оптимизированы при обработке в проявителе типа ГП-2 (см. раздел 1.3.2). Прочие проявители серии ГП (ГП-3, ГП-8, ГП-11) были опробованы и дали сходные результаты без каких-либо качественных улучшений. Поэтому для обработки монохромных изобразительных голограмм, а затем и красной ком-

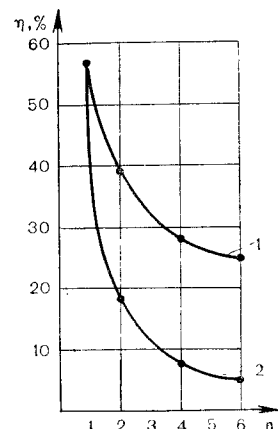


Рис. 100. Зависимость дифракционной эффективности экрана от числа зон: 1 — дифракционная эффективность, определяемая суммарной интенсивностью сигнальных пучков во всех зонах; 2 — средняя дифракционная эффективность, деленная на число зон. Последовательное экспонирование

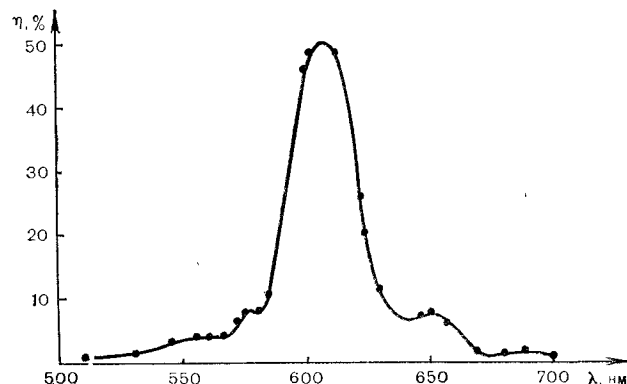


Рис. 101. Зависимость дифракционной эффективности от длины волны для фрагмента экрана, зарегистрированного красным излучением



Рис. 102. Структура многослойного голографического отражательного экрана: 1 — защитная пластинка; 2 — красная компонента; 3 — зеленая компонента; 4 — слой, отражающий свет в зеленой части спектра; 5 — красный фильтровый слой; 6 — слой, отражающий свет в красной части спектра; 7 — светопоглощающее покрытие

поненты голографического экрана применялся проявитель ГП-2. Его недостаток — усадка слоя при обработке, в результате чего максимум дифракционной эффективности сдвигается в более коротковолновую область. Это недопустимо при изготовлении экрана, который работает в системе проекции с той же длиной волны, что была использована при его записи. Поэтому для стабилизации толщины слоя производился предварительный прогрев пластинки перед экспонированием, исключалась операция фиксирования, а при синтезе эмульсии для экрана подбиралась желатина с меньшей растворимостью. При такой обработке материал при съемке во встречных пучках имеет дифракционную эффективность более 50%.

Для обработки зеленой компоненты отражательного экрана и двухслойных материалов для съемки отражательных и пропускающих голограмм с лазером непрерывного излучения использовался процесс с отбеливанием, состоящий из следующих операций:

Режим	Время
Проявление в МГ-6 (см. раздел 1.3.2.)	до 20 мин
Стоп-ванна с уксусной кислотой	1 мин
Ополаскивание	
Фиксирование в быстром фиксаже	7 мин
Промывка в проточной воде	10—15 мин
Отбеливание в ферроцианидном отбеливателе	
Ополаскивание	
Стабилизация в растворе йодистого калия (концентрация до 4%)	4 мин
Промывка в проточной воде	20—30 мин
Двухступенчатая спиртовая сушка	

Концентрация стабилизирующей ванны выбирается с учетом усадки, которая получается при обработке за счет вымывания желатины и солей. При концентрации около 4% происходит утолщение эмульсионного слоя. Стабилизирующая ванна служит, таким образом, не только для защиты от засветки, но и для регулирования толщины слоя.

После спиртовой сушки пластинки целесообразно подвергать термическому дозадубливанию, тогда в дальнейшем толщина слоя в процессе хранения и эксплуатации более стабильна.

Если требуется еще большая стабильность голограмм при воздействии света, целесообразно во вторую спиртовую ванну ввести оптические десенсибилизаторы (пинокриптол, феносафранин и т. д.), а также химический стабилизатор и антиуалент (бензотриазол, бензимидазол нитрат, 1-фенил-5-меркаптотетразол).

Время проявления цветной пленки составляло 12—15 мин и определялось в результате исследования кинетики проявления по значениям отношения сигнал/шум.

Процесс с отбеливанием для обработки импульсных фотоматериалов такой же, как для цветных пленок при съемке в непрерывном излучении лазеров.

Исследовались разные отбеливатели, и выбран ферроцианидный следующего состава:

Красная кровяная соль	30 г
Калий бромистый	15 г
Калий фосфорнокислый однозамещенный	17 г
Вода	до 1 л

Он отличается равномерностью дифракционной эффективности по площади голограммы или кинокадра даже при «невычищенном» опорном пучке, образующем кольца и пятна на поверхности, что особенно существенно при импульсной съемке, когда фильтрация пучка затруднена.

Для обработки импульсной голографической киноплёнки 8E75HD и 8E56 фирмы «Agfa-Gevaert» использовался не рекомендованный фирменный проявитель, а гидрохиноновый поверхностный проявитель НИКФИ (см. раздел I.3.2). После проявления и промывки проводились следующие операции: стоп-ванна, промывка, отбеливание в ферроцианидном проявителе с бромистым калием, промывка, стабилизация в 4%-ном растворе йодистого калия, промывка и спиртовая сушка. Этот процесс обеспечивает повышенное значение отношения сигнал/шум, что объясняется, по-видимому, следующим. Проявляющее вещество, находящееся в растворе в окисленной форме, прокрашивает желатиновый слой фотопленки в коричневый цвет. Прокрашивание остается после полной обработки, уменьшая светорассеяние.

Экспериментальная установка для съемки цветного объемного голографического мультипликационного фильма. Цветной голографический кинокадр представляет собой мультиплексную голограмму, состоящую из двух сфокусированных голограмм, одновременно зарегистрированных в двух слоях пленки, сенсibilизированных к красному и зеленому диапазонам длин волн. Такая двухслойная голограмма воспроизводит два перекрывающихся цветоделенных изображения, каждое в своем диапазоне спектра. Оптическая схема съемки цветного объемного голографического фильма приведена на рис. 103. Запись велась на линиях излучения аргонового лазера 0,514 и криптонового 0,647 мкм на двухслойной пленке, описанной выше. Средний угол между опорным и объектным пучками в красном и зеленом каналах составлял около 56°. Съемка мультипликационных экспериментальных фильмов производилась на лабораторной съемочной площадке, предназначенной для получения изображительных голограмм. Базой площадки служил амортизированный голографический стол размером 2500×4000 мм, разработанный в НИКФИ (см. раздел I.4.1). На столе размещались: голографическая киносъемочная камера, элементы оптической схемы съемки, поворотный стол с объектами съемки. Два лазера «Spectra Physics» модель 171 и часть оптических элементов были установлены на площадке, поднятой над столом на 2000 мм и жестко связанной с ним. Вспомогательные блоки и электронное временное устройство управления съемочной камерой, затворами, поворотным столом, ва-

куумным фильмовым каналом вынесены за пределы голографического стола. Общий вид съемочной площадки приведен на фото 10.

Первый экспериментальный цветной голографический мультипликационный фильм не имел какого-либо сюжета. Его съемка имела научно-техническое значение. В качестве объектов съемки были

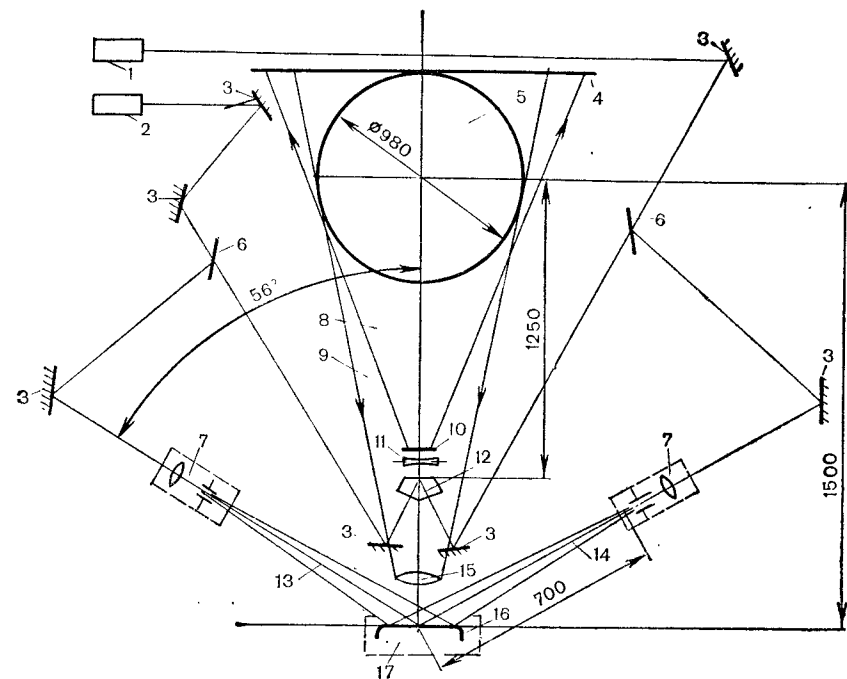


Рис. 103. Схема съемки цветного объемного голографического мультипликационного кинофильма: 1 — аргоновый лазер; 2 — криптоновый лазер; 3 — зеркало; 4 — задний план; 5 — поворотный стол с объектами съемки; 6 — светоделиватель; 7 — расширитель пучка; 8 — осветительный пучок; 9 — объектный пучок; 10 — светорассеивающий элемент; 11 — вогну́тая линза; 12 — призма; 13 — опорный пучок красный; 14 — опорный пучок зеленый; 15 — съемочный объектив; 16 — голографическая пленка; 17 — съемочная камера

выбраны предметы из дерева, бронзы, серебра, хрусталя, фарфора, пластмассы с различной фактурой и окраской, которые жестко укреплялись на массивном поворотном столе. Перемещение объектов в кадре задавалось движением стола, который дискретно поворачивался вокруг своей оси синхронно с работой съемочной камеры.

Снимаемая сцена, включающая поворотный стол с объектами и неподвижный задний план (фото 1), освещалась расходящимся пучком, содержащим зеленое и красное излучения лазеров, совмещенные с помощью призмы. Соотношение уровней мощности лазерных источников выбиралось на основе визуальной оценки правильности передачи белого цвета. Мощность излучения криптонового лазера составляла 800 мВт, аргонового 1,2 Вт. Для расширения пучка, освещающего общий план сцены, была применена система из отри-

пательной линзы и двух недиафрагмированных гексагональных линзовых растров. Кроме того, часть энергии освещающего пучка отбрасывалась системой зеркал для подсветки переднего плана сцены, а другая — для освещения сверху. Сформированы были также отдельные пучки для создания бликов на зеркальных и преломляющих поверхностях объектов съемки с целью увеличения динамического диапазона яркостей. Общий вид оптической системы, формирующей освещающие пучки, приведен на фото 15.

Для съемки использовался сверхсветосильный объектив Рейксар, жестко связанный со съемочной камерой.

Киноголографическая съемочная камера создана на базе 70-миллиметровой кинокамеры с 10-перфорационным шагом кадра, сконструированной ранее для съемки двухмерных изображений. Размер кадра 47×52 мм. Собственно от исходной кинокамеры использован корпус и лентопротяжный механизм с покадровым мотором. Корпус кинокамеры и подставка объектива жестко скреплены между собой и с голографическим столом. Корпус и подставка механически доработаны и обеспечивают прохождение опорных пучков в пленочный канал.

Особые требования предъявлялись к пленочному каналу, который должен обеспечивать плоскостность и неподвижность пленки в кадровом окне в течение экспозиции с голографической точностью. При данной схеме и геометрии съемки, имеющихся лазерных источниках и чувствительности применяемого фотоматериала требуемая экспозиция составляла 20 с. Сконструирован специальный пленочный канал с вакуумным прижимом поверхности пленки со стороны подложки к полированной алюминиевой поверхности на

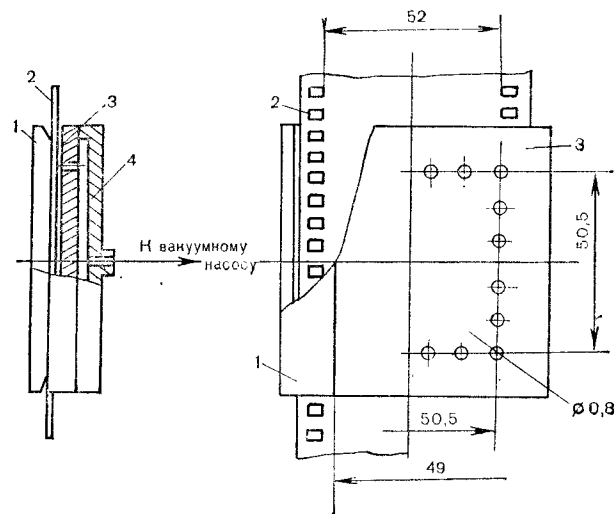


Рис. 104. Вакуумный пленочный канал: 1 — прижимные полозья; 2 — голографическая пленка; 3 — полированная базовая поверхность; 4 — крышка с полостью

время, несколько превышающее длительность экспозиции с небольшим упреждением. Управление переключением вакуумного пленочного канала с помощью электромагнитного клапана, а также работой покадрового мотора и лентопротяжного механизма осуществлялось от программного устройства. Схема конструкции вакуумного пленочного канала показана на рис. 104.

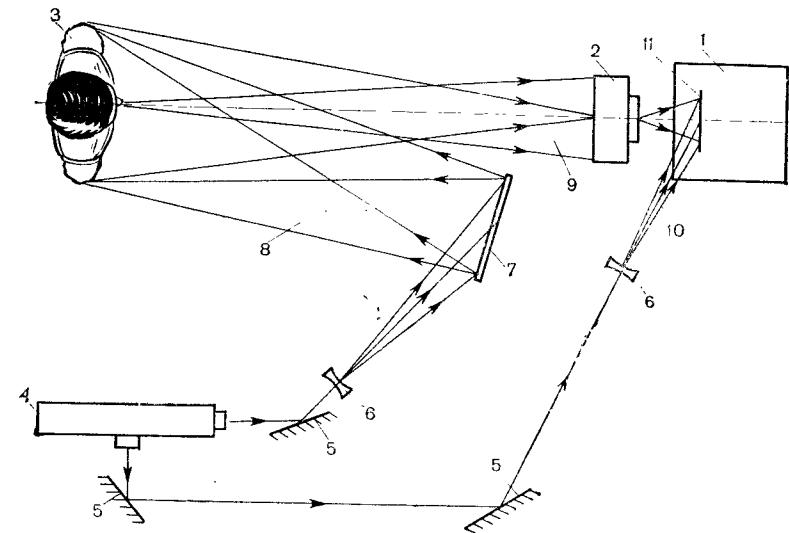


Рис. 105. Схема импульсной голографической киносъемки: 1 — съемочный аппарат; 2 — объектив; 3 — объект съемки; 4 — импульсный лазер; 5 — зеркало; 6 — расширительная линза; 7 — светорассеивающая пластинка; 8 — освещающий пучок; 9 — объективный пучок; 10 — опорный пучок; 11 — голографическая киноплёнка в кадровом окне

Для управления поворотным столом с объектами съемки сконструирован специальный шаговый механизм, задающий длительность работы отдельного покадрового мотора и угол поворота стола. Программным устройством установлено время работы мотора 6 с, за которое стол поворачивается на 40 угловых минут.

Затворы, перекрывающие освещающие и опорные пучки на время перемотки пленки и выстаивания системы и открывающие каналы съемки, приводятся в действие от того же программного устройства.

Длительность съемки одного кадра, включающая протяжку пленки, выстаивание, вакуумирование пленки и экспонирование, составляла 40 с. Полное время съемки при повороте стола на 360° равно 6 ч.

Пленка обрабатывалась в баке емкостью 30 м, как указано выше.

На фото 17 а, б показаны кинокадры мультипликационного цветного голографического фильма.

Эксперименты по импульсной голографической киносъемке проводились на лабораторной съемочной площадке, оборудованной рубиновым и гранатовым лазерами, описанными выше. Схема съемки

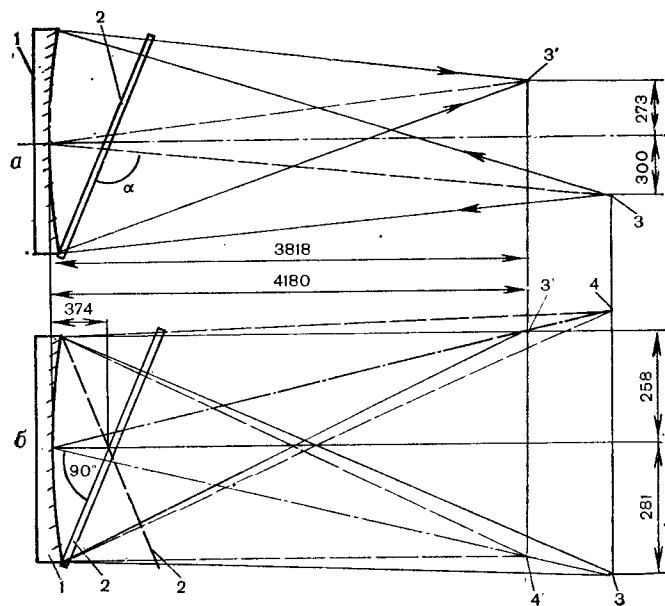


Рис. 106. Схема записи голографического экрана на 2 зоны: а — вид сбоку; б — вид сверху

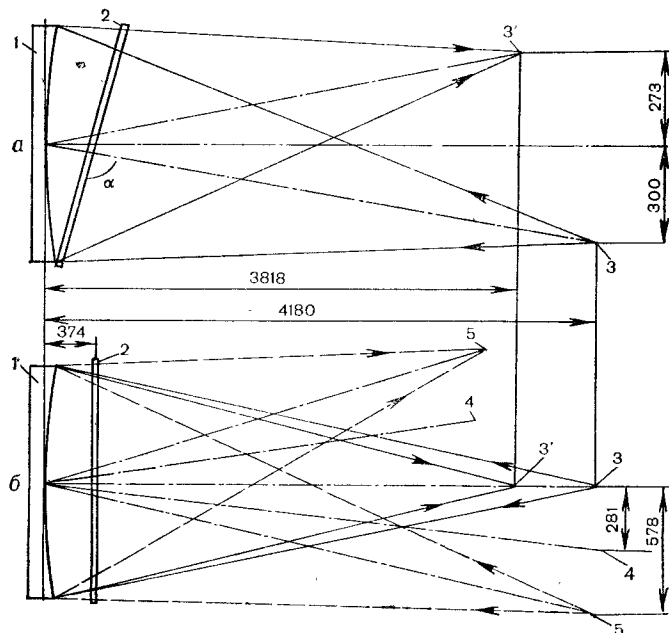


Рис. 107. Схема записи голографического экрана на 5 зон: а — вид сбоку; б — вид сверху

приведена на рис. 105. Глубина сцены составляла 2 м, поперечные размеры 1×1 м. Кинокамера типа 10-ОП-К была модернизирована для голографической киносъемки на 70-мм кинолентку с 10-перфорационным шагом кадра. Размер кинокадра 47×52 мм.

Грейферный механизм обеспечивал высокую устойчивость изображения. Применялся объектив ОКГ-2. Главным объектом съемок был человек, действующий в пределах ограниченного объема отображаемого пространства. Съемки в зеленой и красной зонах спектра проводились поочередно на разных пленках (8Е75НД и 8Е56). Общий вид съемочной площадки показан на фото 16. Кадры фильма, снятого с рубиновым лазером, приведены на фото 18.

Запись голографического экрана. Цветной голографический экран изготавливался из двух пластинок, одна из которых, чувствительная к зеленой области спектра, экспонировалась с помощью аргонового лазера с длиной волны 0,514 мкм, другая, чувствительная к красной области, — с помощью криптонового лазера с длиной волны 0,647 мкм. После обработки пластинки совмещались, образуя двухкомпонентный экран, таким образом, что ближе к проекционному объективу располагалась пластинка, отражающая зеленый свет.

Схема записи экрана на 2 и 5 зрительных зон приведена на рис. 106 и 107. Каждая компонента экрана записывалась на отдельной пластинке размером 1×0,8 м с помощью сферического зеркала 1 диаметром 1300 мм и фокусным расстоянием 2000 мм способом последовательного экспонирования отдельно для каждой зоны. Зеркало установлено на голографическом столе неподвижно в вертикальном положении. Лазер с оптической схемой формирования освещающего пучка перемещался от одной зоны к другой в соответствии с геометрией съемки.

При записи первой зоны на фотопластинку 2 падали два пучка света: расходящийся опорный с центром в точке 3 и сфокусированный зеркалом сходящийся объектный пучок с центром в точке 3'. Для второй и третьей зон центры пучков находятся, соответственно, в точках 4 и 4', 5 и 5'.

Фотопластинка 2 была удалена от центра зеркала на расчетное расстояние 374 мм и устанавливалась при экспонировании каждой зоны таким образом, чтобы в горизонтальной плоскости она была перпендикулярна осевой линии опорного пучка, объединяющей центр опорного пучка с центром зеркала, а в вертикальной составляла с ней угол $\alpha = 92^\circ 30'$. (Положение 2' соответствует записи второй зоны.)

Четвертая и пятая зоны расположены симметрично второй и третьей относительно вертикальной плоскости, проходящей через оптическую ось зеркала.

На изготовленный таким образом голографический экран (фото 8) произведена первая цветная голографическая кинопроекция.

Продолжаются исследования возможностей увеличения числа зрительных зон. Получены положительные результаты съемки фрагмента голографического экрана на 24 зоны. Схема съемки отлича-

ется от использованной ранее тем, что все 24 зоны экспонируются одновременно (рис. 108).

24 плоских зеркала размером 19×19 мм закреплены на поверхности эллипсоида в виде матрицы 5 (рис. 108, в) из четырех строк и пяти столбцов. Плоскость каждого зеркала ориентирована таким образом, что луч 9 объектного пучка 7, исходящего из фокуса эллипсоида F_1 , попадающий в центр зеркала, отражается в центр фотопластины 1, совмещенной с фокусом F_2 эллипсоида. Сходящийся

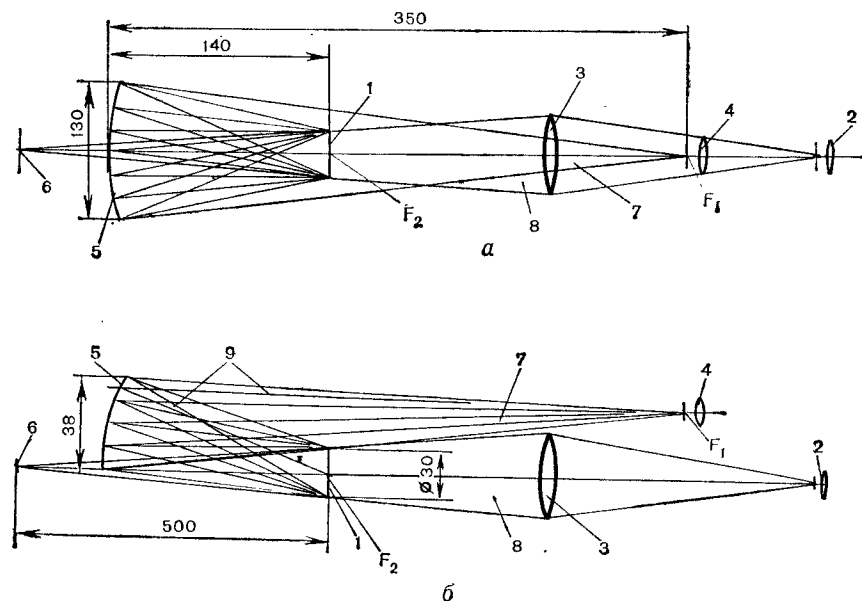


Рис. 108. Схема экспонирования фрагмента голографического экрана на 24 зоны: а — вид сбоку; б — вид сверху; в — матрица зеркал 5; 1 — фотопластинка; 2 — микрообъектив объектного пучка; 3 — линза опорного пучка; 4 — микрообъектив объектного пучка; 5 — зеркальная матрица из 6×4 элементов; 6 — центр схождения опорного пучка; 5₁₁—5₁₄ — элементы зеркальной матрицы; 7 — объектный пучок; 8 — опорный пучок; 9 — луч объектного луча, проходящий через центр зеркала

опорный пучок 8 формируется микрообъективом 2 и линзой 3. В результате записываются отражательные голограммы 24 зеркал. Экспонирование производится на длине волны гелий-неонового лазера. Для этих работ оптимизирован фотоматериал по параметрам поглощения при записи, толщине эмульсии, а также процесс фотохимической обработки. Получена дифракционная эффективность $\sim 2\%$ в каждой зоне, т. е. всего 48%. Результаты показывают возможность реального создания большого экрана на 24 зоны и с более высокими параметрами.

Проекция голографического кинофильма. Для голографической кинопроекции был использован механизм от образца кинопроектора для 70-миллиметровой пленки с 10-перфорационным шагом кадра и объектив ОПГ-1. Частота смены кадров $16\frac{2}{3}$ в секунду. Обтюратор обеспечивает 50 мельканий в секунду, что достаточно для высококачественной кинопроекции. Лазерное осветительное устрой-

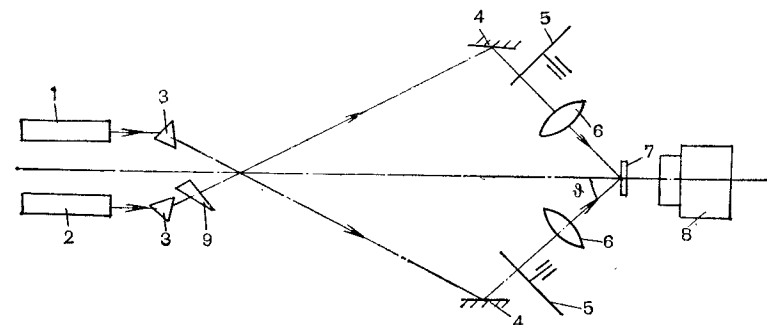


Рис. 109. Схема лазерного осветителя голографического кинопроектора

ство голографического проектора и его схема приведены на фото 9 и рис. 109. Для восстановления красного изображения используется криптоновый лазер непрерывного излучения 1 (длина волны 0,647 мкм), а зеленого изображения — лазер на парах меди 2, работающий с частотой 10 кГц и длиной волны излучения 0,511 мкм. Для монохроматической проекции использовалась линия излучения лазера на парах меди 0,578 мкм. Баланс энергий в зеленом и красном каналах устанавливался оптическим attenuатором 9.

Излучение лазеров 1 и 2, проходя через спектральные призмы 3, выделяющие излучение необходимых для проекции длин волн, отклоняется поворотными зеркалами 4 и падает на линзы 6, направляющие восстанавливающие пучки света в кадровое окно кинопроектора, где расположен голографический кинокадр 7. Угол θ падения лучей света восстанавливающих пучков в центре кадра равен 56° . Перед линзами установлены прозрачные диски 5 со слегка матированной поверхностью, вращающиеся со скоростью 3000 об/мин, для разрушения спекл-структуры в воспроизводимом изображении. Вблизи плоскости кинокадра восстанавливается объемное изображение, которое переносится проекционным объективом 8 (соответствует позиции 1 на рис. 110 и 111) на голографический экран.

Схема проекции цветного голографического кинофильма на 2 и 5 зрительных зон приведена, соответственно, на рис. 110 и 111. Голографический экран 2 отражает свет в зрительные зоны 3—7, расположенные на расчетных расстояниях 3441 мм от экрана и 550 мм по горизонтали относительно друг друга. Центр зрительной зоны смещен по вертикали по отношению к горизонтальной оптической

оси проекционного пучка света (проекционный объектив — экран) на 570 мм.

По схеме проекции цветного голографического кинофильма проведены измерения распределения интенсивности в зрительной зоне, для чего в плоскости кадра размещалась диффузно рассеивающая свет пленка (арказоль), равномерно освещаемая расходящимся

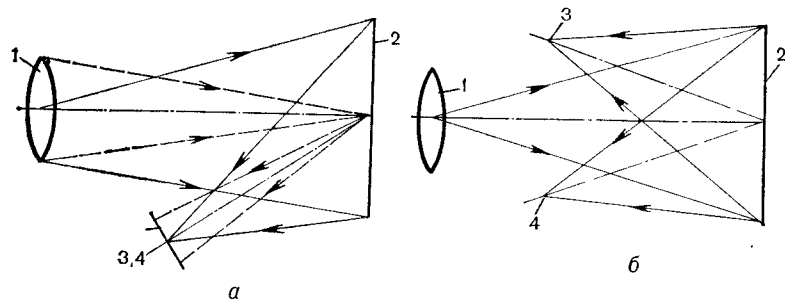


Рис. 110. Схема проекции голографического кинофильма на две зоны: а — вид сбоку; б — вид сверху

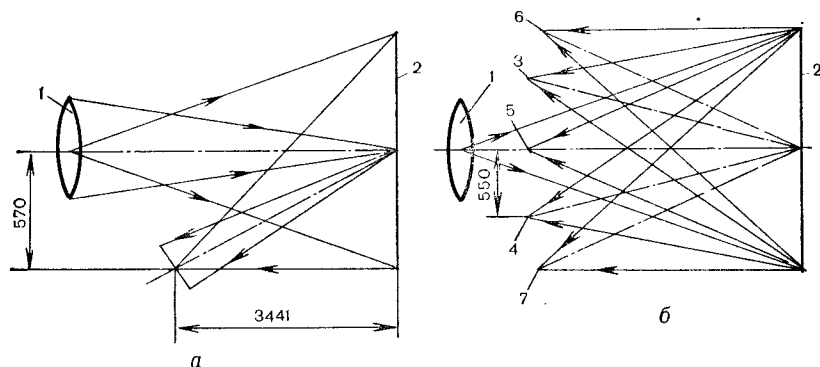


Рис. 111. Схема проекции голографического кинофильма на 5 зон: а — вид сбоку; б — вид сверху

лазерным излучением. На рис. 112 приведены кривые относительного значения интенсивности в зрительной зоне зеленого света (0,511 мкм) при наличии объектива ОПГ-1 и без него. (Зависимости для красного излучения аналогичны.) Из графиков видно, что изменение плотности излучения в средней части зрительной зоны диаметром 110—120 мм составляет $\pm 20\%$ при наличии объектива. При отсутствии объектива, ухудшающего равномерность освещения, изменение плотности в зоне диаметром 130—150 мм составляет $\pm 15\%$ и в горизонтальном и в вертикальном направлениях.

Аппарат контактного копирования цветного голографического фильма имеет оптическую схему, аналогичную схеме освещения при кинопроекции (см. рис. 109), и содержит: два лазерных осветите-

ля (аргоновый и криптоновый), два оптических канала (зеленый и красный), пленочный канал с вакуумным прижимом обеих пленок, механизм протяжки фильма-оригинала и фильма-копии и электропривод с системой управления и синхронизации работы аппарата и затворов.

Производительность аппарата до 100 м пленки в час.

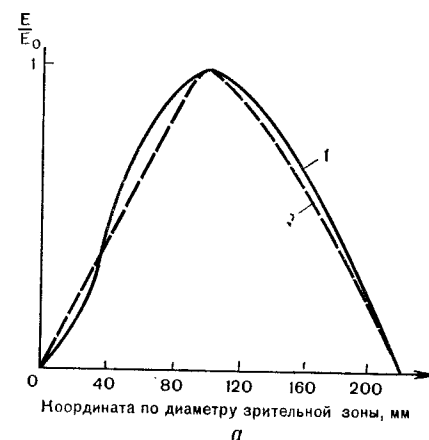


Рис. 112. Измеренные относительные значения интенсивности света E/E_0 в зрительной зоне: а — при наличии объектива; б — без объектива; 1 — в горизонтальном направлении; 2 — в вертикальном направлении

Результаты экспериментальных работ по голографическому кинематографу. Цветной мультипликационный экспериментальный фильм с проекцией на цветной экран и импульсный экспериментальный игровой фильм с изображением человека с проекцией на монохромный экран были продемонстрированы в НИКФИ в марте 1984 г.

Особый интерес представляла проекция цветного киноизображения, позволившая впервые оценить его качество. Цветное изображение, рассматриваемое зрителями, отличалось высокой резкостью по всей глубине отображаемого пространства, спокойным восприятием объема без зрительного напряжения, хорошей цветопередачей и контрастом. Изображение занимало предэкранное пространство и область за экраном. В отличие от монохромного при цветном изображении нельзя устанавливать произвольно положение плоскости экрана относительно воспроизводимого изображения, так как это вызывает несовмещение цветных компонент изображения в зоне из-за aberrаций экрана.

Субъективные оценки позволили сделать вывод о возможности создания объемного голографического цветного кинофильма с высоким качеством изображения, что предоставляет новые возможности для художественного творчества.

Дальнейшие работы следует проводить с целью перехода от съемки экспериментальных фильмов к созданию голографического цветного объемного кинозрелища.

1.7.3. Интерференционные измерительные киноголографические системы

В настоящее время для исследования вибропрочности элементов конструкций широко используют методы голографической интерферометрии с усреднением во времени, позволяющей точно определить положение узловых линий на интерферограмме, полученной с помощью непрерывного излучения лазера. Этот метод требует стабилизации оптической схемы голографического интерферометра и ограничивает амплитуду колебаний объекта величиной 2—3 мкм, а значит, возможность исследования в реальных условиях работы. Кроме того, при увеличении размеров объекта, например до 1,5—2 м, возникают трудности, связанные с ограничением мощности лазера непрерывного действия.

От этих недостатков свободны методы голографической интерферометрии с импульсными лазерами, работающими в режиме свободной генерации или с модуляцией добротности. В случаях, когда исследуемые деформации велики и процесс быстропротекающий, может быть использована дифференциальная интерферометрия с помощью двухимпульсного лазера, позволяющая определить перемещения в течение некоторого интервала времени между парой импульсов (обычно от единиц до сотен микросекунд). Двухимпульсный голографический интерферометр не требует специальной виброизоляции оптической системы. Однако, чтобы проследить за развитием процесса перемещения отдельных точек конструкции, необходимы многочисленные повторные эксперименты с различным временем задержки и точной временной привязкой. Это существенное ограничение устраняется в случае применения киноголографической установки для съемки с частотой несколько десятков кадров

в секунду двухимпульсных интерферограмм сфокусированных изображений вибрирующего объекта.

В НИКФИ на основе разработок по голографическому кинематографу была создана киноголографическая установка для экспериментов по двухимпульсной интерферометрии и интерферометрии с усреднением во времени. При испытаниях была отмечена затруд-

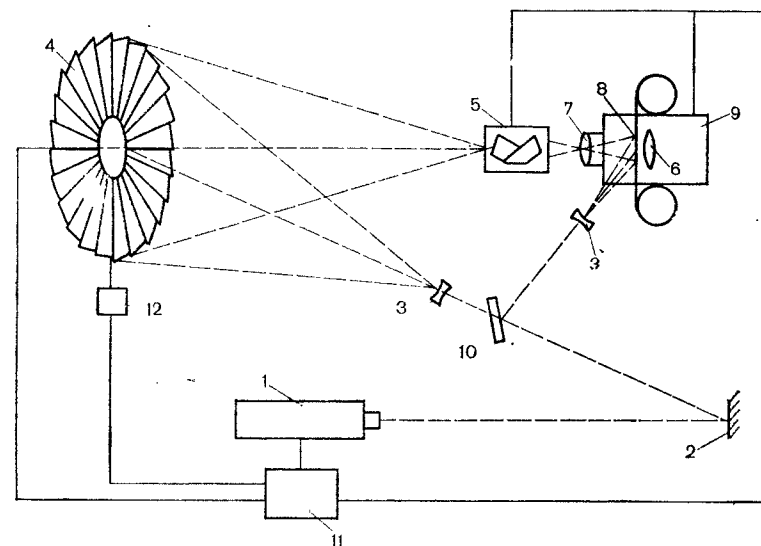


Рис. 113. Схема интерференционной киноголографической системы: 1 — импульсный частотный лазер; 2 — зеркало; 3 — расширительная линза; 4 — испытуемый объект; 5 — деротатор (применяется в случае вращающейся детали для получения неподвижного изображения объекта); 6 — регистрируемое изображение, сформированное вблизи киноплёнки; 7 — объектив; 8 — киноплёнка; 9 — кинокамера; 10 — светоделительная пластинка; 11 — устройство управления и синхронизации; 12 — датчик вибраций, обеспечивающий синхронизацию излучения лазера с фазой колебаний объекта

нительная интерпретация интерферограмм, полученных двухимпульсным методом, из-за отсутствия четко выраженных узловых линий, как это обычно наблюдается в методе с усреднением во времени. Этот недостаток не является принципиальным и может быть устранен при работе с киноголографической установкой НИКФИ на рубиновом лазере (см. рис. 94), где для двухимпульсной интерферометрии можно использовать режим с модуляцией добротности, когда рубиновый лазер генерирует пару импульсов длительностью 40—50 нс каждый, а для интерферометрии с усреднением во времени можно получить излучение лазера в режиме свободной генерации с эффективной длительностью около миллисекунды, при которой голографический интерферометр еще может работать без виброизоляции. За время свободной генерации лазера периодические изменения объекта в диапазоне частот более 1 кГц усредняются, реализуется киноголографическая интерферометрия с

усреднением во времени. Таким образом, установка позволяет совместить достоинства: 1) традиционной схемы голографической интерферометрии с лазером непрерывного излучения и усреднением во времени, дающей четко выраженные узловые линии; 2) дифференциальной интерферометрии с импульсным лазером, не требующей виброизоляции установки; 3) киноголографии, обеспечивающей наблюдение развития процесса вибрации во времени на трехмерном голографическом изображении объекта. Схема интерференционной киноголографической системы приведена на рис. 113.

Двухэкспозиционная голограмма колеса турбины диаметром 1,5 м, возбужденного на частоте вибраций 202 Гц, приведена на фото 19. Интерферограмма с усреднением во времени вибрирующей лопатки компрессора размером 40×100 мм приведена на фото 20. Голограммы восстанавливались ртутной лампой.

Таким образом, голографический кинематограф имеет перспективы практического применения как средство научных исследований и промышленного неразрушающего контроля.

Часть II.

ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Глава II.1. ГОЛОГРАММНАЯ СТРУКТУРА

II.1.1. Простейшая голограммная структура, образованная двумя плоскими световыми волнами

Дифракция света на голограмме обусловлена ее голограммной структурой, определяющей пространственным распределением физических величин: показателя преломления и коэффициента поглощения света. Голограммная структура связана с голографической интерференционной структурой, зависящей от распределения интенсивности голографического поля в пространстве при получении голограммы.

Рассмотрим процесс возникновения голограммной структуры для простейшего случая двух плоских волн, когда экспонирование регистрирующего слоя производится опорным и объектным пучками, в каждом из которых лучи света параллельны друг другу. Данный случай плоских волн соответствует голограммным структурам, образованным двумя сферическими волнами, распространяющимися от гомоцентрических источников, центры которых находятся на расстояниях от регистрирующей пластинки значительно больших, чем поперечные размеры голограммы или рассматриваемого ее участка.

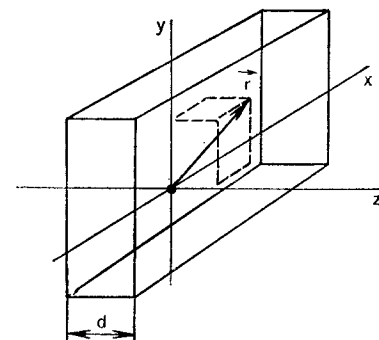


Рис. 114. Регистрирующий слой голографического фотоматериала

Примем, что регистрирующий слой имеет плоские поверхности и равномерную толщину, равную d ; одна из этих поверхностей лежит в плоскости осей xy (рис. 114). Световое поле в регистрирующем слое в этом случае определяется следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \vec{V}_0(x, y, z, t) &= e^{i\omega t} \vec{\Psi}_{0lp}(x, y, z) + e^{i\omega t} \vec{\Psi}_{0ls}(x, y, z) + \\ &+ e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \vec{\Psi}_{0qp}(x, y, z) + e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \vec{\Psi}_{0qs}(x, y, z) \\ \vec{V}_\mu(x, y, z, t) &= e^{i\omega t} \vec{\Psi}_{\mu lp}(x, y, z) + e^{i\omega t} \vec{\Psi}_{\mu ls}(x, y, z) + \\ &+ e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \vec{\Psi}_{\mu qp}(x, y, z) + e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \vec{\Psi}_{\mu qs}(x, y, z), \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

где $\vec{V}_\theta$, $\vec{V}_\mu$ — векторы электрического поля в точке с координатами x , y , z и в момент времени t , соответственно, для опорного и объектного пучков; ω — круговая частота волны света; $\vec{V}$ — составляющие комплексных векторов амплитуды электрического поля, при этом индексы означают: θ — составляющая опорного пучка; μ — объектного пучка; l — составляющая, соответствующая большой полуоси эллипса поляризации, q — малой полуоси эллипса поляризации; p — составляющая, лежащая в плоскости нормали к поверхности слоя и волнового вектора опорного (объектного) пучка; s — составляющая, перпендикулярная плоскости нормали к поверхности слоя и волнового вектора опорного (объектного) пучка.

Суммарная интенсивность света для опорной и объектной волн определяется следующим соотношением:

$$I = I_\theta + I_\mu + I_\lambda \cos [(\vec{k}_{\theta s} - \vec{k}_{\mu s}) \vec{r}], \quad (II.2)$$

где I_θ , I_μ — интенсивности опорного и объектного пучков, не зависящие от координат точки регистрирующего слоя; I_λ — амплитуда переменной слагающей интенсивности, обусловленная интерференцией света; переменная слагающая интенсивности меняется с изменением координат, обуславливая изменение полной интенсивности I .

В уравнении (II.2) $\vec{r}$ — радиус-вектор, равный:

$$\vec{r} = x \vec{n}_x + y \vec{n}_y + z \vec{n}_z, \quad (II.3)$$

где x , y , z — координаты данной точки; $\vec{n}_x$, $\vec{n}_y$, $\vec{n}_z$ — единичные векторы в направлении осей x , y , z .

В уравнении (II.2) $\vec{k}_{\theta s}$, $\vec{k}_{\mu s}$ — волновые векторы для опорной и объектной волн света, направление которых соответствует направлению распространения этих волн, а их модули равны волновым числам:

$$|\vec{k}_{\theta s}| = \frac{2\pi}{\lambda_s}; \quad |\vec{k}_{\mu s}| = \frac{2\pi}{\lambda_s}, \quad (II.4)$$

где λ_s — длина волны света при экспонировании регистрирующей среды.

Голограммная структура зависит от глубины модуляции интенсивности света в регистрирующем слое, которая определяется следующим выражением:

$$k_m = \frac{I_\lambda}{I_\theta + I_\mu}, \quad (II.5)$$

где k_m — коэффициент модуляции света голографической интерференционной структуры в регистрирующем слое при экспонировании.

Для уменьшения интенсивности ложных пучков света в регистрирующем слое за счет внутренних отражений от поверхности слоя

нецелесообразно выбирать вектор электрического поля, соответствующий большой полуоси поляризации, таким образом, чтобы он лежал в плоскости, параллельной плоскости падения опорного и объектного лучей. При этом

$$P_{\theta p} = 1; \quad P_{\mu p} = 1. \quad (II.6)$$

Из уравнения (II.5) для условия (II.6) можно получить следующее соотношение для коэффициента модуляции:

$$k_m = 2 \frac{\sqrt{P_{\theta l} P_{\mu l}} \cos \alpha_{\theta \mu} + \sqrt{(1 - P_{\theta l})(1 - P_{\mu l})}}{\sqrt{k_{\theta \mu}} + \frac{1}{\sqrt{k_{\theta \mu}}}}, \quad (II.7)$$

где $P_{\theta l}$, $P_{\mu l}$ — коэффициенты, равные доле интенсивности излучения, соответствующей большой полуоси эллипса поляризации; при линейной поляризации $P_{\theta l} = P_{\mu l} = 1$; при круговой поляризации $P_{\theta l} = P_{\mu l} = 0,5$; индекс θ соответствует опорному, а индекс μ объектному пучку света; $P_{\theta p}$, $P_{\mu p}$ — коэффициент, равный доле интенсивности излучения для составляющей волны, вектор электрического поля которой лежит в плоскости, параллельной плоскости падения опорного и объектного лучей; индекс θ соответствует опорному, а индекс μ объектному пучку.

$k_{\theta \mu}$ — отношение интенсивности опорного пучка света к интенсивности объектного пучка, т. е.

$$k_{\theta \mu} = \frac{I_\theta}{I_\mu}. \quad (II.8)$$

В уравнении (II.6) угол $\alpha_{\theta \mu}$ определяется выражением:

$$\cos \alpha_{\theta \mu} = |\vec{n}_{\theta s} \vec{n}_{\mu s}|, \quad (II.9)$$

где $\vec{n}_{\theta s}$, $\vec{n}_{\mu s}$ — единичные векторы, определяющие направления распространения опорной и объектной волн света. При этом

$$\vec{n}_{\theta s} = \frac{\vec{k}_{\theta s}}{|\vec{k}_{\theta s}|}; \quad \vec{n}_{\mu s} = \frac{\vec{k}_{\mu s}}{|\vec{k}_{\mu s}|}. \quad (II.10)$$

По формуле (II.7) на рис. 115 построены кривые зависимости квадрата коэффициента модуляции интенсивности света от характера поляризации объектного и опорного пучков для голографической интерференционной структуры в регистрирующем слое при экспонировании. Из этого рисунка видно, что наиболее благоприятные условия при линейной поляризации опорного пучка имеют место при получении голограмм металлических объектов, которые при отражении сохраняют близкую к линейной поляризацию света.

При отражении от поверхности объектов, диффузно рассеивающих свет, опорный пучок света имеет эллиптическую поляризацию, часто близкую к круговой. При этом, как видно из рис. 115, происходит значительное снижение глубины модуляции света, которое можно уменьшить, применяя эллиптическую поляризацию опорного пучка вместо линейной. Следует, однако, иметь в виду, что различ-

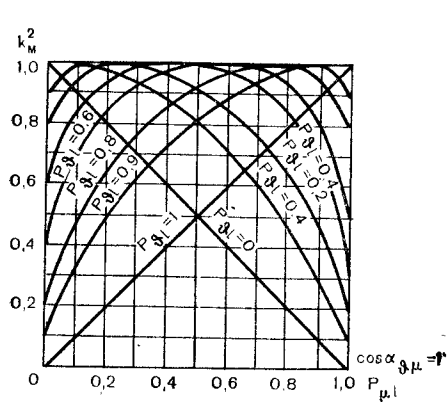


Рис. 115. Квадрат коэффициента модуляции интенсивности света голографической интерференционной структуры в регистрирующем слое в зависимости от доли интенсивности слагающей $P_{\mu,1}$ — поляризации объектного пучка и для разных значений доли интенсивности слагающей $P_{\mu,1}$ — поляризации опорного пучка при равных значениях результирующей интенсивности опорного и объектного пучков

ные части поверхности объекта изменяют поляризацию различным образом. При этом большое значение может иметь угол падения лучей.

По формуле (II.7) на рис. 116 построена кривая зависимости квадрата коэффициента модуляции света от отношения интенсивностей опорного и объектного пучков. Из рисунка видно, что происходит снижение квадрата коэффициента модуляции света и снижение дифракционной эффективности голограммы при значительном отклонении от единицы отношения интенсивностей опорного и объектного пучков. С помощью кривой рис. 116 можно объяснить появление темных пятен в голографическом изображении при перемодуляции света ($k_{\Phi\mu} < 1$), например при высокой интенсивности объектного пучка на отдельных участках регистрирующего слоя за счет фокусирования света от вогнутых зеркальных поверхностей объекта.

Рассмотрим частный случай образования голограммной структуры двумя плоскими попутными волнами, когда опорные и объектные лучи лежат в одной плоскости, параллельной плоскости yz (рис. 117). ϑ_s ; μ_s — углы падения опорных и объектных лучей

света в воздухе. Соответствующие углы для опорных и объектных лучей в регистрирующем слое равны:

$$\vartheta_s = \arcsin \frac{\sin \vartheta'_s}{n_s}; \quad \mu_s = \arcsin \frac{\sin \mu'_s}{n_s}, \quad (\text{II.11})$$

где ϑ_s , μ_s — углы падения опорных и объектных лучей в регистрирующем слое; n_s — показатель преломления регистрирующей среды.

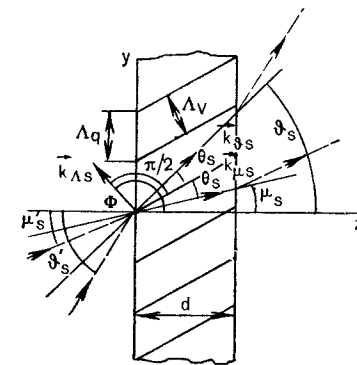


Рис. 117. Голограммная структура, образованная двумя плоскими попутными волнами света, распространяющимися в параллельных плоскостях

Для рассматриваемого случая, если регистрирующий слой очень тонкий, т. е. значительно меньше длины волны света, уравнение (II.2), согласно соотношениям (II.4) и (II.5), принимает вид:

$$I = (I_{\vartheta} + I_{\mu}) \left(1 + k_{\mu} \cos \frac{2\pi y}{\Lambda_q} \right), \quad (\text{II.12})$$

где Λ_q — период изменения интенсивности света по поверхности регистрирующего слоя вследствие интерференции вдоль оси y ; поверхность тонкого регистрирующего слоя лежит в плоскости xy на рис. 117:

$$\Lambda_q = \frac{\lambda_s}{\sin \mu_s - \sin \vartheta_s}. \quad (\text{II.13})$$

В результате экспонирования и последующей обработки регистрирующего слоя в нем образуется голограммная структура, характеризующаяся периодическим изменением концентрации активного вещества, имеющего более высокий показатель преломления, чем первоначальный слой в случае фазовых голограмм и более значительный коэффициент поглощения света в случае амплитудных голограмм.

На рис. 118 показана зависимость показателя преломления регистрирующего галогенидосеребряного слоя от экспозиции после обработки с отбеливанием. Если коэффициент модуляции мал ($k_m \ll 1$), то зависимость показателя преломления света от экспозиции можно считать линейной. По этой причине уравнению (II.12)

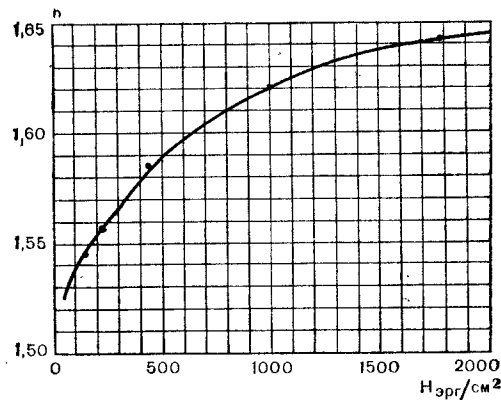


Рис. 118. Показатель преломления слоя голограммы в зависимости от экспозиции после проявления и отбеливания фотоматериала типа ВРЛ

соответствуют следующие соотношения для изменения показателя преломления и коэффициента поглощения света в поперечном направлении и вдоль поверхности голограммы по оси

$$\begin{aligned} n_k &= n_{k0} + n_\lambda \cos \frac{2\pi y}{\Lambda_q}; \\ \alpha_k &= \alpha_{k0} + \alpha_\lambda \cos \frac{2\pi y}{\Lambda_q}, \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

где n_k , α_k — показатель преломления и коэффициент поглощения света в слое; n_{k0} , α_{k0} — средние значения показателя преломления и коэффициента поглощения света в слое; n_λ , α_λ — амплитуды переменных слагающих показателя преломления и коэффициента поглощения света в слое.

В голограммных структурах изобразительных голограмм изменения показателя преломления света преобладают над изменениями коэффициента поглощения света. Такие голограммы называют фазовыми, для них соблюдается условие:

$$\alpha_\lambda = 0; \quad n_\lambda \neq 0. \quad (\text{II.15})$$

Для чисто амплитудных голограмм соблюдается условие:

$$n_\lambda = 0; \quad \alpha_\lambda \neq 0. \quad (\text{II.16})$$

При больших значениях коэффициента модуляции интерференционной структуры (k_m) вследствие нелинейного характера зависи-

мости $n = n(H)$ (рис. 118) в голограммной структуре возникают гармоники высшего порядка. Практическое значение для процессов изобразительной голографии и голографического кинематографа имеет в подобных случаях, как правило, только вторая гармоника. Вместо уравнений (II.14) для фазовой голограммы можно использовать следующее соотношение:

$$n_k = n_{k0} + n_\lambda \cos \frac{2\pi y}{\Lambda_q} + n_{\lambda 2} \cos \frac{4\pi y}{\Lambda_q}. \quad (\text{II.17})$$

Рассмотрим образование голограммной структуры в регистрирующем слое большой толщины, которая существенно превышает длину волны света. Примем, что поверхности регистрирующего слоя являются плоскими и параллельными друг другу, а одна из этих поверхностей лежит в плоскости xy (см. рис. 117); регистрирующий слой экспонируется двумя пучками света: опорным и объектным. В пределах каждого пучка лучи параллельны друг другу и лежат в плоскостях, параллельных плоскости yz .

В рассматриваемом случае интерференционные полосы в регистрирующем слое расположены так, как показано на рис. 117. При этом расстояние между интерференционными полосами по поверхности слоя определяет соотношение (II.13), а в толще слоя — следующее выражение:

$$\Lambda_v = \Lambda_q \cos \frac{\vartheta_s + \mu_s}{2}. \quad (\text{II.18})$$

Подставляя сюда значение Λ_q из (II.13), получаем:

$$\begin{aligned} \Lambda_v &= \frac{\lambda_s}{2n_s \sin \theta_s}; \\ \theta_s &= \left| \frac{\mu_s - \vartheta_s}{2} \right|; \\ \Lambda_q &= \frac{\Lambda_v}{\cos \psi_s}; \\ \psi_s &= \frac{\mu_s + \vartheta_s}{2}, \end{aligned} \quad (\text{II.19})$$

где ψ_s — угол наклона интерференционных полос в толще регистрирующего слоя; ϑ_s — половина угла между опорными и объектными лучами с другой стороны (рис. 117).

После экспонирования, химико-фотографической обработки и сушки регистрирующего слоя в нем образуется голограммная структура, которая повторяет с большей или меньшей точностью голографическую интерференционную структуру, имевшую место во время экспонирования. Так как голографические фотоматериалы имеют малую усадку в направлениях, параллельных поверхности их основы, то период голограммной структуры Λ_q по поверхности слоя можно принять равным периоду интерференционной картины по поверхности слоя.

В направлении по глубине слоя возможно существенное изменение толщины слоя в процессе химико-фотографической обработки и сушки. Путем выбора рецептуры и режима обработки фотоматериала можно получить изменение толщины слоя точно в заданных пределах. Возможно также практически полностью устранить усадку слоя. В общем случае

$$\operatorname{tg} \psi_h = \frac{1}{k_d} \operatorname{tg} \psi_s; \quad k_d = \frac{d_h}{d_s}, \quad (\text{II.20})$$

где k_d — коэффициент изменения толщины слоя; ψ_h, ψ_s — углы наклона полос голограммной структуры (готовой голограммы с тол-

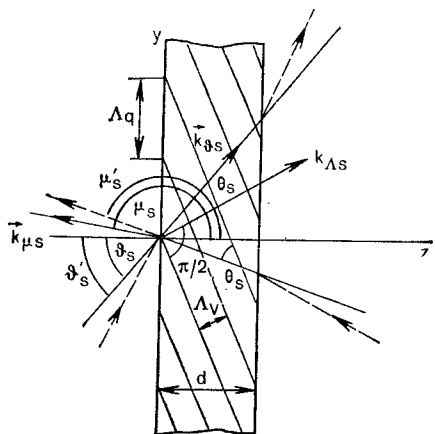


Рис. 119. Голограммная структура, образованная двумя плоскими встречными волнами света, распространяющимися в параллельных плоскостях

щиной слоя d_h) и полос голографической интерференционной структуры (в регистрирующем слое толщиной d_s во время экспонирования).

Для рассматриваемого случая, согласно уравнению (II.2), суммарная интенсивность света (опорного и объектного пучков) равна:

$$I = I_\theta + I_\mu + 2 \sqrt{I_\theta I_\mu} \cos \frac{2\pi(y + z \operatorname{tg} \psi_s)}{\Lambda_q}. \quad (\text{II.21})$$

Соотношения (II.11) — (II.21) выведены для случая получения пропускающей голограммы, когда опорные и объектные пучки являются конаправленными, т. е. падают на регистрирующий слой с одной стороны. Эти же соотношения справедливы и для случая получения отражательной голограммы, когда опорные и объектные пучки являются контрнаправленными, т. е. падают на регистрирующий слой с противоположных сторон (рис. 119).

Голограммную структуру можно характеризовать вектором голограммной структуры, равным при $k_d = 1$:

$$\vec{k}_\Lambda = \vec{k}_{\theta s} - \vec{k}_{\mu s};$$

$$\vec{k}_{\Lambda q} = \vec{n}_x (\vec{n}_x \vec{k}_\Lambda) + \vec{n}_y (\vec{n}_y \vec{k}_\Lambda), \quad (\text{II.22})$$

где $\vec{k}_{\Lambda q}$ — составляющая вектора $\vec{k}_\Lambda$, лежащая в плоскости xy .

Если интенсивность объектного пучка мала по сравнению с интенсивностью опорного пучка ($I_\mu \ll I_\theta$), т. е. коэффициент модуляции мал ($k_m \ll 1$), то процесс образования голограммной структуры можно считать линейным. В данном случае справедливы следующие соотношения, определяющие голограммную структуру:

$$n_h = n_{h0} + n_\lambda \cos \left| \frac{2\pi(y + z \operatorname{tg} \psi_h)}{\Lambda_q} \right|; \quad (\text{II.23})$$

$$\alpha_h = \alpha_{h0} + \alpha_\lambda \cos \left| \frac{2\pi(y + z \operatorname{tg} \psi_h)}{\Lambda_q} \right|. \quad (\text{II.24})$$

Выше приведены соотношения, определяющие структуры двумерных и трехмерных голограмм, образованные двумя пучками света, когда опорные и объектные лучи лежат в одной плоскости yz .

Рассмотрим более общий случай, когда плоскости падения опорных лучей, параллельных в пределах пучка, не параллельны плоскостям падения объектных лучей, также параллельных в пределах своего пучка. Примем, что ось z перпендикулярна поверхности регистрирующего слоя. Обозначим, что

$$\vec{n}_{\theta s} = n_{\theta sx} \vec{n}_x + n_{\theta sy} \vec{n}_y + n_{\theta sz} \vec{n}_z; \quad (\text{II.25})$$

$$\vec{n}_{\mu s} = n_{\mu sx} \vec{n}_x + n_{\mu sy} \vec{n}_y + n_{\mu sz} \vec{n}_z, \quad (\text{II.26})$$

где $\vec{n}_{\theta s}, \vec{n}_{\mu s}$ — единичные векторы опорного и объектного пучков света в слое; $\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z$ — единичные векторы для осей координат x, y, z ; $n_{\theta sx}, n_{\theta sy}, n_{\theta sz}$ — координаты вектора $\vec{n}_{\theta s}$; $n_{\mu sx}, n_{\mu sy}, n_{\mu sz}$ — координаты вектора $\vec{n}_{\mu s}$.

При получении голограммы в регистрирующем слое возникает интерференционная структура, представляющая собой множество светлых и темных полос. Положение интерференционных полос в плоскости xy определяется вектором

$$\vec{k}_{\Lambda q} = \frac{\vec{n}_{\theta s} - n_{\theta sz} \vec{n}_z}{\frac{\lambda_s}{2\pi n_s} |\vec{n}_{\theta s} - n_{\theta sz} \vec{n}_z|} - \frac{\vec{n}_{\mu s} - n_{\mu sz} \vec{n}_z}{\frac{\lambda_s}{2\pi n_s} |\vec{n}_{\mu s} - n_{\mu sz} \vec{n}_z|}, \quad (\text{II.27})$$

где λ_s — длина волны света при получении голограммы; $\vec{k}_{\Lambda q}$ —

составляющая вектора голограммной структуры $\vec{k}_\Lambda$ в плоскости xy , направление которого перпендикулярно направлениям интерференционных полос, а модуль $|\vec{k}_{\Lambda q}|$ пропорционален обратной величине периода интерференционных полос Λ_q , т. е. расстоянию между средними линиями смежных светлых полос:

$$|\vec{k}_{\Lambda q}| = \frac{2\pi}{\Lambda_q}. \quad (II.28)$$

В частном случае, если векторы $\vec{n}_{\vartheta s}$, $\vec{n}_{\mu s}$ лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности слоя, соотношение (II.27) принимает вид:

$$|\vec{k}_{\Lambda q}| = \frac{2\pi}{\Lambda_q} = \frac{2\pi n_s |\sin \vartheta_s - \sin \mu_s|}{\lambda_s}. \quad (II.29)$$

При большой толщине регистрирующего слоя во время экспонирования происходит существенное поглощение света. Поэтому интенсивность как опорного, так и объектного пучков снижается по мере прохождения через толщу слоя. Это снижение можно выразить следующим образом:

при

$$-\frac{\pi}{2} < \vartheta < \frac{\pi}{2}$$

$$I_\vartheta = I_{\vartheta 0} e^{-\frac{\alpha_s z}{\cos \vartheta}}; \quad (II.30)$$

при

$$-\frac{\pi}{2} < \mu < \frac{\pi}{2}$$

$$I_\mu = I_{\mu 0} e^{-\frac{\alpha_s z}{\cos \mu}}; \quad (II.31)$$

при

$$-\frac{\pi}{2} < \mu < \frac{3\pi}{2}$$

$$I_\mu = I_{\mu 0} e^{-\frac{\alpha_s (d-z)}{\cos \mu}}. \quad (II.32)$$

Условия (II.30) и (II.31) соответствуют получению пропускающих голограмм. Условия (II.30) и (II.32) соответствуют получению отражательных голограмм. В этих уравнениях I_ϑ , $I_{\vartheta 0}$ — интенсивность опорного пучка в толще слоя и на его поверхности, на которую падают лучи; I_μ , $I_{\mu 0}$ — интенсивность объектного пучка в толще слоя и на его поверхности, на которую падают лучи; ϑ , μ — углы падения опорного и объектного лучей света в толще слоя; α_s — коэффициент поглощения света в слое по амплитуде; d — толщина слоя.

Для лучшего понимания влияния поглощения света на процесс образования голограммной структуры в регистрирующем слое рассмотрим упрощенный случай:

$$\mu = -\vartheta, \text{ или } \mu = \pi - \vartheta. \quad (II.33)$$

При этом условии в случае получения пропускающих голограмм переменная слагающая интенсивности света в слое, согласно (II.2), (II.21), (II.30), (II.31), равна:

$$I_\lambda = 2 \sqrt{I_{\vartheta 0} I_{\mu 0}} e^{-2\alpha_s \frac{z}{\cos \vartheta}} \cos \frac{2\pi (y + z \operatorname{tg} \vartheta)}{\Lambda_q}. \quad (II.34)$$

В рассматриваемом упрощенном случае (II.33) при получении отражательных голограмм переменная слагающая интенсивности света в слое, согласно (II.2), (II.21), (II.31), (II.32), равна:

$$I_\lambda = 2 \sqrt{I_{\vartheta 0} I_{\mu 0}} e^{-\alpha_s \frac{d}{\cos \vartheta}} \cos \frac{2\pi (y + z \operatorname{tg} \vartheta)}{\Lambda_q}. \quad (II.35)$$

Как видно из соотношения (II.34), при падении опорных и объектных лучей на одну сторону регистрирующего слоя эффективная толщина слоя, в которой образуется голограммная структура, может оказаться значительно меньше полной толщины этого слоя, если в нем происходит чрезмерно сильное поглощение света. Как видно из соотношения (II.35), при падении опорных и объектных лучей света на регистрирующий слой с противоположных его сторон, в случае чрезмерного поглощения света голограммная структура может оказаться слишком слабо выраженной.

Однако для устранения указанных недостатков нельзя чрезмерно уменьшать поглощение света регистрирующим слоем, так как в этом случае при низкой концентрации сенсibilизаторов большая часть световой энергии проходит через слой без взаимодействия с ним, т. е. вызывает чрезмерное снижение чувствительности фотоматериала. Оптимальное поглощение света регистрирующим слоем при экспонировании приблизительно соответствует равенству:

$$2\alpha_s d = 1. \quad (II.36)$$

Это условие соответствует оптической плотности регистрирующего слоя до его химико-фотографической обработки приблизительно:

$$D_0 = 0,4. \quad (II.37)$$

II.1.2. Сложная голограммная структура, образованная множеством объектных волн

В процессах, используемых в изобразительной голографии и голографическом кинематографе, образуются голограммные структуры значительно сложнее тех, которые рассмотрены в

разделе II.1.1, так как вместо двух плоских световых волн в таких процессах действует несколько опорных волн при регистрации цветных изображений и множество объектных волн, каждая из которых соответствует отдельным малым элементам поверхности объекта.

Так как интенсивность каждой элементарной объектной волны обычно очень мала, процесс формирования сложной голограммной структуры можно рассматривать как линейное суммирование элементарных составляющих, каждая из которых образуется парой световых волн и удовлетворяет соотношениям, приведенным в разделе II.1.1.

Суммарная интенсивность света в какой-либо точке регистрирующего слоя может быть выражена следующим образом (монокромное излучение — один опорный пучок:

$$I = \left(\vec{\Psi}_0 + \sum_{j=1,2,\dots,J} \vec{\Psi}_{\mu j} \right) \left(\vec{\Psi}_0^* + \sum_{j=1,2,\dots,J} \vec{\Psi}_{\mu j}^* \right), \quad (\text{II.38})$$

где I — суммарная интенсивность света в данной точке регистрирующего слоя; $\vec{\Psi}_0$, $\vec{\Psi}_0^*$ — комплексный вектор амплитуды электрического поля опорного пучка и его комплексно-сопряженная величина; $\vec{\Psi}_{\mu j}$, $\vec{\Psi}_{\mu j}^*$ — комплексный вектор амплитуды электрического поля элементарного объектного пучка номер j и его комплексно-сопряженная величина (всего J объектных пучков света, одновременно экспонирующих регистрирующий слой).

Из уравнения (II.38) в соответствии с (II.2) получаем:

$$I = I_0 + I_\mu + \sum_{j=1,2,\dots,J} I_{\lambda j} \cos \left[\left(\vec{k}_0 - \vec{k}_{\mu j} \right) \vec{r} \right] + \sum_{j=1,2,\dots,J} \sum_{l=1,2,\dots,J} I_{\lambda jl} \cos \left[\left(\vec{k}_{\mu j} - \vec{k}_{\mu l} \right) \vec{r} \right], \quad (\text{II.39})$$

где I_0 — интенсивность опорного пучка; I_μ — интенсивность объектного пучка, т. е. сумма интенсивностей всех элементарных слагающих объектного пучка, равная:

$$I_\mu = \sum_{j=1,2,\dots,J} I_{\mu j}. \quad (\text{II.40})$$

В уравнении (II.39) $I_{\lambda j}$ — амплитуда переменной слагающей интенсивности света, обусловленная интерференцией опорного пучка с одной стороны и элементарного объектного пучка номер j с другой стороны (кроссмодуляция); $I_{\lambda jl}$ — амплитуда переменной слагающей интенсивности света, обусловленная интерференцией света между элементарными объектными пучками света номер j и номер l (интермодуляция). Амплитуды переменных слагающих интенсивности света, представляющих собой элементарные составляющие голографической интерференционной структуры, можно определить следующим образом:

$$I_{\lambda j} = 2P_{\lambda j} \sqrt{I_0 I_j};$$

$$I_{\lambda jl} = 2P_{\lambda jl} \sqrt{I_j I_l}, \quad (\text{II.41})$$

где I_j ; I_l — интенсивность элементарного объектного пучка номер j и номер l ; $P_{\lambda j}$, $P_{\lambda jl}$ — коэффициенты, учитывающие влияние поляризации света на переменную слагающую интенсивности света элементарной составляющей голографической интерференционной структуры, образованной пучками света, соответственно: опорный пучок — элементарный объектный пучок номер j ; объектные пучки номер j и l . Если поляризация света двух пучков, образующих элементарную составляющую голографической интерференционной структуры, одинакова, то

$$P_{\lambda j} = P_{\lambda jl} = 1. \quad (\text{II.42})$$

При различной поляризации света пучков

$$0 \leq P_{\lambda j} < 1; 0 \leq P_{\lambda jl} < 1. \quad (\text{II.43})$$

После экспонирования и последующей обработки регистрирующего слоя в случае сложной голографической интерференционной структуры, соответствующей уравнению (II.39), возникает сложная голограммная структура, которую можно рассматривать как состоящую из множества элементарных голограммных структур. Для фазовых голограмм, согласно (II.39), голограммная структура в рассматриваемом случае одного опорного и множества элементарных объектных пучков может быть выражена следующим образом:

$$n_h = n_{h0} + \sum_{j=1,2,\dots,J} n_{\lambda j} \cos \left[\left(\vec{k}_{\lambda j} \vec{r} \right) + \varphi_j \right] + \sum_{j=1,2,\dots,J} \sum_{l=1,2,\dots,J} n_{\lambda jl} \cos \left[\left(\vec{k}_{\lambda j} \vec{r} \right) + \varphi_{jl} \right], \quad (\text{II.44})$$

где n_h — показатель преломления света в слое голограммы в точке, определяемой радиусом-вектором $\vec{r}$; $n_{\lambda j}$ — амплитуда переменной слагающей показателя преломления элементарной голограммной структуры, обусловленной переменными слагающими интенсивности света $I_{\lambda j}$; $n_{\lambda jl}$ — амплитуда переменной слагающей показателя преломления элементарной голограммной структуры, обусловленной переменной слагающей интенсивности света $I_{\lambda j}$; φ_j , φ_{jl} — начальные фазы (для точки $\vec{r}=0$) элементарных голограммных структур; $\vec{k}_{\lambda j}$; $\vec{k}_{\lambda jl}$ — векторы элементарных голограммных структур, равные:

$$\vec{k}_{\lambda j} = \vec{k}_0 - \vec{k}_{\mu j}; \quad \vec{k}_{\lambda jl} = \vec{k}_{\mu j} - \vec{k}_{\mu l}; \quad (\text{II.45})$$

$$|\vec{k}_{\Delta j}| = \frac{2\pi}{\Delta_j}; |\vec{k}_{\Delta j l}| = \frac{2\pi}{\Delta_{jl}}, \quad (II.46)$$

где Δ_j ; Δ_{jl} — период элементарной голограммной структуры (расстояние между полосами максимального значения показателя преломления в толще слоя).

Составляющие, обусловленные интерференцией опорного и объектного пучков света $n_{\lambda j}$ и $I_{\lambda j}$, образуют полезную часть голограммной структуры, определяющую формирование изображения объекта, а обусловленные интермодуляцией — ложную часть голограммной структуры, оказывающую отрицательное воздействие на качество воспроизводимого изображения ($n_{\lambda j l}$, $I_{\lambda j l}$).

Степень влияния интермодуляции можно приближенно оценить величиной k_{IN} , с ростом которой ухудшается качество воспроизводимого изображения:

$$k_{IN} = \frac{\sum_{j=1,2,\dots,J} \sum_{l=1,2,\dots,J} I_{jl}^2}{\sum_{j=1,2,\dots,J} I_{\lambda j}^2}. \quad (II.47)$$

Отсюда, согласно соотношениям (II.40) и (II.41), в случае равных значений интенсивности элементарных объектных пучков света получаем:

$$k_{IN} = \frac{J-1}{Jk_{0\mu}}. \quad (II.48)$$

Из данного соотношения следует, что для уменьшения интермодуляционных помех необходимо выбирать большие значения отношения интенсивностей опорного и объектного пучков света, например:

$$k_{0\mu} = 5 \div 10. \quad (II.49)$$

Из выражения (II.47) также следует, что в отношении интермодуляционных шумов сфокусированные голограммы имеют преимущество перед голограммами Фурье, которое, однако, уменьшается при использовании толстых слоев голограмм. Преимущество сфокусированных голограмм объясняется тем, что в этом случае в тенях изображения, где действие интермодуляционных помех на снижение контраста изображения особенно неблагоприятно, величина $k_{0\mu}$ достигает весьма больших значений.

Выше были рассмотрены случаи образования голограммных структур при одновременном экспонировании регистрирующего слоя несколькими объектными пучками. На практике применяют также способы последовательного экспонирования. Их преимущество в отсутствии интермодуляционных слагающих голограммной структуры. Но при этом снижается переменная слагающая экспозиции для каждого объектного пучка, если суммарная постоянная слагающая экспозиции сохраняется неизменной.

Рассмотрим простейший случай, когда значения интенсивности отдельных объектных пучков света равны друг другу. Значения коэффициента модуляции света при одновременном и последовательном экспонировании равны:

$$k_{\mu j} = \frac{2 \sqrt{H_0 H_{\mu j}}}{H_0 + H_{\mu}}; k_{\mu j} = \frac{2 \sqrt{H'_0 H'_{\mu j}}}{H'_0 + H'_{\mu}} \quad (II.50)$$

$$H'_0 = J_N H'_{0j}, \quad (II.51)$$

где H_0 , H'_0 — суммарные слагающие экспозиции, обусловленные опорным пучком при одновременном и последовательном экспонировании; H'_{0j} — опорная слагающая экспозиции для одного экспонирования номер j ; $H_{\mu j}$, $H'_{\mu j}$ — слагающие экспозиции, обусловленные объектными пучками номер j для случаев одновременного и последовательного экспонирования; J , J_N — общее число объектных пучков и число экспонирований; H_{μ} , H'_{μ} — суммарные слагающие экспозиции объектных пучков при одновременном и последовательном экспонировании.

При равных значениях суммарных слагающих интенсивности опорных и объектных пучков для одновременного и последовательного экспонирования можно получить следующее уравнение:

$$\left(\frac{k'_{\mu j}}{k_{\mu j}} \right)^2 = \frac{1}{J_N}. \quad (II.52)$$

В случае работы на прямолинейном участке дифракционной характеристической кривой для достижения максимальной дифракционной эффективности следует соблюдать следующее условие:

$$H_0 + H_{\mu} + H_{\lambda} = H'_0 + H'_{\mu} + H'_{\lambda} = H_{\eta L}, \quad (II.53)$$

где $H_{\eta L}$ — максимальное значение экспозиции, соответствующее верхней границе приближенно прямолинейного участка дифракционной характеристической кривой.

В уравнении (II.53) величина H_{λ} определяется соотношением:

$$H_{\lambda} = \sum_{j=1,2,\dots,J} H_{\lambda j}; H'_{\lambda} = \sum_{j=1,2,\dots,J_N} H'_{\lambda j}, \quad (II.54)$$

где $H_{\lambda j}$, $H'_{\lambda j}$ — переменные слагающие экспозиции для случаев одновременного и последовательного экспонирования.

Для условия (II.51) соотношения (II.54) принимают следующий вид:

$$H_{\lambda} = J H_{\lambda j}; H'_{\lambda} = J_N H'_{\lambda j}. \quad (II.55)$$

Из уравнений (II.50) можно получить следующее выражение:

$$\left(\frac{H'_\lambda}{H_\lambda}\right)^2 = \frac{4}{(\sqrt{J} + 1)^2}. \quad (\text{II.56})$$

Как видно из уравнения (II.56), квадрат отношения переменных слагающих экспозиции, определяющий снижение максимальной дифракционной эффективности, при переходе от одновременного к последовательному экспонированию, уменьшается с ростом числа последовательных экспонирований не столь сильно, как в случае одинаковых значений суммарных слагающих интенсивностей опорных пучков света (II.52). Например, при числе последовательных экспонирований $J_N = 10$ квадрат отношения переменных слагающих экспозиции для условия получения максимальной дифракционной эффективности на линейном участке дифракционной характеристической кривой равен, согласно формуле (II.56)

$$\left(\frac{H'_\lambda}{H_\lambda}\right)^2 = 0,23, \quad (\text{II.57})$$

т. е. более чем в два раза выше, чем для условия сохранения неизменных значений суммарной слагающей интенсивности опорного пучка света, когда согласно формуле (II.52)

$$\left(\frac{H'_\lambda}{H_\lambda}\right)^2 = \left(\frac{k'_{\lambda j}}{k_{\lambda j}}\right)^2 = 0,1. \quad (\text{II.58})$$

II.2.1. Дифракция света на двумерной голограмме

Рассмотрим дифракцию света на голограмме с тонким слоем существенно меньше длины волны света, полученную экспонированием двумя гомоцентрическими пучками света (опорным и объектным) с центрами на большом расстоянии от голограммы (по сравнению с ее поперечными размерами). Решение этой задачи получено А. О. Озолсом. Такую голограмму можно приближенно рассматривать как зарегистрированную в параллельных пучках, т. е. для двух плоских волн.

При простейшей голограммной структуре, сформированной двумя плоскими волнами, когда опорные и объектные лучи лежат в плоскости yz (рис. 114) в соответствии с уравнением (II.17), справедливы соотношения:

$$n_k = n_{k0} + n_\lambda \cos\left(\frac{2\pi y}{\Lambda_q} + \varphi_n\right); \quad (\text{II.59})$$

$$\alpha_k = \alpha_{k0} + \alpha_\lambda \cos\left(\frac{2\pi y}{\Lambda_q} + \varphi_\alpha\right),$$

где n_k , n_{k0} , n_λ — показатель преломления и его постоянная и переменная слагающие; α_k , α_{k0} , α_λ — коэффициент поглощения света и его постоянная и переменная слагающие; φ_n , φ_α — начальные фазы пространственного изменения показателя преломления и коэффициента поглощения; Λ_q — период голограммной структуры, определяемый соотношением (II.13).

Примем, что восстанавливающая волна, падающая на голограмму, определяется следующим соотношением:

$$\vec{V}_{\vartheta k}(x, y, t) = \vec{\Psi}_{\vartheta k}(x, y) e^{i\omega t}, \quad (\text{II.60})$$

где $\Psi_{\vartheta k}$ — комплексный вектор амплитуды электрического поля восстанавливающего пучка света. Этот вектор равен:

$$\vec{\Psi}_{\vartheta k} = \vec{a}_{\vartheta k}(x, y) e^{i\varphi_{\vartheta k}(x, y)}, \quad (\text{II.61})$$

где $\vec{a}_{\vartheta k}$ — вектор амплитуды электрического поля восстанавливающего пучка, падающего на голограмму; $\varphi_{\vartheta k}$ — фаза волны восстанавливающего пучка света.

Согласно принципу Гюйгенса—Френеля, примем, что каждая точка двумерной голограммы, лежащей в плоскости xu , является источником расходящейся сферической волны длиной λ_k с амплитудой и фазой, определяемой амплитудой и фазой падающей волны, а также коэффициентом поглощения α_k и показателем преломления n_k , т. е. примем, что справедливо следующее соотношение:

$$\vec{\Psi}_{\mu k} = \frac{1}{ab} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \vec{a}_{\theta k} \exp[-\alpha_k d +$$

$$+ i(k_{\lambda k} n_k d + \varphi_{\theta k} - \varphi_{\mu k})] dx dy; \quad k_{\lambda k} = \frac{2\pi}{\lambda_k}. \quad (\text{II.62})$$

Рассмотрим случай, когда центры восстанавливающего и главного восстановленного пучка света удалены на значительное расстояние от голограммы и сферические волны света близки к плоским, т. е. справедливы неравенства:

$$a \ll z_\theta; \quad b \ll z_\mu, \quad (\text{II.63})$$

где z_θ, z_μ — расстояния от голограммы до центров восстанавливающего и главного восстановленного пучков света. Для условия (II.63) можно приближенно принять, что величины $\vec{a}_{\theta k}, \varphi_{\theta k}, \varphi_{\mu k}$ слабо зависят от координаты x . Учитывая эти допущения, а также принимая во внимание соотношения (II.59), можно написать выражение (II.62) в следующем виде:

$$\vec{\Psi}_{\mu k} = \frac{\vec{a}_{\theta k}}{b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp \left\{ -\alpha_{k0} d - \alpha_\lambda d \cos \left[\frac{2\pi y}{n_{k0} \lambda_s} (\sin \vartheta_s - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \sin \mu_s) \right] + i k n_{k0} d + i k_{\lambda k} n_\lambda d \cos \left[\frac{2\pi y}{n_{k0} \lambda_s} (\sin \vartheta_s - \sin \mu_s) \right] \right\} dy. \quad (\text{II.64})$$

В общем случае амплитудно-фазовой голограммы

$$\alpha_\lambda \neq 0; \quad n_\lambda \neq 0. \quad (\text{II.65})$$

В случае амплитудной голограммы, т. е. при

$$\alpha_\lambda \neq 0; \quad n_\lambda = 0, \quad (\text{II.66})$$

комплексный вектор амплитуды электрического поля дифрагированного пучка света, согласно (II.64), равен:

$$\vec{\Psi}_{\mu k} = c_\alpha \vec{a}_{\theta k} I_n(\alpha_\lambda d) e^{-\alpha_0 d}, \quad (\text{II.67})$$

где c_α — постоянный коэффициент; I_n — модифицированная функция Бесселя порядка n , равная абсолютной величине порядка дифракции m_D . Во всех направлениях, кроме тех, которые соответствуют дифракции порядка m_D , определяемым (I.2), величина $\vec{\Psi}_{\mu k}$ равна нулю.

Согласно уравнению (II.67), интенсивность дифрагированного пучка света I_{m_D} по отношению к интенсивности падающего на голограмму опорного пучка I_{k0} определяется соотношением:

$$\frac{I_{mD}}{I_{k0}} = c_\alpha^2 I_n^2(\alpha_\lambda d) e^{-2\alpha_{k0} d}. \quad (\text{II.68})$$

На рис. 120 показаны кривые зависимости интенсивности дифрагированного пучка света от произведения коэффициента поглощения на толщину слоя голограммы $\alpha_\lambda d$. Коэффициенты пропускания света τ_α и модуляции поглощения k_α равны:

$$\tau_\alpha = 1 - e^{-2\alpha_{k0} d};$$

$$k_\alpha = \frac{\alpha_\lambda}{\alpha_{k0}}. \quad (\text{II.69})$$

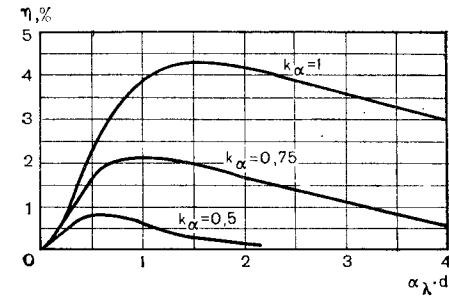


Рис. 120. Дифракционная эффективность амплитудной голограммы, образованной двумя плоскими волнами, в зависимости от произведения коэффициента поглощения на толщину слоя голограммы $\alpha_\lambda d$ для разных значений модуляции коэффициента поглощения

Дифракционная эффективность амплитудной голограммы зависит не только от коэффициента пропускания света голограммой τ_α и не только от модуляции коэффициента поглощения k_α , но также и от числа дифрагированных пучков света, которое зависит от углов падения опорного и объектного пучков света.

Как следует из формулы (II.68) и рис. 120, максимальное значение дифракционной эффективности амплитудных голограмм с тонким слоем может достигать $\eta_m^0 = 4,4$ при модуляции коэффициента поглощения $k_\alpha = 1$, коэффициенте полного поглощения света голограммой, равном $1 - \tau_\alpha = 0,27$, и большой разности углов падения восстанавливающих и дифрагированных лучей света, когда возникают только два дифрагированных пучка света (прошедший и отраженный). В случае фазовой голограммы, т. е. при

$$n_\lambda \neq 0; \quad \alpha_\lambda = 0, \quad (\text{II.70})$$

комплексный вектор амплитуды электрического поля дифрагированного пучка света, согласно (II.64), равен:

$$\vec{\Psi}_{\mu k} = i^{-n} c_n \vec{\Psi}_{\theta k} J_n(k_\lambda n_\lambda d), \quad (\text{II.71})$$

где c_n — постоянный коэффициент; J_n — функция Бесселя первого рода порядка n , который равен абсолютной величине дифракции порядка m_D . Формула (II.71) справедлива только для тех направлений дифрагированных лучей, которые определяются уравнением (1.3). Для других направлений дифракции интенсивность ничтожно мала, если поперечные размеры голограммы достаточно велики по сравнению с длиной волны света, например достигают 1 мм или более.

Согласно уравнению (II.71), интенсивность дифрагированного пучка света по отношению к интенсивности падающего на голограмму опорного пучка определяется следующим соотношением:

$$\frac{I_{mD}}{I_{k0}} = c_n^2 J_n^2(k_\lambda n_\lambda d), \quad (\text{II.72})$$

где I_{k0} — интенсивность падающего на голограмму опорного пучка света; I_{mD} — интенсивность дифрагированного пучка света порядка дифракции m_D .

Исходя из соотношения (II.72), дифракционная эффективность фазовой голограммы может быть определена, если приравнять интенсивность падающего на голограмму пучка света сумме интенсивностей всех проходящих и отраженных пучков света разных порядков дифракции. Если при этом поглощение света голограммой невелико, можно пренебречь дифракцией, обусловленной модуляцией коэффициента поглощения света, и учесть влияние поглощения на дифракционную эффективность множителем k_x , который для фазовых голограмм без поглощения света равен единице:

$$k_x = 1. \quad (\text{II.73})$$

При этом дифракционная эффективность фазовой голограммы равна:

$$\eta = \frac{k_x J_1^2 \cos \mu_1}{\sum J_n^2 \cos \mu_n}, \quad (\text{II.74})$$

$$n = m_D = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

где J_1 — функция Бесселя первого порядка, соответствующая основному — первому порядку дифракции; J_n — функция Бесселя порядка $n = m_D$, соответствующая дифракции неосновных порядков.

На рис. 121 показаны кривые дифракционной эффективности фазовых голограмм с тонким слоем (без поглощения света) в зависимости от переменной слагающей показателя преломления света ($n_\lambda d$). При малой разности углов падения опорных и объектных лучей возникает много порядков дифракции и максимальная дифракционная эффективность голограммы с тонким слоем равна:

$$\eta = 0,25. \quad (\text{II.75})$$

Если разность углов падения опорных и объектных лучей велика, например $\theta_s = 30^\circ$, $\mu_s = -30^\circ$, а направление опорных лучей света при освещении готовой голограммы, например, совпадает с направлением опорных лучей при получении голограммы, то возникают только два дифрагированных пучка света плюс первого

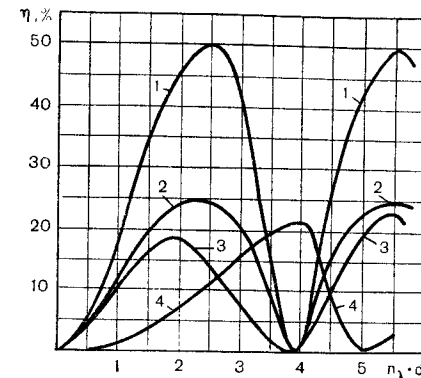


Рис. 121. Дифракционная эффективность фазовых голограмм (без поглощения света в слое голограммы), образованных двумя плоскими волнами света, в зависимости от произведения переменной слагающей показателя преломления света n_λ на толщину слоя d . Дифракционная эффективность при возникновении дифрагированных пучков: 1 — двух пучков минус первого порядка; 2 — четырех пучков первого порядка; 3 — четырех пучков первого и четырех пучков второго порядка дифракции; 4 — интенсивность одного пучка дифракции второго порядка по отношению к интенсивности восстанавливающего пучка

порядка ($m_D = +1$): один проходящий, а другой отраженный. Максимальное значение дифракционной эффективности в этом случае достигает

$$\eta = 0,5. \quad (\text{II.76})$$

Мы уже приводили соотношения, определяющие интенсивность дифрагированных пучков света на голограмме с тонким слоем. Теперь рассмотрим дифракцию света на такого рода голограмме и определим направление дифрагированных лучей света.

В разделе (II.1.1) приведен анализ образования голограммной структуры в общем случае, когда плоскости падения опорных лучей не параллельны плоскостям падения объектных лучей. Направление вектора голограммной структуры определяется выражениями (II.28) и (II.29).

Пусть на голограмму с тонким слоем, полученную указанным путем, падает восстанавливающий пучок света с параллельными лучами (плоская волна), $\vec{n}_{\theta k}$ — единичный вектор, определяющий направление восстанавливающих лучей света; $\vec{k}_{\Delta q}$ — составляю-

щая вектора голограммной структуры, лежащего в плоскости поверхности голограммы (x, y) и определяемого условиями ее получения (II.25) — (II.27).

Направление дифрагированных лучей света определяется следующим соотношением:

$$\frac{\vec{n}_{\mu k} - n_{\mu k z} \vec{n}_z}{m_D \lambda_k |\vec{n}_{\mu k} - n_{\mu k z} \vec{n}_z|} = \vec{k}_{\Lambda k} + \frac{\vec{n}_{0k} - n_{0k z} \vec{n}_z}{m_D \lambda_k |\vec{n}_{0k} - n_{0k z} \vec{n}_z|}; \quad (II.77)$$

$$n_{0kx}^2 + n_{0ky}^2 + n_{0kz}^2 = 1; \quad n_{\mu kx}^2 + n_{\mu ky}^2 + n_{\mu kz}^2 = 1,$$

где $\vec{n}_{\mu k}$ — единичный вектор пучка света порядка дифракции m_D , равного:

$$m_D = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (II.78)$$

Вне зависимости от того, падали ли опорные и объектные лучи при получении голограммы с одной стороны или с двух сторон на регистрирующий слой, дифрагированные лучи света выходят из голограммы как с одной, так и с другой стороны. Таким образом, каждую двухмерную голограмму можно рассматривать как пропускающую, так одновременно и как отражающую.

В связи с этим интересно отметить, что одна и та же голограммная структура может быть получена при падении опорных и объектных лучей света на одну сторону регистрирующего слоя и с противоположных сторон. При неизменном абсолютном значении угла падения опорных лучей ϑ_s объектные лучи света для указанных случаев будут отличаться друг от друга на величину:

$$\mu'_s = \pi - \mu_s. \quad (II.79)$$

II.2.2. Дифракция света основного порядка на трехмерных голограммах с простой голограммной структурой

Рассмотрим дифракцию света основного порядка на трехмерной голограмме, имеющей слой, толщина которого превышает длину волны света. Примем поверхность голограммы плоской, а голограммную структуру простой, образованной только двумя плоскими волнами света. Причем поляризация света линейная, s-типа, т. е. векторы электрического поля перпендикулярны плоскости падения лучей. Решение этой задачи получено Г. Когельником.

На рис. 122 показана голограммная структура пропускающей голограммы с толстым слоем, полученная для двух пучков света с параллельными лучами в пределах каждого пучка, которые падали на светочувствительный слой с одной стороны и были параллельны плоскости yz , перпендикулярной поверхности слоя.

Голограммная структура характеризуется вектором $\vec{k}_\Lambda$, перпендикулярным к плоскостям, соответствующим максимальным значе-

ниям показателя преломления света в слое. Модуль вектора прием равным

$$k_\Lambda = \left| \vec{k}_\Lambda \right| = \frac{2\pi}{\Lambda_V}. \quad (II.80)$$

где Λ_V — расстояние между плоскостями смежных полос голограммной структуры, соответствующих максимальным значениям показателя преломления света в слое (см. рис. 122). Направление вектора $\vec{k}_\Lambda$ в рассматриваемом случае определяется углом Φ по от-

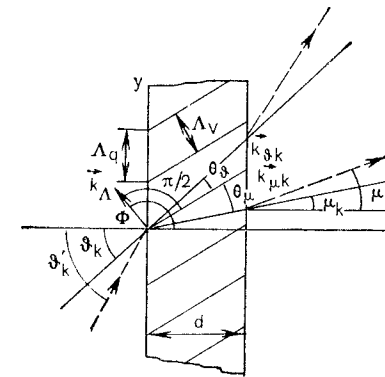


Рис. 122. Направления лучей света: восстанавливающих (ϑ_k) и дифрагированных основного порядка дифракции (μ_k) для трехмерной голограммы с простой голограммной структурой, образованной двумя плоскими попутными волнами

ношению к оси z . Если в первом приближении учесть дифракцию света только для основного направления, в котором дифракция максимальна, то можно считать справедливым следующее волновое уравнение:

$$\nabla^2 \vec{\Psi}_{0k} + n_k^2 k_{\lambda k}^2 \vec{\Psi}_{0k} + i\alpha_k k_{\lambda k} n_{h0} \vec{\Psi}_{0k} + \nabla^2 \vec{\Psi}_{\mu k} + n_k^2 k_{\lambda k}^2 \vec{\Psi}_{\mu k} + i\alpha_k k_{\lambda k} n_{h0} \vec{\Psi}_{\mu k} = 0; \quad (II.81)$$

$$k_{\lambda k} = \frac{2\pi}{\lambda_k},$$

где ∇^2 — оператор Лапласа, означающий получение вторых производных функции по трем координатам x, y, z ; $k_{\lambda k}$ — волновое число, определяемое длиной волны света λ_k ; n_k — показатель преломления света; α_k — коэффициент поглощения света в слое (по амплитуде); $\vec{\Psi}_{0k}, \vec{\Psi}_{\mu k}$ — комплексные векторы амплитуды электрического поля, соответственно, восстанавливающего и дифрагированного пучков света. Для рассматриваемого случая (рис. 122) комплексные векторы амплитуд электрического поля имеют вид:

$$\begin{aligned}\vec{\Psi}_{\vartheta k} &= \vec{a}_{\vartheta k}(y, z) e^{i\varphi_{\vartheta k}(y, z)}; \\ \vec{\Psi}_{\mu k} &= \vec{a}_{\mu k}(y, z) e^{i\varphi_{\mu k}(y, z)},\end{aligned}\quad (\text{II.82})$$

где $\vec{a}_{\vartheta k}$, $\vec{a}_{\mu k}$ — векторы амплитуды электрического поля, соответственно, восстанавливающего и дифрагированного пучков света; $\varphi_{\vartheta k}$, $\varphi_{\mu k}$ — фазы волн света восстанавливающего и дифрагированного пучков света.

Так как значения коэффициента модуляции показателя преломления света в слое реальных голограмм весьма малы, можно приближенно считать, что

$$n_k = n_{k0} + n_\lambda \cos(\vec{k}_\lambda \vec{r}), \quad (\text{II.83})$$

где $\vec{r}$ — радиус-вектор, определяющий положение рассматриваемого малого элемента слоя; n_{k0} , n_λ — среднее значение и амплитуда переменной слагающей показателя преломления света в слое.

В фазовых голограммах значение коэффициента поглощения света обычно весьма мало, и его переменной слагающей, как правило, можно пренебречь, полагая приближенно

$$\alpha_k \cong \alpha_{k0}, \quad (\text{II.84})$$

где α_{k0} — среднее значение коэффициента поглощения в слое.

Обозначим значения комплексных амплитуд и векторов амплитуды электрического поля восстанавливающего и дифрагированного пучков света на входе и выходе голограммы следующим образом:

$$\begin{aligned}\Psi_{\vartheta k} &= \Psi_{\vartheta k0}, \quad \vec{a}_{\vartheta k} = \vec{a}_{\vartheta k0} \quad \text{при} \quad z = 0; \\ \Psi_{\vartheta k} &= \Psi_{\vartheta kd}, \quad \vec{a}_{\vartheta k} = \vec{a}_{\vartheta kd} \quad \text{при} \quad z = d; \\ \Psi_{\mu k} &= \Psi_{\mu k0}, \quad \vec{a}_{\mu k} = \vec{a}_{\mu k0} \quad \text{при} \quad z = 0; \\ \Psi_{\mu k} &= \Psi_{\mu kd}, \quad \vec{a}_{\mu k} = \vec{a}_{\mu kd} \quad \text{при} \quad z = d.\end{aligned}\quad (\text{II.85})$$

Примем приближенно равным нулю значение амплитуды электрического поля дифрагированного пучка света на входе рассматриваемой голограммы с толстым слоем

$$\vec{a}_{\mu k0} = 0. \quad (\text{II.86})$$

Примем для упрощения, что амплитуда электрического поля падающего пучка на входе голограммы равна единице:

$$|\vec{a}_{\vartheta k0}| = 1. \quad (\text{II.87})$$

Решение волнового уравнения (II.81) для указанных допущений было получено Когельником в предположении, что амплитуды всех

дифрагированных волн, кроме нулевого и основного — первого — порядка дифракции, ничтожно малы. Для пропускающих голограмм это решение имеет следующий вид:

$$\Psi_{\mu kd} = i \frac{k_c}{c_\mu (\gamma_1 - \gamma_2)} [\exp(\gamma_2 d) - \exp(\gamma_1 d)]; \quad (\text{II.88})$$

$$\Psi_{\vartheta kd} = \frac{k_c^2}{c_\mu (\gamma_1 - \gamma_2)} \left[\frac{\exp(\gamma_2 d)}{c_\vartheta \gamma_2 + \alpha_{k0}} - \frac{\exp(\gamma_1 d)}{c_\vartheta \gamma_1 + \alpha_{k0}} \right].$$

В уравнениях (II.88) k_c — коэффициент связи световых волн; d — толщина слоя голограммы; c_ϑ , c_μ — коэффициенты, определяющие направления восстанавливающего и дифрагированного пучков света; γ_1 , γ_2 — коэффициенты, зависящие от преломления и поглощения света в слое голограммы

$$\gamma_1 d = -\xi + (\xi^2 + \nu^2)^{\frac{1}{2}}; \quad \gamma_2 d = -\xi - (\xi^2 + \nu^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{II.89})$$

где ξ , ν — параметры, определяемые следующими выражениями:

$$\xi = \frac{d}{2} \left[\alpha_{k0} \left(\frac{1}{c_\vartheta} - \frac{1}{c_\mu} \right) - i \frac{k_\lambda}{c_\mu} \cos(\Phi - \vartheta_k) - i \frac{k_\lambda^2}{4\pi n_{k0} c_\mu} \right]; \quad (\text{II.90})$$

$$\nu = \frac{k_c d}{(c_\vartheta - c_\mu)^{\frac{1}{2}}};$$

$$k_c = \frac{\pi n_\lambda}{\lambda_h} - i \frac{\alpha_\lambda}{2}.$$

Коэффициент связи световых волн k_c определяет дифракцию света на голограмме. Если

$$n_\lambda = 0; \quad \alpha_\lambda = 0, \quad (\text{II.91})$$

и, следовательно,

$$k_c = 0,$$

то дифракция света не возникает.

Голограмма является фазовой, как указано выше, если

$$n_\lambda \neq 0; \quad \alpha_\lambda = 0, \quad (\text{II.92})$$

и амплитудной, если

$$n_\lambda = 0; \quad \alpha_\lambda \neq 0. \quad (\text{II.93})$$

В амплитудно-фазовых голограммах

$$n_\lambda \neq 0; \quad \alpha_\lambda \neq 0. \quad (\text{II.94})$$

В уравнениях (II.90) α_{k0} — среднее значение коэффициента поглощения света в слое голограммы; α_λ — амплитуда переменной слагающей коэффициента поглощения света; c — скорость света.

В выражениях (II.88) и (II.90) коэффициенты c_ϑ ; c_μ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} c_\vartheta &= \cos \vartheta_k; \\ c_\mu &= \cos \vartheta_k - \frac{\lambda_k k_\Lambda}{2\pi n_{k0}} \cos \Phi. \end{aligned} \quad (\text{II.95})$$

При соблюдении условий Брэгга

$$c_\vartheta = c_{\vartheta 0} = \cos \vartheta_{k0} \quad (\text{II.96})$$

величина c_μ равна:

$$c_\mu = \cos \mu_{k0}. \quad (\text{II.97})$$

При этом для пропускающих голограмм

$$c_\mu > 0. \quad (\text{II.98})$$

Для отражательных голограмм

$$c_\mu < 0. \quad (\text{II.99})$$

В выражениях (II.90) λ_μ — длина волны света; Φ — угол между осью z и нормалью, определяющей направление полос голограммной структуры (рис. 122).

Дифракционная эффективность пропускающих голограмм равна:

$$\eta = \frac{|c_\mu|}{c_\vartheta} \cdot \frac{|\vec{a}_{\mu kd}|^2}{|\vec{a}_{\vartheta k0}|^2}. \quad (\text{II.100})$$

В соотношении (II.100) величины $|c_\mu|$, c_ϑ учитывают влияние ширины восстанавливающего и дифрагированного пучков на полную мощность излучения этих пучков.

Согласно (II.81) — (II.87), (II.89), получаем из (II.100):

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{|c_\mu|}{c_\vartheta} \Psi_{\mu kd} \Psi_{\mu kd}^*; \\ \eta &= \frac{\exp\left(-\frac{2\alpha_{k0}d}{c_\vartheta}\right) e^{2\xi} \sin^2\left[\nu_n^2 - \xi^2\right]^{\frac{1}{2}}}{\left(1 - \frac{\xi^2}{\nu_n^2}\right)}, \end{aligned} \quad (\text{II.101})$$

где величины ν и ξ определяются по формулам (II.90).

При соблюдении условия Брэгга

$$\begin{aligned} \vartheta_k &= \vartheta_0; \quad \mu_k = \mu_0; \\ \theta_\vartheta &= \theta_\mu = \theta_0. \end{aligned} \quad (\text{II.102})$$

Здесь углы θ_ϑ , θ_μ (рис. 122) определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \theta_\vartheta &= \frac{\pi}{2} - \Phi + \vartheta_k; \\ \theta_\mu &= \Phi - \frac{\pi}{2} - \mu_k. \end{aligned} \quad (\text{II.103})$$

В данном случае параметр ξ равен:

$$\xi = \xi_z = \frac{\alpha_k d}{2} \left(\frac{1}{c_\vartheta} - \frac{1}{c_\mu} \right). \quad (\text{II.104})$$

Если поглощение света слоем голограммы мало и им можно пренебречь ($\alpha_0=0$), дифракционная эффективность, согласно (II.101), равна:

$$\eta = \frac{\sin^2\left(\nu_n^2 - \xi^2\right)^{\frac{1}{2}}}{1 - \frac{\xi^2}{\nu_n^2}}, \quad (\text{II.105})$$

согласно (II.90):

$$\xi = \xi_\lambda = i \frac{k_\Lambda d}{c_\mu} \cos(\Phi - \vartheta_k) - i \frac{k_\Lambda^2 \lambda_k d}{4\pi n_{k0} c_\mu}. \quad (\text{II.106})$$

При небольших отклонениях угла падения восстанавливающих лучей света ϑ_k от номинала ϑ_0 , соответствующего условию Брэгга, формулу (II.106) можно представить в виде:

$$\xi_\lambda \cong \frac{\Delta \vartheta k_\Lambda d \sin(\Phi - \vartheta_0)}{c_\mu}; \quad (\text{II.107})$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta_k - \vartheta_0.$$

При небольших отклонениях длины волны света λ_k от номинала λ_0 , соответствующего условию Брэгга, формулу (II.107) можно представить в виде:

$$\xi_\lambda \cong \frac{\Delta \lambda k_\Lambda}{4\pi n_{k0}}; \quad (\text{II.108})$$

$$\Delta \lambda = \lambda_k - \lambda_0.$$

В случае фазовой голограммы параметр ν , согласно (II.90), равен:

$$\nu = \nu_n = \frac{\pi n_\lambda d}{\lambda_k (c_\vartheta - c_\mu)^{\frac{1}{2}}}. \quad (\text{II.109})$$

На рис. 123 показаны кривые зависимости дифракционной эффективности пропускающей фазовой голограммы без поглощения и рассеяния света в слое, построенные по формуле (II.101), в зависимости от значений параметров v_n и ξ_λ , определяемых по формулам (II.107) — (II.109). Из кривых видно, что с ростом параметра

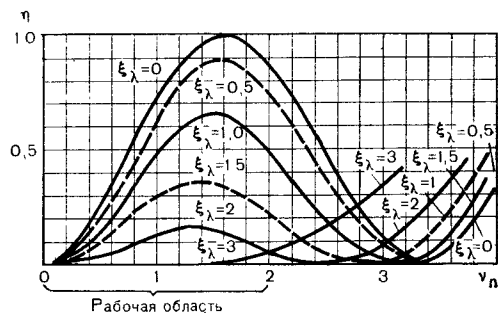


Рис. 123. Дифракционная эффективность трехмерной фазовой пропускающей голограммы (без поглощения и рассеяния света в слое) в зависимости от параметра v_n , пропорционального произведению переменной слагающей показателя преломления на толщину слоя голограммы ($n_\lambda d$) для разных значений параметра (ξ_λ), учитывающего нарушения условия Брэгга

v_n , т. е. произведения $n_\lambda d$, дифракционная эффективность изменяется периодически. Рабочей областью применительно к требованиям изобразительной голографии и голографического кинематографа является первая возрастающая ветвь кривой. При увеличении параметра ξ_λ , т. е. нарушении условия Брэгга, дифракционная эффективность снижается.

Реальные фазовые голограммы обладают обычно заметным поглощением и рассеянием света в слое. Для таких голограмм при соблюдении условия Брэгга формула (II.101) приобретает вид

$$\eta = \exp \left(- 2\xi_\alpha \frac{1 + \frac{c_\theta}{c_\mu}}{1 - \frac{c_\theta}{c_\mu}} \right) \frac{\sin^2 \left(v_n^2 - \xi_\alpha^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{1 - \frac{\xi_\alpha^2}{v_n^2}}. \quad (\text{II.110})$$

По данной формуле на рис. 124 показаны кривые зависимости дифракционной эффективности фазовой пропускающей голограммы от поглощения света в слое, согласно (II.120), при соблюдении условия Брэгга и при равенстве коэффициентов:

$$c_\mu = c_\theta. \quad (\text{II.111})$$

В случае отражательной голограммы (рис. 125) волновое уравнение (II.81) решается при иных начальных условиях, чем для

пропускающей голограммы. При восстанавливающем пучке вместо (II.86) справедливо условие:

$$\vec{a}_{\mu kd} = 0. \quad (\text{II.112})$$

Кроме того, для упрощения принимается справедливым равенство (II.87). Из указанных условий Когельником было получено

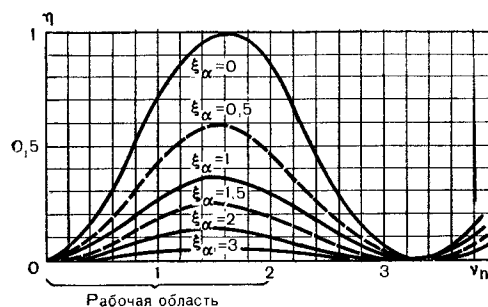


Рис. 124. Дифракционная эффективность трехмерной фазовой пропускающей голограммы в зависимости от параметра v_n , пропорционального произведению переменной слагающей показателя преломления на толщину слоя голограммы ($n_\lambda d$) для разных значений параметра ξ_α , пропорционального коэффициенту поглощения света в слое

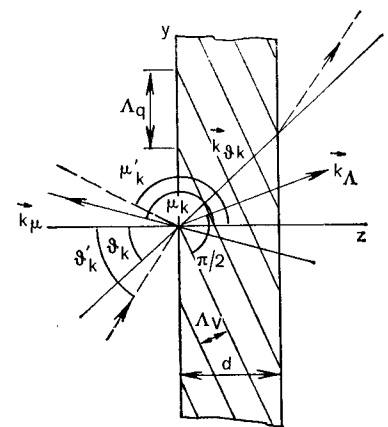


Рис. 125. Направление лучей света: восстанавливающих (θ_k) и основного порядка дифракции (μ_k) для трехмерной отражательной голограммы с простой голограммной структурой, образованной двумя плоскими встречными волнами

следующее решение волнового уравнения (II.81) в случае фазовой отражательной голограммы:

$$\begin{aligned} \Psi_{\mu'0} = & - \frac{ik_c}{\alpha_{k0} + i \frac{k_\Lambda}{c_\mu} \cos(\Phi - \vartheta_k) - i \frac{k_\Lambda^2 \lambda}{4\pi n_{k0}} + c_\mu \frac{\gamma_1 \exp(\gamma_2 d) - \gamma_2 \exp(\gamma_1 d)}{\exp(\gamma_2 d) - \exp(\gamma_1 d)}} \\ \Psi_{\vartheta kd} = & c_\mu (\gamma_1 - \gamma_2) \left\{ \left[\alpha_{k0} + c_\mu \gamma_1 + i \frac{k_\Lambda}{c_\mu} \cos(\Phi - \vartheta_k) - \right. \right. \\ & \left. \left. - i \frac{k_\Lambda \lambda_k}{4\pi n_{k0}} \right] \exp(-\gamma_1 d_1) - \left[\alpha_{k0} + c_\mu \gamma_2 + i \frac{k_\Lambda}{c_\mu} \cos(\Phi - \vartheta_k) - \right. \right. \\ & \left. \left. - i \frac{k_\Lambda^2 \lambda_k}{4\pi n_{k0}} \right] \exp(-\gamma_2 d) \right\}. \quad (\text{II.113}) \end{aligned}$$

В приведенных соотношениях для амплитуд электрического поля восстанавливающего и дифрагированного пучков света отража-

тельной голограммы величины k_λ , k_c , c_ϑ , c_μ , γ_1 , γ_2 определяются выражениями (II.79), (II.80), (II.89), (II.90), (II.95).

Дифракционная эффективность отражательных голограмм равна:

$$\eta = \frac{|c_\mu|}{c_\vartheta} \cdot \frac{|\vec{a}_{\mu k 0}|^2}{|\vec{a}_{\vartheta k 0}|^2}. \quad (\text{II.114})$$

Согласно (II.82), (II.86), (II.89), (II.113), (II.114), дифракционная эффективность отражательных голограмм равна:

$$\eta = \frac{\text{sh}^2 \left[v_n \text{ch} \left(\text{Arch} \frac{\xi_\lambda}{v_n} \right) \right]}{\text{ch}^2 \left[\text{Arch} \frac{\xi_\lambda}{v_n} + v_n \text{ch} \left(\text{Arch} \frac{\xi_\lambda}{v_n} \right) \right]}, \quad (\text{II.115})$$

где ξ , v_n — параметры, определяемые следующими выражениями:

$$\xi_\lambda = \frac{d}{2} \left[\alpha_{k0} \left(\frac{1}{c_\vartheta} - \frac{1}{c_\mu} \right) - i \frac{k_\lambda}{c_\mu} \cos(\Phi - \vartheta_k) - i \frac{k_\lambda^2 \lambda_k}{4\pi n_{k0} c_\mu} \right]; \quad (\text{II.116})$$

$$v_n = i \frac{k_c d}{(c_\vartheta c_\mu)^{\frac{1}{2}}};$$

$$k_c = \frac{\pi n_\lambda}{\lambda_{k0}} - i \frac{\alpha_\lambda}{2}.$$

В случае фазовой отражательной голограммы при отсутствии поглощения (а также рассеяния) света в слое формула (II.115) принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\xi_\lambda^2}{v_n^2} \frac{1}{\text{sh}^2(v_n^2 - \xi_\lambda^2)^{\frac{1}{2}}}}, \quad (\text{II.117})$$

где параметр ξ_λ определяется по формуле (II.106), а параметр

$$v_n = i \frac{\pi n_\lambda d}{\lambda_k (c_\vartheta c_\mu)^{\frac{1}{2}}}. \quad (\text{II.118})$$

На рис. 126 показаны построенные по формулам (II.117) зависимости дифракционной эффективности от параметра v_n , в свою очередь зависящего от модуляции коэффициента преломления света и от толщины слоя, а также от параметра ξ_λ , зависящего от степени нарушения условия Брэгга.

Если фазовая отражательная голограмма обладает существенным поглощением и рассеянием света в слое, то при соблюдении условия Брэгга дифракционная эффективность голограммы определяется, согласно (II.115), следующим соотношением:

$$\eta = \frac{1}{\left[\frac{\xi_\alpha}{v_n} + \left(1 + \frac{\xi_\alpha^2}{v_n^2} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ch} \left(v_n^2 + \xi_\alpha^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2}, \quad (\text{II.119})$$

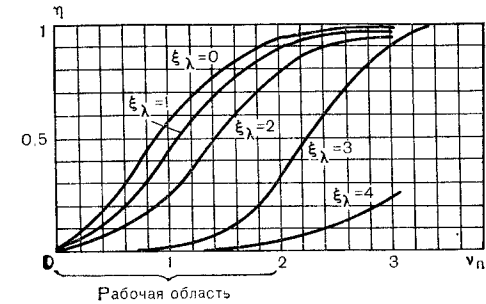


Рис. 126. Дифракционная эффективность трехмерной фазовой отражательной голограммы (без поглощения и рассеяния света в слое) в зависимости от параметра v_n , пропорционального произведению переменной слагающей показателя преломления света на толщину слоя голограммы ($n_\lambda d$) для разных значений параметра ξ_λ , учитывающего нарушения условия Брэгга

где параметр v_n определяется по формуле (II.118), параметр ξ_α равен:

$$\xi_\alpha = \frac{\alpha_{k0} d}{\cos \vartheta_0}. \quad (\text{II.120})$$

На рис. 127 показаны построенные по формулам (II.119) и (II.120) кривые зависимости дифракционной эффективности фазовых голограмм от параметра v_n , учитывающего модуляцию коэффициента преломления света в слое, а также от параметра ξ_α , учитывающего поглощение и рассеяние света в слое голограммы при соблюдении условия Брэгга.

При увеличении толщины слоя d голограммы, согласно (II.118), (II.120), значения параметров v_n и ξ_α пропорционально увеличиваются, и величина дифракционной эффективности, возрастая, стремится к пределу, равному, согласно (II.119):

$$\eta_m = \frac{1}{\left[\frac{\xi_\alpha}{v_n} + \left(1 + \frac{\xi_\alpha^2}{v_n^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2}. \quad (\text{II.121})$$

Как видно из соотношений (II.118), (II.120), отношение параметров $\frac{\xi_\alpha}{\nu_n}$ не зависит от толщины слоя и пропорционально отношению $\frac{a k_0}{n_\lambda}$.

На рис. 128 показана зависимость максимальной дифракционной эффективности фазовой отражательной голограммы от отноше-

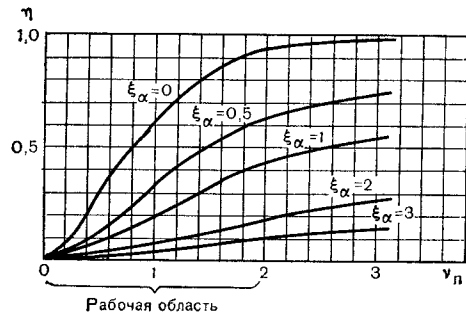


Рис. 127. Дифракционная эффективность трехмерной фазовой отражательной голограммы в зависимости от параметра ν_n , пропорционального произведению переменной слагающей показателя преломления света на толщину слоя голограммы ($n_\lambda d$) для разных значений параметра ξ_α , пропорционального коэффициенту поглощения света в слое

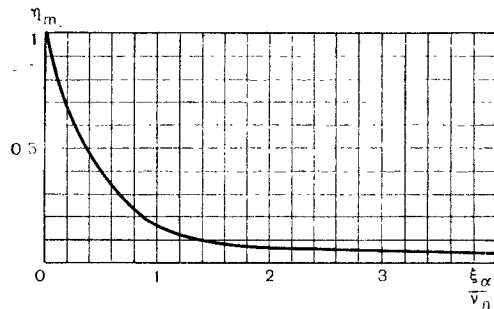


Рис. 128. Максимально достижимая дифракционная эффективность трехмерной фазовой отражательной голограммы в зависимости от отношения параметра $\frac{\xi_\alpha}{\nu_n}$, пропорционального отношению коэффициента поглощения света к амплитуде переменной слагающей показателя преломления света

ния параметров $\frac{\xi_\alpha}{\nu_n}$, пропорционального коэффициенту поглощения света в слое и обратно пропорционального амплитуде переменной слагающей показателя преломления света. Как видно из приведенных кривых, построенных по формуле (II.121), максимально

достижимое значение дифракционной эффективности голограмм сильно падает с увеличением поглощения и рассеяния света в слое.

Границы применимости соотношений, приведенных в настоящем разделе, обусловленные достаточно большой толщиной слоя голограммы, оцениваются критерием:

$$Q > 10$$

$$Q = \frac{8\pi n_{k0} d \sin^2 \theta_0}{\lambda_{k0}}. \quad (\text{II.122})$$

Формулы Когельника, несмотря на их приближенный характер, представляют существенный практический интерес, поскольку позволяют без чрезмерно длительных и сложных вычислений на электронно-вычислительных машинах получить результаты, пригодные для многих инженерных расчетов, а также для ряда качественных оценок различного рода способов и устройств регистрации и воспроизведения голографических изображений.

Эти формулы позволяют количественно оценить дифракционную эффективность, угловую и спектральную селективность голограмм, что имеет важное значение для создания систем и процессов в изобразительной голографии, голографической диа- и кинопроекции, в особенности при цветных изображениях.

Приведенные соотношения для дифракции света на трехмерной голограмме получены для случая линейной поляризации света типа s , когда вектор электрического поля для опорных и объектных лучей света перпендикулярен плоскости падения этих лучей на голограмму xz . При этом вектор голограммной структуры лежит в плоскости xz .

Если векторы электрического поля опорных и объектных лучей лежат в плоскости падения этих лучей на голограмму, т. е. в случае поляризации p -типа, вместо волнового уравнения (II.81) оканчивается справедливым векторное уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{\Psi}_{\partial k} - \nabla (\nabla \vec{\Psi}_{\partial k}) + k_{\lambda k}^2 n_k^2 \vec{\Psi}_{\partial k} - i a k_{\lambda k} n_k \vec{\Psi}_{\partial k} + \\ + \nabla^2 \vec{\Psi}_{\mu k} - \nabla (\nabla \vec{\Psi}_{\mu k}) + k_{\lambda k}^2 n_k^2 \vec{\Psi}_{\mu k} - i a k_{\lambda k} n_k \vec{\Psi}_{\mu k} = 0; \end{aligned}$$

$$k_{\lambda k} = \frac{2\pi}{\lambda_k}, \quad (\text{II.123})$$

где ∇^2 — оператор Лапласа, означающий получение вторых производных по трем координатам. В данном случае векторного преобразования

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{\Psi} = \left(\frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial z^2} \right) \vec{n}_x + \left(\frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial z^2} \right) \vec{n}_y + \\ + \left(\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial z^2} \right) \vec{n}_z. \end{aligned} \quad (\text{II.124})$$

В случае скалярного преобразования (поляризация s -типа)

$$\nabla^2 a = \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2}.$$

В уравнении (II.123) ∇ — оператор Гамильтона.

В данном случае градиент дивергенции вектора $\vec{\Psi}$:

$$\begin{aligned} \nabla(\nabla\vec{\Psi}) &= \text{grad div } \vec{\Psi}; \\ \text{grad } U &= \frac{\partial U}{\partial x} \vec{n}_x + \frac{\partial U}{\partial y} \vec{n}_y + \frac{\partial U}{\partial z} \vec{n}_z; \\ U = \text{div } \vec{\Psi} &= \frac{\partial \Psi_x}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_y}{\partial y} + \frac{\partial \Psi_z}{\partial z}, \end{aligned} \quad (\text{II.125})$$

где $\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z$ — единичные векторы в направлении осей координат x, y, z .

В уравнении (II.123) n_k — показатель преломления света, который изменяется согласно (II.83), (II.123).

Приближенное решение уравнения (II.123) при учете только двух порядков дифракции, основного и нулевого, имеет следующий вид:

$$\Psi_\mu = a_\mu e^{-i\vec{\sigma} \cdot \vec{r}}; \quad \Psi_\vartheta = a_\vartheta e^{-i\vec{\rho}_k \cdot \vec{r}}, \quad (\text{II.126})$$

где $\vec{\rho}_k, \vec{\sigma}$ — векторы, определяющие направления распространения плоских волн: восстанавливающего пучка $\vec{\Psi}_\vartheta$ и дифрагированного пучка $\vec{\Psi}_\mu$.

При соблюдении условия Брэгга

$$\vec{\sigma} = \vec{\rho}_k - \vec{k}_\Lambda. \quad (\text{II.127})$$

В уравнении (II.126) a_ϑ, a_μ — амплитуды восстанавливающей и дифрагированной плоских волн света; $\vec{n}_\vartheta, \vec{n}_\mu$ — единичные векторы, определяющие направление линейной поляризации восстанавливающей и дифрагированной волн:

$$\vec{n}_\vartheta = \frac{\vec{V}_\vartheta}{|\vec{V}_\vartheta|}; \quad \vec{n}_\mu = \frac{\vec{V}_\mu}{|\vec{V}_\mu|}, \quad (\text{II.128})$$

где $\vec{V}_\vartheta, \vec{V}_\mu$ — векторы электрического поля, соответствующие восстанавливающей и дифрагированной световым волнам.

Подставляя значения $\vec{\Psi}_\vartheta, \vec{\Psi}_\mu$ из (II.126) в уравнение (II.123) и, согласно (II.83), пренебрегая малыми членами, содержащими вторые производные Ψ , получаем следующие уравнения связанных волн для случая поляризации типа p :

$$c_\vartheta \frac{\partial \Psi_{\vartheta k}}{\partial z} + \alpha_{k0} \Psi_{\vartheta k} = -ik_c (\vec{n}_\vartheta \vec{n}_\mu) \Psi_{\mu k}; \quad (\text{II.129})$$

$$c_\mu \frac{\partial \Psi_{\mu k}}{\partial z} + (\alpha_{k0} + ic_s) \Psi_{\mu k} = -ik_c (\vec{n}_\vartheta \vec{n}_\mu) \Psi_{\vartheta k},$$

где c_s — величина, определяющая нарушение фазовых соотношений при отклонении от условий Брэгга:

$$c_s = k_\Lambda \cos(\Phi - \vartheta_k) + \frac{k_\Lambda^2}{2k_{\lambda k} n}. \quad (\text{II.130})$$

В уравнении (II.129) $(\vec{n}_\vartheta \vec{n}_\mu)$ — скалярное произведение векторов $\vec{n}_\vartheta, \vec{n}_\mu$, равное

$$(\vec{n}_\vartheta \vec{n}_\mu) = \cos(\vartheta_k - \mu_k). \quad (\text{II.131})$$

Уравнение связанных волн (II.129), полученное для случая p -поляризации, отличается от уравнения связанных волн, справедливого для поляризации s -типа только наличием множителя $(\vec{n}_\vartheta \vec{n}_\mu)$. Следовательно, соотношения для дифракционной эффективности, угловой и спектральной селективности, приведенные для случая s -поляризации, оказываются справедливыми и для случая p -поляризации.

Однако при расчетах по формулам (II.90), (II.116) вместо коэффициента связи k_c нужно использовать приведенное значение коэффициента связи k'_c , равное:

$$k'_c = k_c \cos(\vartheta_k - \mu_k). \quad (\text{II.132})$$

Из уравнения (II.129) следует, что при малой разности углов, определяющих направления восстанавливающих и дифрагированных лучей света $(\vartheta - \mu)$ в толще слоя, характер поляризации мало влияет на интенсивность дифрагированных пучков света. Однако при больших значениях этой разности углов, например 30° и более, указанное влияние может быть существенным. При разности углов $\vartheta - \mu = \pm 90^\circ$ дифракция света на голограмме вообще не возникает.

II.2.3. Дифракция света первых и вторых порядков на трехмерных голограммах

Рассмотрим дифракцию света на трехмерной голограмме, имеющей простую голограммную структуру, образованную двумя плоскими световыми волнами. Примем, что поверхность голограммы плоская и перпендикулярна оси z , а вектор голограммной структуры лежит в плоскости yz . Показатель преломления света изменяется в направлении оси y так, что (см. рис. 122)

$$n_k = n_{k0} + n_\lambda \cos \frac{2\pi y}{\Lambda_q}. \quad (\text{II.133})$$

В разделе (II.2.2) рассмотрена дифракция света на подобной голограмме с учетом только основного (минус первого) и нулевого порядков, когда точно или приближенно соблюдается условие Брэгга для данного порядка дифракции. Однако, если направление или длина волны света падающих лучей при воспроизведении изображения существенно отличаются от таковых при получении голограммы, могут возникнуть весьма интенсивные пучки света дифракции плюс первого порядка или заметные по интенсивности пучки света дифракции вторых порядков.

Для определения интенсивности дифрагированных пучков света в подобных случаях могут быть использованы основные положения теории связанных волн, разработанной Когельником (раздел II.2.2), и учтены не две, а три или более дифрагированных волн.

Если принять, как и ранее, вектор электрического поля перпендикулярным плоскости падения лучей света (*s*-поляризация), т. е. направленным вдоль оси *x*, то волновое уравнение может быть записано в следующем виде:

$$\nabla^2 \Psi + (k_{\lambda k}^2 n_k^2 + i k_{\lambda k} n_{k0}) \Psi = 0. \quad (\text{II.134})$$

$$k_{\lambda k} = \frac{2\pi}{\lambda_k}.$$

Для принятых допущений:

$$n_k = n_{k0} + n_\lambda \cos \vec{k}_\lambda \vec{r}; \quad (\text{II.135})$$

$$|\vec{k}_\lambda| = \frac{2\pi}{\Lambda_v}.$$

Комплексная амплитуда суммарного электрического поля в голограмме равна:

$$\Psi = \sum_{m_D} a_m(y) \exp(-i \vec{\rho}_m \vec{r}), \quad (\text{II.136})$$

где $\vec{r}$ — радиус-вектор; $a_m(y)$ — амплитуда плоской волны света дифракции порядка m_D ; $\vec{\rho}_m$ — вектор направления распространения плоской волны света дифракции порядка m_D .

Если соблюдается условие Брэгга для данного порядка дифракции, то справедливо следующее векторное соотношение:

$$\vec{\rho}_m = \vec{\rho}_0 + m_D \vec{k}_\lambda. \quad (\text{II.137})$$

В общем случае должно соблюдаться условие:

$$\rho_{my} = \rho_{0y} + m_D k_{\lambda y}; \quad k_{\lambda y} = \frac{2\pi}{\Lambda_q}, \quad (\text{II.138})$$

где ρ_{my} , ρ_{0y} — слагающие векторов $\vec{\rho}_m$, $\vec{\rho}_0$ по оси *y*.

Подставляя значения Ψ из уравнения (II.136) в волновое уравнение (II.134) и пренебрегая малыми членами, содержащими вторые производные $\frac{\partial^2 a_m}{\partial z^2}$, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{mz}}{\rho_0} \cdot \frac{da_m}{dz} + \left[\alpha_k + i \frac{k_{\lambda k}^2 n_k^2 - \rho_m'^2}{2k_{\lambda k} n_{k0}} \right] a_m + \\ & + i \frac{k_{\lambda k} n_\lambda^2}{4n_{k0}} \{ a_{m+1} \exp[-i(\rho_{m+1,z} - \rho_{m,z} - k_{\lambda z})] + \\ & + a_{m-1} \exp[-i(\rho_{m-1,z} - \rho_{m,z} + k_{\lambda z})] \}, \end{aligned} \quad (\text{II.139})$$

где $k_{\lambda z}$ — составляющая волнового вектора решетки $\vec{k}_\lambda$ в направлении оси *z*.

Обозначим:

$$b_m = a_m \exp[-i(\vec{\rho}_m - \vec{\rho}_0) \vec{r}]; \quad (\text{II.140})$$

$$b_m^2 = a_m^2.$$

Подставляя отсюда значение b_m в уравнения (II.139), получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка без экспоненциальных членов:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_{mz}}{k_{\lambda k} n_{k0}} \cdot \frac{db_m}{dz} + \left\{ \alpha_k + i \left[\frac{\rho_{mz}^2 - \rho_{mz} \rho_{mz}'}{k_{\lambda k} n_{k0}} + \frac{k_{\lambda k}^2 n_{k0} - \rho_m'^2}{2k_{\lambda k} n_{k0}} \right] \right\} b_m + \\ & + i \frac{k_{\lambda k} n_\lambda^2}{4n_{k0}} (b_{m+1} + b_{m-1}) = 0. \end{aligned} \quad (\text{II.141})$$

II.2.4. Дифракция света на трехмерных голограммах со сложной голограммной структурой, образованной множеством объектных волн

Обычно к каждой точке поверхности регистрирующего слоя при получении голограммы приходят объектные лучи во множестве направлений, поэтому целесообразно рассматривать объектный пучок как состоящий из множества гомоцентрических элементарных пучков. При этом каждый центр элементарного пучка располагается на поверхности объекта.

Число таких элементарных пучков очень велико. Например, при наблюдении изображения в пределах углов $\alpha_H = 20^\circ$ по горизонтали и $\alpha_V = 15^\circ$ по вертикали и при разрешающей способности системы $\gamma_R = 3$ угл. мин общее число элементарных объектных пучков достигает

$$N_H = \frac{\alpha_H \alpha_V}{\gamma_R^2};$$

$$N_H = \frac{20 \cdot 15 \cdot 60^2}{3^2} = 1,2 \cdot 10^5. \quad (\text{II.142})$$

Число элементарных объектных пучков указанного порядка проходит через каждую точку поверхности регистрирующего слоя в случае получения Фурье-голограммы. Для изобразительной голографии и голографического кинематографа более характерно использование квазисфокусированных голограмм, когда центры элементарных объектных пучков, соответствующие элементам изображения поверхности объекта, расположены вблизи поверхности регистрирующего слоя. В таких случаях через каждую точку поверхности регистрирующего слоя проходят лучи значительно меньшего числа объектных пучков (может быть, на несколько порядков), чем в случае Фурье-голограмм.

В случаях, которые представляют практический интерес для изобразительной голографии и голографического кинематографа, опорный пучок света, как правило, гомоцентрический. Так как центр опорного пучка обычно расположен на расстоянии, значительно превышающем поперечные размеры голограммы, то в первом приближении опорную волну света можно считать плоской, т. е. опорные лучи света параллельны друг другу в пределах опорного пучка.

Можно в первом приближении считать также и объектные волны плоскими. Для квазисфокусированных голограмм такое приближение будет лучше соблюдаться для отдельных участков голограммы, а не голограммы в целом.

Сложную голограммную структуру трехмерной голограммы, полученную в данных условиях, можно рассматривать как состоящую из множества элементарных структур, каждая из которых образована парой плоских, или, более точно, сферических, волн. Указанные элементарные голограммные структуры составляют две группы: 1) кроссмодуляционные элементарные структуры, образованные опорной волной света и одной элементарной объектной волной; 2) интермодуляционные элементарные структуры, образованные каждой двумя элементарными объектными волнами.

Дифракция света на трехмерной голограмме, имеющей такую сложную голограммную структуру, может быть количественно оценена с помощью модовой теории, разработанной В. Г. Сидоровичем, Б. Я. Зельдовичем и В. В. Шкуновым.

В основу модовой теории трехмерных голограмм положено понятие мод голограммы — световых полей, возникающих при падении света на голограмму и определяемых ее голограммной структурой, а также характером падающей на голограмму восстанавливающей волны.

Поскольку при получении голограммы результирующее световое поле, включающее как опорный, так и объектный пучки света, мож-

но представить как сумму отдельных плоских волн, это результирующее поле можно выразить следующим образом:

$$\Psi_s(\vec{r}) = \sum_{p=0, 1, 2, \dots}^N \Psi_p e^{i \vec{k}_p \vec{r}}; \quad (\text{II.143})$$

$$\vec{k}_p = \vec{n}_x k_{px} + \vec{n}_y k_{py} + \vec{n}_z k_{pz}; \quad |\vec{k}_p| = \frac{2\pi}{\lambda_s},$$

где Ψ_s — комплексная амплитуда результирующего электрического поля при получении голограммы; Ψ_p — комплексная амплитуда электрического поля элементарной плоской волны номер p ; $\vec{k}_p$ — волновой вектор элементарной плоской волны номер p ; $\vec{r}$ — радиус-вектор.

Выражение для результирующего светового поля (II.143) является приближенным, поскольку не учитывает влияния поляризации света на формирование голограммной структуры. Это влияние, обуславливающее погрешность в оценке возникающей голограммной структуры, тем меньше, чем менее значительно различие в направлениях векторов электрического поля отдельных волн света. Указанная погрешность оказывается небольшой, если все лучи света, проходящие через какую-либо точку на поверхности регистрирующего слоя, оказываются в пределах малого телесного угла, а поляризация света близка к линейной и проекция вектора электрического поля отдельных волн на какое-либо единое направление имеет значение, близкое к модулю вектора.

Примем, что регистрирующая среда после экспонирования и обработки изменяет свою диэлектрическую проницаемость на величину $\Delta\epsilon(\vec{r})$ пропорционально локальной плотности энергии света при экспонировании:

$$\Delta\epsilon(\vec{r}) = k_\epsilon t \epsilon_0 |\Psi_s(\vec{r})|^2, \quad (\text{II.144})$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость регистрирующей среды в отсутствие экспонирования; t — время экспонирования; k_ϵ — коэффициент пропорциональности.

Так как обычно

$$\Delta\epsilon \ll \epsilon_0, \quad (\text{II.145})$$

то выражению (II.144) соответствует следующее соотношение:

$$\Delta n(\vec{r}) = k_n t n_0 |\Psi_s(\vec{r})|^2, \quad (\text{II.146})$$

где n_0 — показатель преломления света неэкспонированного слоя; Δn — приращение показателя преломления света регистрирующей среды при экспонировании.

Так как $n_0 = \sqrt{\epsilon_0}$, то очевидно, что

$$k_n = 0,5k_z. \quad (\text{II.147})$$

Из соотношения (II.143), (II.144) следует, что

$$\Delta \epsilon(\vec{r}) = k_z \epsilon_0 \sum_{p,q} \Psi_p \Psi_q^* e^{i(\vec{k}_p - \vec{k}_q) \vec{r}}, \quad (\text{II.148})$$

где p, q — номера двух плоских волн, образующих голограммную структуру номер pq .

Как указывалось, в условиях изобразительной голографии и голографического кинематографа обычно пучок света, падающий на голограмму, можно рассматривать как представляющий собой плоскую волну. Модовая теория предусматривает более общий случай, когда пучок света, падающий на голограмму, имеет несколько плоских компонент. При этом комплексную амплитуду электрического поля этого пучка света определяют следующим выражением:

$$\Psi_R(\vec{r}) = \sum_j^R \Psi_j e^{i \vec{k}_j \vec{r}}, \quad (\text{II.149})$$

где $\Psi_R(\vec{r})$ — комплексная амплитуда электрического поля пучка света, падающего на голограмму; $\Psi_j, \vec{k}_j$ — комплексная амплитуда и волновой вектор элементарной плоской компоненты пучка света (номер j); R — число плоских компонент пучка света.

При восстановлении на голограмму может падать пучок света произвольной интенсивности, но в тех же направлениях и с той же длиной волны, что и при получении голограммы (при этом имеется в виду, что регистрирующий слой не деформировался с момента экспонирования). Восстанавливающий пучок может иметь также другие направления и длину волны, при которых в результате дифракции возникает достаточно интенсивное световое поле. Каждое из таких световых полей характеризуется определенным направлением волн света, соотношением их амплитуд, называется модой голограммы и выражается следующим образом:

$$\Psi_k^{(m)}(\vec{r}) = \sum_p \Psi_p^{(m)} e^{i \vec{k}_p^{(m)} \vec{r}}, \quad (\text{II.150})$$

где $\Psi_k^{(m)}(\vec{r})$ — комплексная амплитуда результирующего электрического поля при падении на голограмму пучка света моды номер m ; $\Psi_p^{(m)}$ — комплексная амплитуда элементарной плоской компоненты (номер p электрического поля моды номер m).

Элементарные плоские компоненты электрического поля каждой моды при достаточно большой толщине слоя голограммы обладают следующим свойством:

$$\vec{k}_q^{(m)} - \vec{k}_p^{(m)} = \vec{k}_q - \vec{k}_p. \quad (\text{II.151})$$

В данном уравнении каждой паре значений p, q соответствует элементарная голограммная структура pq .

Для принятого допущения малых значений разности углов между опорными и объектными лучами света можно исходить при рассмотрении дифракции света на голограмме из скалярного волнового уравнения:

$$\nabla^2 \Psi + k_{\lambda k}^2 \epsilon(\vec{r}) \Psi = 0. \quad (\text{II.152})$$

Подставляя Ψ_k (из (II.150) в уравнение (II.152), получаем следующую систему алгебраических уравнений:

$$k_\epsilon + \Psi_p \sum_{n \neq l} \Psi_n^{(m)} \Psi_l^* - \Psi_l^{(m)} e_l^{(m)} = 0;$$

$$e_l^{(m)} = \frac{|\vec{k}_l^{(m)}|^2 - k_{\lambda k}^2 (\epsilon_0 + \Delta \epsilon')}{k_{\lambda k}^2 \epsilon_0};$$

$$\Delta \epsilon' = k_z \epsilon \sum_{p=0}^N |\Psi_p(r)|^2. \quad (\text{II.153})$$

Выражение (II.153) может быть записано в виде квадратной матрицы с $N+1$ строками и столбцами. Элементы этой матрицы равны

$$A_{pq} = k_\epsilon + \Psi_p \Psi_q^*; \quad A_{pp} = 0. \quad (\text{II.154})$$

$p \neq q \qquad p = 0, 1 \dots N$

Можно считать, что в большинстве случаев, представляющих практический интерес, соблюдается условие:

$$\frac{\delta_{pq}^2}{\Delta \epsilon'} \gg 1, \quad (\text{II.155})$$

где δ_{pq} — угол между векторами $\vec{k}_p$ и $\vec{k}_q$ ($p \neq q$).

При соблюдении условия (II.155) можно в первом приближении пренебречь интенсивностью «шумовых» плоских волн, т. е. волн света, которые возникают (при падении на голограмму восстанавливающей волны) в направлениях, отсутствовавших в процессе получения голограммы.

Задача определения комплексных амплитуд компонент различных мод $\Psi_p^{(m)}$ сводится к нахождению собственных значений и собственных векторов матрицы (II.153) и (II.154).

Собственные векторы этой матрицы задают базис в $N+1$ -мерном пространстве, образованном векторами комплексных амплитуд

плоских компонент опорного пучка. При выборе мод в качестве базисных целесообразно принять направления распространения плоских компонент пучка, падающего на голограмму, такими же, как направления компонент опорного пучка при получении голограммы.

Если поверхность голограммы лежит в плоскости xy , а направления опорных и объектных лучей света составляют небольшие углы с осью z , то волновые векторы плоских компонент мод, выбранных в качестве базисных, равны:

$$\vec{k}_j^{(m)} = k_{jx}\vec{n}_x + k_{jy}\vec{n}_y + \left(k_{jz} + \frac{\sqrt{\varepsilon_0} k_{\lambda k} \left(e^{(m)} + \frac{\Delta\varepsilon'}{\varepsilon_0} \right)}{2} \right) \vec{n}_z. \quad (\text{II.156})$$

Основные уравнения модовой теории, позволяющие выразить количественно важнейшие количественные зависимости дифракционной эффективности от различных параметров, приведены для параксиального приближения, когда направления опорных и объектных лучей близки к оси z , перпендикулярной к поверхности голограммы.

Модовая теория развита и для более общего случая, когда опорный и объектный пучки имеют сложную пространственно-неоднородную структуру.

При получении голограммы результирующее электрическое поле опорного и объектного пучков света может быть выражено следующим образом:

$$\vec{\Psi}_s(\vec{r}, z) = \Psi_{s\vartheta}(\vec{r}, z) \vec{e}_\vartheta + \Psi_{s\mu}(\vec{r}, z) \vec{e}_\mu, \quad (\text{II.157})$$

где $\vec{\Psi}_s(\vec{r}, z)$ — комплексный вектор амплитуды электрического поля опорного и объектного пучков света; $\vec{r} = \vec{r}(x, y)$ — радиус-вектор, определяющий положение данной точки пространства, зависящий от двух координат x, y ; z — координата данной точки пространства по оси z , перпендикулярной поверхности регистрирующего слоя; $\Psi_{s\vartheta}, \Psi_{s\mu}$ — комплексные амплитуды электрического поля опорного и объектного пучков света; $\vec{e}_\vartheta, \vec{e}_\mu$ — комплексные векторы, определяющие поляризацию опорного и объектного пучков любого типа: эллиптическую, линейную или круговую разного направления вращения.

Векторы $\vec{e}_\vartheta$ и $\vec{e}_\mu$ перпендикулярны центральному направлению распространения, соответственно, опорного и объектного пучков. Уравнение (II.157) по этой причине приближенно. Погрешности, вносимые сделанным приближением, тем меньше, чем меньше разница в направлениях распространения отдельных плоских элементарных волн в пределах отдельно опорного и объектного пучков света.

После экспонирования и обработки комплексная диэлектрическая проницаемость с учетом поглощения света в слое равна:

$$\varepsilon(\vec{r}, z) = \varepsilon_0 + \Delta\varepsilon + k_\varepsilon t \varepsilon_0 \left[\Psi_{s\vartheta}^2(\vec{r}, z) + \Psi_{s\mu}^2(\vec{r}, z) \right] + k'_\varepsilon t \varepsilon_0 \left[\Psi_{s\vartheta}^*(\vec{r}, z') \Psi_{s\mu}(\vec{r}, z') (\vec{e}_{s\vartheta}^* \vec{e}_{s\mu}) + \Psi_{s\vartheta}(\vec{r}, z') \Psi_{s\mu}^*(\vec{r}, z') (\vec{e}_{s\vartheta} \vec{e}_{s\mu}^*) \right], \quad (\text{II.158})$$

где $\Delta\varepsilon$ — изменение диэлектрической проницаемости в результате обработки (возникает даже в отсутствие экспонирования); $k_\varepsilon, k'_\varepsilon$ — коэффициенты зависимости относительного приращения показателя преломления от экспозиции (эти коэффициенты могут учитывать частотно-контрастную характеристику регистрирующего материала, соответственно, интермодуляционных и кроссмодуляционных слагаемых); z' — приведенная координата (ось z), учитывающая деформацию (усадку) регистрирующего слоя:

$$z' = zk_d, \quad (\text{II.159})$$

где k_d — коэффициент изменения толщины слоя с момента экспонирования до воспроизведения голографического изображения.

При падении на голограмму световой волны с частотой $\omega_k = \omega_s + \Delta\omega$ (где ω_s — частота поля при получении голограммы).

Может быть определена дифракционная эффективность голограммы как отношение полной энергии волны, выходящей из голограммы в направлении основного порядка дифракции, к энергии волны, падающей на голограмму.

Если поглощение в фазовой голограмме мало и им можно пренебречь, дифракционная эффективность пропускающей голограммы выражается следующим образом:

$$\eta = \frac{\sin^2 \left(M_H \sqrt{\xi_B^2 + 1} \right)}{\xi_B^2 + 1}, \quad (\text{II.160})$$

где M_H — параметр, характеризующий «силу» голограммы, зависящий от модуляции показателя преломления света в слое и от толщины слоя; ξ_B — параметр, зависящий от степеней отклонения от условий Брэгга:

$$M_H = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_s}{c} dk'_\varepsilon t n_0 \sqrt{I_{s\vartheta} I_{s\mu}} (\vec{e}_{s\mu} \vec{e}_{s\vartheta}^*) P (\cos \mu_s \cos \vartheta)^{-0.5};$$

$$\xi_B = \left[\left(\Delta n_0 + \Delta n_\mu + \Delta n_\vartheta + n_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_s} + n_0 (1 - k_d) \cos \vartheta_s \cos \mu_s \right) \times \right. \\ \times (\cos \vartheta_s - \cos \mu_s) + \left(\vec{n}_{s\vartheta} \vec{n}_{k\vartheta} \right) n_0 \cos \mu_s - \\ \left. - \left(\vec{n}_{s\mu} \vec{n}_{k\vartheta} \right) n_0 \cos \vartheta_s + \Delta n_\mu (f_\mu - 1) \cos \vartheta_s - \right. \\ \left. - \Delta n_\vartheta (f_\vartheta - 1) \cos \mu_s \right] / k'_\varepsilon t n_0 \sqrt{I_{s\vartheta} I_{s\mu}} (\vec{e}_{s\mu} \vec{e}_{s\vartheta}^*). \quad (\text{II.161})$$

Обозначены: f_s, f_μ — коэффициенты самовоздействия для восстанавливающего и дифрагированного пучков, учитывающие взаимодействие распространяющейся волны с возмущениями диэлектрической проницаемости.

Для плоских волн:

$$f_s = 1, \quad f_\mu = 1. \quad (\text{II.162})$$

Для случая, когда волна обладает широким угловым спектром:

$$f_s = 2, \quad f_\mu = 2. \quad (\text{II.163})$$

В уравнениях (II.161) $\vec{n}_{s0}, \vec{n}_{s\mu}$ — единичные векторы, определяющие центральное направление распространения волн, соответственно, в опорном и объектном пучках при получении голограммы; $\vec{n}_{k\varphi}$ — вектор, определяющий изменение вектора электрического поля волны при воспроизведении по отношению к вектору электрического поля при регистрации, обусловленное изменением направления распространения волны.

Если поглощение света в фазовой отражательной голограмме мало и им можно пренебречь, то дифракционная эффективность такой голограммы может быть определена следующим выражением:

$$\eta = \frac{1}{\xi_B^2 + |1 - \xi_B^2| \operatorname{cth}^2 (M_H \sqrt{|1 - \xi_B^2|})} \quad (\text{II.164})$$

В данном выражении параметр M_H определяют по (II.156), а параметр ξ_B может быть подсчитан следующим образом:

$$\begin{aligned} \xi_B = & \left[\left(\Delta n_0 + \Delta n_\mu + \Delta n_s + n_0 \frac{\Delta \omega}{\omega_s} - n_0 (1 - k_d) \cos \vartheta_s \cos \mu_s - \right. \right. \\ & - \left(\vec{n}_{s0} \vec{n}_{k\varphi} \right) n_0 \cos \mu_s + \left(\vec{n}_{s\mu} \vec{n}_{k\varphi} \right) n_0 \cos \vartheta_s + \Delta n_\mu (f_\mu - 1) \cos \vartheta_s + \\ & \left. \left. + \Delta n_s (f_s - 1) \cos \vartheta_s \right] / k'_e t n_0 \sqrt{I_{s0} I_{s\mu}} \left(\vec{e}_{s\mu} \vec{e}_{s0}^* \right). \end{aligned} \quad (\text{II.165})$$

В уравнениях (II.161) и (II.165) приняты следующие обозначения: n_0 — показатель преломления света в регистрирующей среде при получении голограммы; Δn_0 — изменение показателя преломления неэкспонированной среды за счет обработки; $\Delta n_s, \Delta n_\mu$ — средние изменения показателя преломления, возникающие в результате экспонирования, соответственно, опорным и объектным пучками.

Приведенные основные соотношения модовой теории голограмм позволяют сделать ряд важных выводов о характере дифракции света на трехмерных голограммах со сложной голограммной структурой. Оказывается, такие важнейшие закономерности, как зависимость дифракционной эффективности голограммы от толщины слоя и глубины модуляции показателя преломления света, спектральная и угловая селективность трехмерных пропускающих и отражатель-

ных голограмм, очень близки для голограмм со сложной и простейшей голограммной структурой, обусловленной только двумя плоскими волнами.

Общий характер носит и зависимость интенсивности дифрагированных пучков света от степени поглощения света в слое, поляризации света и др.

Важнейший вывод модовой теории заключается в том, что в рабочей области, используемой в изобразительной голографии и голографическом кинематографе, интенсивность основного дифрагированного пучка света при воспроизведении изображения связана линейной зависимостью с интенсивностью объектного пучка при получении голограммы. Эта линейная зависимость соблюдается в рабочей области характеристической дифракционной кривой не только для объектного пучка в целом, но и для отдельных элементарных составляющих объектного пучка, соответствующих малым элементам поверхности объекта.

Линейность процесса регистрации — воспроизведение голографического изображения в указанном смысле позволяет в расчетах систем передачи голографического изображения применить принцип аддитивности, определяя интенсивности отдельных элементарных дифрагированных пучков независимо друг от друга.

Отклонения от линейной зависимости яркость объекта — яркость изображения происходят в верхней части характеристики, когда дифракционная эффективность приближается к максимальному значению. Отклонения от линейной зависимости возникают также в начальной области характеристики вследствие шума голограммы, основная причина которого — рассеяние света вследствие зернистой структуры слоя, в особенности после отбеливания.

Важное следствие модовой теории — оценка роли интермодуляционных шумов, обусловленных возникновением элементарных составляющих голограммной структуры вследствие интерференции света отдельных элементарных объектных пучков. Однако модовая теория указывает на сильное подавление интермодуляционного шума в трехмерных голограммах, связанное с влиянием условий Брэгга.

Радикальная мера снижения интермодуляционных шумов — выбор достаточно большого значения отношения интенсивностей опорного и объектного пучков света, а также использование квазисфокусированных голограмм. Уже при отношении интенсивностей опорного и объектного пучков света, равном 5—10, уровень интермодуляционных шумов становится достаточно малым.

Кроме процессов, связанных с интермодуляционными составляющими голограммной структуры, модовая теория дает объяснение и позволяет произвести качественную и количественную оценку ряда других зависимостей, которые не укладываются в рамки теории двух плоских связанных волн, разработанной для простейшей голограммной структуры. К их числу относят, например, отмеченное усиление взаимодействия световых волн с голограммной структурой, образованной пространственно неоднородным световым полем.

II.3.1. Особенности голографического изображения

Голографическое изображение имеет большие преимущества по сравнению с обычным кинофотоизображением: оно трехмерное, а не двумерное; на нем может быть получен значительно больший диапазон яркости; обладает переменным ракурсом, который естественно меняется при смещении положения зрителя по отношению к изображению; на объектах с бликующими деталями происходит перемещение бликов, изменение их яркости, когда зритель осматривает голограмму с разных точек зрения.

Перечисленные преимущества обуславливают характерную реалистичность голографических изображений; голограммы часто становятся неотличимыми от реальных объектов. Это относится к высококачественным голограммам, воспроизводящим статические изображения. Есть основания утверждать, что эти преимущества можно сохранить и в киноголографическом изображении, подобно тому как сохранились высокие качественные показатели фотографических статических изображений в совершенном киноизображении.

Необходимо, чтобы по основным показателям качества изображения система голографического кинематографа не уступала современному кинофотопроцессу в правильной передаче контраста, точной цветопередаче, резкости, яркости и устойчивости изображения, в зернистости и других характеристиках, а также по угловым и абсолютным размерам воспроизводимой сцены, геометрическим искажениям.

Конечно, выполнение перечисленных требований возможно лишь при определенных ограничениях снимаемых сюжетов, что имеет место и в современном кинематографе (глубина снимаемой сцены, минимальное расстояние до ближайшего объекта съемки, скорость перемещения объекта и киносъёмочного аппарата, яркие самосветящиеся объекты и др.).

Одна из основных задач при создании системы голографического кинематографа заключается в достижении точного соответствия между параметрами воспроизводимого изображения и снимаемой сцены. Кроме этого важна также и задача получения заданных отклонений параметров изображения от оригинала с целью усиления главных смысловых или эмоциональных факторов.

Количественные критерии требуемого качества киноголографического изображения зависят от назначения системы голографического кинематографа. В перспективе можно представить широкий диапазон применений голографического кинематографа: художественно-театральное, информационно-выставочное, научно-популярное и учебное, развлекательно-аттракционное, научно-исследовательское, промышленное (для неразрушающего контроля).

В настоящем разделе приведены результаты теоретических и расчетных оценок влияния различных факторов на качество голографического киноизображения.

Согласно ранее проведенным исследованиям, качество киноизображения может количественно оцениваться с помощью обобщенного критерия:

$$(1 - \zeta^q)^p = (1 - \zeta_1^q)(1 - \zeta_2^q) \dots (1 - \zeta_p^q), \quad (\text{II.166})$$

где ζ — обобщенный критерий качества киноизображения; $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_p$ — нормированные частные критерии по отдельным показателям качества изображения (резкости, контрасту, цветопередаче...); p — общее число частных критериев; q — константа, которую можно принять равной около $q = p$.

Значения критерия качества изображения ζ и примерная визуальная оценка качества этого киноизображения приведены в табл. 18.

Таблица 18

Визуальная оценка киноизображения	Значение нормированного критерия качества изображения ζ
Отличное	0,125
Хорошее	0,25
Удовлетворительное	0,5
Едва допустимое	1,0

Зависимость частных количественных критериев качества изображения от характеристик основных элементов системы голографического кинематографа (кинопленок, оптики, механизмов аппаратуры, осветительных устройств и источников света, экранов) весьма существенно отличается от зависимости критериев качества в обычных системах кинематографа.

Кроме того, указанные зависимости количественных критериев качества голографического киноизображения существенно отличаются между собою для разных классов систем: с передачей горизонтальных и вертикальных ракурсов или же с передачей только горизонтальных ракурсов. Особенно существенные различия имеют место для разных видов систем кинематографа; с квазисфокусированными голограммами или с квази-Фурье голограммами на пленке.

При этом, как правило, в системах с квазисфокусированными голограммами проще достигается более высокое качество изображения по большей части критериев: контраст, цветопередача, резкость, зернистость. Однако по отдельным параметрам, например по максимальной яркости малых деталей изображения, устойчивости изображения системы с квази-Фурье голограммами могут иметь преимущества перед системами с квазисфокусированными голограммами.

Отдельные виды искажений в голографическом кинематографе сильно отличаются по своему характеру от искажений в обычных системах кино. Например, зернистая структура голограммного изображения обуславливается главным образом явлением интерференции когерентного света.

Путем создания технических средств с оптимальными параметрами и выбором наиболее рациональных технологических процессов можно добиться снижения уровня искажений. Расчетные и экспериментальные оценки показывают, что в киноголографическом процессе можно, в принципе, получить цветное трехмерное изображение достаточно высокого качества. Первоначально этого проще достигнуть при создании голографического кинозрелища-аттракциона с тем, чтобы в дальнейшем приблизиться к тому высокому качеству изображения, которое достигнуто в современном кинематографическом процессе с двухмерным изображением.

II.3.2. Резкость изображения

Резкость изображения — важнейший параметр, определяющий качество голограммы. Зритель воспринимает изображение нерезким, когда видит вместо скачкообразного изменения яркости у границы знакомого предмета или его детали «размазанную» полосу с плавно изменяющейся яркостью нечеткого контура предмета.

Снижение резкости в обычном кинематографическом процессе обуславливается недостаточно высокой разрешающей способностью киноплёнок и объективов, их ограниченной частотно-контрастной характеристикой, что связано со значительной зернистостью фотографических материалов и светорассеянием в фотослоях, а также аберрациями объективов.

В голографическом процессе снижение резкости изображения обусловлено другими причинами. Разрешающая способность голографических фотоматериалов столь велика, а размеры зерен фотоэмульсии столь малы, что эти факторы непосредственно не могут оказывать влияния на резкость изображения. При поперечных размерах кадра на пленке, равных нескольким миллиметрам или более, дифракционное рассеяние света также практически не влияет на резкость изображения.

Для оценки резкости изображения в киноголографическом процессе может быть применен известный количественный критерий:

$$\zeta_r = \frac{v_a}{v_z}, \quad (II.167)$$

где ζ_r — нормированный критерий резкости изображения (результатирующего, наблюдаемого зрителем); v_z, v_a — критические пространственные частоты, приведенные к рассматриваемому изображению при сквозном кинематографическом процессе — от съемки до проекции и зрительного анализатора.

При этом

$$\frac{1}{v_z^2} = \sum_{k=1,2,3 \dots p} \frac{1}{v_k^2}, \quad (II.168)$$

где v_k — критическая пространственная частота элемента кинематографического процесса (номер k); всего p звеньев в сквозном кинематографическом процессе.

Значение нормированного критерия качества изображения по резкости, определяемого формулой (II.167), может быть приближенно определено с помощью следующих соотношений:

$$\zeta_r = \frac{250}{l_q v_z}; \quad v_k = \frac{0,84}{D_k M_T}, \quad (II.169)$$

где l_q — расстояние от глаз зрителя до наблюдаемого изображения; D_k — размер светового пятна малого элемента изображения на выходе звена номер k киноголографического процесса, т. е. пятна, обусловленного несовершенством данного звена и соответствующего точному элементу изображения на входе этого звена; M_T — поперечное оптическое увеличение от изображения на входе звена до изображения, непосредственно рассматриваемого зрителем.

При определении размера светового пятна (D_k) следует принимать в расчет только ту часть светового пятна, через которую проходят лучи света, попадающие в глаза зрителя.

В системах голографического кинематографа с квазисфокусированными голограммами возможно применение газоразрядных ртутных и ртутно-кадмиевых ламп в качестве источников света при кинопроекции. При этом снижается резкость изображения вследствие нарушения гомоцентричности и монохроматичности восстанавливающих пучков.

Размер светового пятна изображения, непосредственно восстанавливаемого у пленки при проекции голографического фильма и возникающего за счет нарушения гомоцентричности восстанавливающего пучка света, равен.

$$D_{k1} \cong \Delta \vartheta_k \frac{\cos \vartheta_k}{\cos \mu_k} l_{\mu f}, \quad (II.170)$$

где ϑ_k, μ_k — углы между нормалью и, соответственно, восстанавливающим и объектным лучами, проходящими через данную точку поверхности голограммы; $\Delta \vartheta_k$ — разность углов, в пределах которой восстанавливающие лучи падают на данную точку поверхности голограммы в результате нарушения гомоцентричности пучка; $l_{\mu f}$ — расстояние между пленкой и элементом восстанавливаемого изображения с пятном рассеяния света размером D_{k1} .

При нарушении монохроматичности восстанавливающего пучка размер светового пятна изображения, непосредственно возникающего у пленки, равен для пропускающих голограмм:

$$D_{k2} \cong \left| \frac{\Delta \lambda_k}{\lambda_k} \cdot \frac{\sin \mu_k - \sin \vartheta_k}{\cos \mu_k} \right| l_{\mu f}, \quad (II.171)$$

где λ_k — длина волны света опорного пучка; $\Delta\lambda_k$ — разность длин волн света восстанавливающего пучка света, в пределах которой нарушается монохроматичность излучения.

Нарушение монохроматичности восстанавливающего пучка света вызывает снижение резкости изображения также за счет рассеяния объектных пучков, дифрагируемых голографическим экраном. При этом размер пятна рассеяния света равен для голограмм:

$$D_{k3} \cong \left| \frac{\Delta\lambda_k}{\lambda_k} \cdot \frac{\sin \mu_k - \sin \vartheta_k}{\cos \mu_k} \right| l_{\mu E}, \quad (II.172)$$

где $l_{\mu E}$ — расстояние от голографического экрана до элемента изображения, отраженного экраном, имеющего размер пятна рассеяния света, равный D_{k3} .

При применении линейно-фокусирующих голографических экранов в вертикальной плоскости происходит значительное рассеяние света. Однако эффективное пятно рассеяния света определяется в этом случае размерами зрачка глаза наблюдателя. При этом справедливо следующее соотношение, если изображение возникает между экраном и зрителем:

$$D_{k4} \cong D_a \frac{l_{\mu E}}{l_z}, \quad (II.173)$$

где D_{k4} — размер эффективного пятна рассеяния света элемента изображения, определяемого размерами зрачка глаза зрителя (D_a); l_z — расстояние между экраном и зрителем; $l_{\mu E}$ — расстояние между экраном и данным элементом изображения, формируемым фокусирующими лучами.

В системах голографического кинематографа, использующих голограммы Фурье, при кинопроекции необходимо применять лазерные источники света, так как при восстановлении голограмм с помощью газоразрядных ламп резкость изображения оказывается неудовлетворительной. Однако и при восстановлении голограмм Фурье в лазерном свете происходит некоторое снижение резкости изображения вследствие рассеяния света, обусловленного несовершенством голографических решеток и связанного с конечными размерами эмульсионных зерен в слое.

Рассеяние света, обусловленное гранулярностью голографического слоя, нарушениями его структуры, может количественно оцениваться углом μ_Δ , соответствующим снижению интенсивности объектного пучка света в два раза по отношению к максимальной его интенсивности.

Этому углу рассеяния μ_Δ соответствует размер пятна рассеяния света (элемента изображения, непосредственно восстанавливаемого голограммой с помощью объектива, осуществляющего обратное преобразование Фурье), равный следующей величине:

$$D_F \cong 2\mu_\Delta f_F, \quad (II.174)$$

где f_F — фокусное расстояние объектива, осуществляющего обратное преобразование Фурье.

Рассмотрим пример проекции голографического фильма на голографический экран с помощью ртутной лампы при следующих параметрах (рис. 129).

$$\vartheta_{k1} = 33^\circ; \mu_{k1} = 0; \Delta\vartheta_{k1} = 0,02 \text{ рад}; l_{\mu f} = 2 \text{ мм};$$

$$\lambda_k = 578 \text{ нм}, \Delta\lambda_k = 2 \text{ нм}; \vartheta_{k3} = 0; \mu_{k3} = 170^\circ;$$

$$l_{\mu E} = 4 \text{ м}; l_z = 8 \text{ м}; l_{rE} = 16 \text{ м}; f_r = 200 \text{ мм}.$$

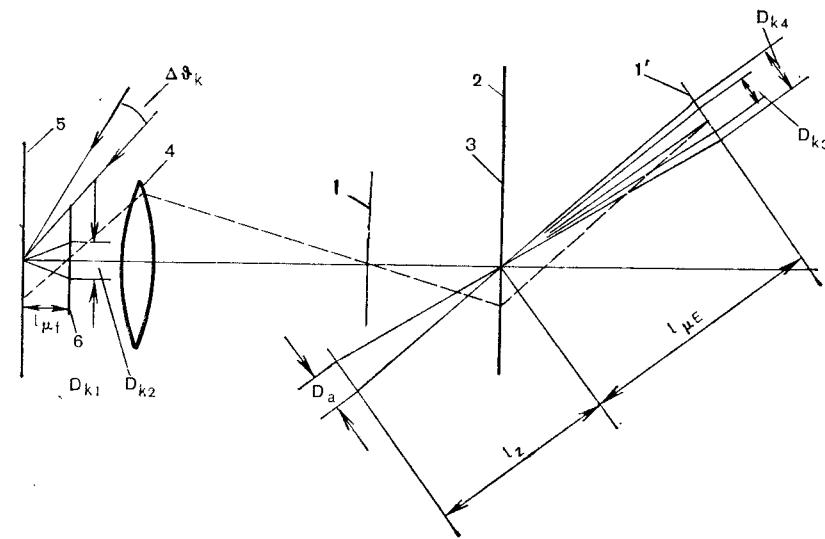


Рис. 129. Круги рассеяния света, возникающие в отдельных звеньях киноголографического процесса и определяющие резкость голографического изображения: 1 — плоскость, в которой расположен элемент изображения, увеличенного проекционным объективом; 4; 1' — плоскость, в которой расположен элемент изображения, отраженного в голографическом экране; 3; 2 — плоскость, в которой расположен элемент изображения, совмещенный с плоскостью экрана; 5 — плоскость пленки; 6 — плоскость формирования элемента изображения вблизи пленки

Находим по формуле (II.170) диаметр светового пятна элемента изображения у пленки вследствие нарушения гомоцентричности:

$$D_{k1} = 0,02 \frac{\cos 33^\circ}{\cos 0^\circ} 2 = 0,0325 \text{ мм}.$$

Находим по формуле (II.171) диаметр светового пятна элемента изображения у пленки вследствие нарушения монохроматичности

$$D_{k2} = \left| \frac{2}{578} \cdot \frac{\sin 0^\circ - \sin 33^\circ}{\cos 0^\circ} \right| 2 = 0,00377 \text{ мм}.$$

Находим по формуле (II.172) диаметр светового пятна элемента изображения у экрана вследствие нарушения монохроматичности

$$D_{k3} = \frac{2}{578} \left| \frac{\sin 170^\circ - \sin 0^\circ}{\cos 170^\circ} \right| 4000 = 2,44 \text{ мм.}$$

Поперечное оптическое увеличение при проекции равно:

$$M_T = \frac{l_{rE}}{f_r} - 1; M_T = \frac{16}{0,2} - 1 = 79,$$

где l_{rE} — расстояние от главной плоскости проекционного объектива до голографического экрана; f_r — фокусное расстояние проекционного объектива.

Находим по формуле (II.167) значения критических пространственных частот для отдельных звеньев киноголографического процесса:

$$\nu_{k1} = \frac{0,84}{0,0335 \cdot 79} = 0,327 \text{ мм}^{-1}; \nu_{k2} = \frac{0,84}{0,00377 \cdot 79} = 2,82 \text{ мм}^{-1};$$

$$\nu_{k3} = \frac{0,84}{2,44} = 0,344 \text{ мм}^{-1}.$$

По формуле (II.168) определяем результирующую критическую пространственную частоту:

$$\nu = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,327^2} + \frac{1}{2,82^2} + \frac{1}{0,344^2} \right)^{\frac{1}{2}}} = 0,236 \text{ мм}^{-1}.$$

Вычисляем по формуле (II.169) нормированный критерий резкости изображения:

$$\zeta_r = \frac{250}{8000 \cdot 0,236} = 0,132.$$

В соответствии с данными табл. 18 это значение критерия соответствует достаточно высокому качеству изображения по резкости.

II.3.3. Слитность изображения

В процессах изобразительной голографии и особенно голографического кинематографа возможны нарушения слитности изображения, т. е. появление искажений в виде нескольких несовмещенных контуров объекта. Если такие несовмещения велики, изображения воспринимаются как двойные и тройные, смещенные в пространстве по отношению к основному.

Причины нарушения слитности изображения разные. Оптические элементы с большими хроматическими aberrациями (экраны, объективы) могут вызывать такого рода искажения. Источники света, имеющие несколько линий излучения разной длины волны или дающие лучи света с различными направлениями, также нарушают слитность. Подобные искажения могут возникать и вследствие вза-

имодействия восстанавливающих пучков света одной длины волны с голограммными структурами, полученными при других значениях длины волны света.

Особенно большие трудности устранения искажений в виде нарушения слитности возникают при передаче цветных изображений, так как при этом используются освещающие пучки с разными длинами волн.

Поскольку съемочные и проекционные объективы в голографических системах должны обладать большим относительным отверстием для обеспечения значительного диапазона ракурсов, они имеют, как правило, более высокие хроматические aberrации и несколько различные фокусные расстояния для различных длин волн света, поэтому составляющие цветного трехмерного изображения (синяя, зеленая, красная) могут не совпадать друг с другом в пространстве. Указанный недостаток смягчается тем, что трехмерное голографическое изображение воспринимается зрителем в узких пучках с малыми угловыми размерами, определяемыми диаметром зрачка глаза.

Эффективный способ улучшения слитности цветного изображения — использование обратного хода лучей в процессе копирования. Если в первом звене оптического копирования применить тот же объектив, что и при киносъемке, а во втором звене — объектив тот же, что при проекции, то, пропуская лучи через объективы при копировании голографического фильма в направлении, обратном тому, которое имеет место при съемке и проекции, можно практически полностью устранить нарушения слитности результирующего изображения, обусловленные хроматическими aberrациями оптики.

Хроматические aberrации, свойственные голографическим фильмам и экранам, могут также вызвать значительные нарушения слитности цветного изображения, если длины волн излучения при получении голограммы отличаются от длин волн при воспроизведении изображения. Даже малые различия между длинами волн могут вызвать недопустимое ухудшение качества цветного изображения.

Согласно уравнению (I.4), отклонение угла дифрагированного луча $\Delta\mu$ от номинального значения, соответствующего углу объектного луча при получении голограммы μ_s при небольшом отклонении длины волн света $\Delta\lambda$ от имевшей место при получении голограммы λ_s , может быть подсчитано по следующей формуле:

$$\Delta\mu \cong \frac{1}{\cos \mu_s} \left[\frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} (\sin \mu_s - \sin \vartheta_s) + \sin \vartheta_k - \sin \vartheta_s \right]. \quad (\text{II.175})$$

Из этого уравнения видно, что отклонение объектного луча на угол $\Delta\mu$, вызванное отклонением длины волны света $\Delta\lambda$, может быть скомпенсировано соответствующим изменением направления восстанавливающего луча ϑ_k , но только для одного значения μ_s , т. е. только для одной точки изображения.

Рассмотрим случай, когда при переходе от получения голограммы к воспроизведению изображения происходят одинаковые отно-

сительные изменения длин волн света для всех частей спектра, т. е. когда соблюдается условие:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_{s1}} = \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_{s2}} = \frac{\Delta\lambda_3}{\lambda_{s3}}, \quad (\text{II.176})$$

где $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}$ — длины волн света при получении голограммы, соответственно, в синей, зеленой и красной частях спектра; $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$ — отклонения длин волн света при воспроизведении изображения, соответственно, в синей, зеленой и красной частях спектра.

Как видно из уравнения (II.175), при соблюдении условия (II.176) отклонение объектных лучей в синей $\Delta\mu_1$, в зеленой $\Delta\mu_2$ и красной $\Delta\mu_3$ частях спектра является одинаковым:

$$\Delta\mu_1 = \Delta\mu_2 = \Delta\mu_3. \quad (\text{II.177})$$

В рассматриваемом случае цветное трехмерное изображение только слегка смещается в пространстве, сохраняя свою слитность.

Допустимая величина отклонения объектного луча $\Delta\mu$ из условия двоения контуров наблюдаемого изображения зависит от того, насколько близко к поверхности голограммы (пленка, экран) расположены передаваемое и наблюдаемое изображения. При этом справедливы следующие выражения:

$$\begin{aligned} \Delta\mu'_{f12} &= \Delta\mu'_{f1} - \Delta\mu'_{f2}; \quad \Delta\mu'_{f13} = \Delta\mu'_{f1} - \Delta\mu'_{f3}; \\ \Delta\mu'_{23} &= \Delta\mu'_{f2} - \Delta\mu'_{f3}; \\ U_{\mu f} &= l_{\mu f} \Delta\mu'_f; \quad U_{\mu E} = l_{\mu E} \Delta\mu_E; \\ U_{\mu z} &= U_{\mu E} + U_{\mu f} M_{zE}; \\ \mu_{\mu z} &= \frac{U_{\mu z}}{l_z}, \end{aligned} \quad (\text{II.178})$$

где $l_{\mu f}, l_{\mu E}, l_z$ — расстояние от данного элемента изображения до, соответственно, фильма, экрана, зрителя; $U_{\mu f}, U_{\mu E}$ — поперечное смещение элемента изображения, обусловленное хроматическими aberrациями, соответственно, голограммы-фильма и голографического экрана; $U_{\mu z}$ — поперечное смещение элемента изображения, наблюдаемого зрителем; M_{zE} — результирующее оптическое увеличение при проекции (проекторный объектив — экран); $\Delta\mu'_{f1}, \Delta\mu'_{f2}, \Delta\mu'_{f3}$ — отклонение объектного луча (в воздухе), обусловленное отклонением длины волны при воспроизведении изображения по отношению к длине волны при получении голограммы, соответственно, в синей, зеленой и красной частях спектра; $\Delta\mu'_{f12}, \Delta\mu'_{f13}, \Delta\mu'_{f23}$ — разности углов, обусловленные отклонением объектных лучей разной длины волны, определяющим двоение контуров изображения (в воздухе).

Соотношение (II.175) непосредственно получается из уравнения (I.4), и поэтому оба уравнения справедливы для значений углов

как внутри слоя, так и в пространстве вблизи голограммы. При этом справедливы соотношения (II.178). На основании сказанного для рассматриваемых условий справедливо соотношение:

$$\Delta\mu' = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} (\sin \mu'_s - \sin \vartheta'_s). \quad (\text{II.179})$$

Рассмотрим пример голографической киносъемки с помощью гранатового и рубинового импульсных лазеров и проекции с помощью аргонового и криптонового лазеров непрерывного действия при следующих параметрах:

$$\lambda_{s2} = 530 \text{ нм}; \quad \lambda_{s3} = 694 \text{ нм}; \quad \lambda_{k2} = 514 \text{ нм}; \quad \lambda_{k3} = 647 \text{ нм};$$

$$\vartheta_{sf} = 56^\circ; \quad \mu_{sf} = 0^\circ; \quad \vartheta_{sE} = 0^\circ; \quad \mu_{sf} = 165^\circ;$$

$$l_{\mu f} = 2 \text{ м}; \quad l_{\mu E} = 4 \text{ м}; \quad l_z = 8 \text{ м}; \quad l_{rE} = 16 \text{ м}; \quad f_r = 200 \text{ мм}.$$

Находим разность длин волн:

$$\Delta\lambda_2 = \lambda_{k2} - \lambda_{s2}; \quad \Delta\lambda_2 = 514 - 530 = -16 \text{ нм};$$

$$\Delta\lambda_3 = \lambda_{k3} - \lambda_{s3}; \quad \Delta\lambda_3 = 647 - 694 = -47 \text{ нм}.$$

Определяем по формуле (II.179) отклонения объектного луча у пленки для двух длин волн света:

$$\Delta\mu_{f2} = \frac{-16}{530} (\sin 0^\circ - \sin 56^\circ) = 0,0250 \text{ рад};$$

$$\Delta\mu_{f3} = \frac{-47}{694} (\sin 0^\circ - \sin 56^\circ) = 0,0561 \text{ рад};$$

$$\Delta\mu_{f23} = -0,0250 + 0,0561 = 0,0311 \text{ рад}.$$

Вычисляем по формуле (II.179) отклонения объектного пучка у экрана для двух длин волн света:

$$\Delta\mu_{E2} = \frac{-16}{530} (\sin 15^\circ - \sin 0^\circ) = -0,00781 \text{ рад};$$

$$\Delta\mu_{E3} = \frac{-47}{694} (\sin 15^\circ - \sin 0^\circ) = -0,0175 \text{ рад};$$

$$\Delta\mu_{E23} = -0,00781 + 0,0175 = 0,00969 \text{ рад}.$$

Рассчитываем по формуле (II.178) поперечные смещения элементов изображения, обусловленные aberrациями голограммы-фильма и голографического экрана:

$$U_{\mu f} = 2 \cdot 0,0311 = 0,0622 \text{ мм};$$

$$U_{\mu E} = 4000 \cdot 0,00969 = 38,8 \text{ мм}.$$

Определяем по формуле (II.178) результирующее поперечное смещение наблюдаемого элемента изображения:

$$u_{\mu z} = 38,8 + 0,0622 \cdot 79 = 43,7 \text{ мм.}$$

Находим по формуле (II.178) угловой размер поперечного смещения элемента наблюдаемого изображения:

$$\mu_{\mu z} = \frac{43,7}{8000} = 0,00546 \text{ рад } (\sim 19 \text{ угл. мин}).$$

При таком угловом размере смещения зеленого контура изображения объекта по отношению к красному изображению оценивается как неудовлетворительное по качеству в отношении слитности.

Можно принять, что предельно допустимое значение углового смещения контуров, составляющих цветное изображение по отношению друг к другу, равно:

$$\mu'_{\mu z} = 4 \text{ угл. мин.} \quad (\text{II.180})$$

Будем считать нормированный критерий слитности изображения, наблюдаемого зрителями, равным:

$$\xi_s = \frac{\mu_{\mu z}}{\mu'_{\mu z}}. \quad (\text{II.181})$$

Интенсивность ложных взаимодействий между восстанавливающими пучками одного участка спектра и голограммной структурой, образованной пучками света в другом участке спектра, сильно зависит от спектральной селективности голограммы. В случае пропускающих голограмм спектральная селективность мала, и интенсивность ложных излучений зависит от угловой селективности.

При воспроизведении цветного изображения, зарегистрированного на пропускающей голограмме, например на голографическом фильме, для устранения ложных изображений рассматриваемого рода восстанавливающие пучки разных участков спектра направляются на пленку под углами, сильно отличающимися друг от друга.

В случае отражательных голограмм, например в изобразительной голографии или при проекции на голографический экран, толщина слоя голограммы должна выбираться достаточно большой, чтобы обеспечить нужную спектральную селективность и устранить ложные изображения. При выборе достаточно большого угла между направлениями опорных и объектных лучей, как видно из формулы (II.179), можно добиться значительного отклонения пучков, формирующих ложные изображения, и направить их за пределы зоны видения, что весьма эффективно при кинопроекции со сравнительно небольшим числом зрительских мест. Однако при этом снижается эффективность системы проекции за счет того, что часть световой энергии проектора бесполезно расходуется на формирование ложных изображений за пределами зон видения.

Если ложные изображения появляются в зоне видения, яркость их должна быть достаточно низкой, т. е. не превышать 2% от яркости основного изображения, на которое адаптируется зрение наблюдателя, чтобы ложные изображения не были заметны.

Расчет яркости ложных изображений можно выполнить по приближенным формулам спектральной и угловой селективности, приведенным в разделе I.1.4, или по более точным формулам, данным в разделе II.2.2.

II.3.4. Пятнистая структура изображения

Голографические изображения часто имеют характерные для когерентного излучения интерференционные помехи в виде темных и ярких пятен на изображениях. Пятнистая структура, или спеклы, снижает качество изображения, делает его неестественным, с ухудшением различимости мелких деталей.

Для количественной оценки пятнистой структуры годятся те же методы, что и для количественной оценки гранулярности обычного фотографического изображения, например в кинематографе, где в качестве критерия используют среднюю квадратическую флуктуацию яркости изображения или оптической плотности.

Можно применить следующий количественный критерий:

$$\xi_z = 4\sigma_z, \quad (\text{II.182})$$

где ξ_z — нормированный критерий пятнистой структуры изображения; σ_z — средняя квадратическая флуктуация яркости изображения, обусловленная спеклами, отнесенная к среднему значению яркости изображения. Средняя квадратическая флуктуация σ_z определяется для полосы пропускания пространственных частот в киноголографическом процессе, включая зрительный анализатор человека.

По своей природе спеклы голографического изображения принципиально отличаются от зернистости обычной фотографии или кинокадра, так как они возникают не из-за зернистости регистрирующего материала, а в результате интерференции когерентных световых волн со случайным распределением фаз.

На фото 21 показаны спеклы с некоторым оптическим увеличением.

Рис. 130 поясняет процесс возникновения спеклов при отражении когерентного света лазера 1 от неровной поверхности объекта 2 (рис. 130, а) или при прохождении света через светорассеивающую пластинку-диффузор 3 и объектив 5 (рис. 130, б, в), которые, отражая или пропускаая свет, рассеивают его и создают нерегулярное, случайное распределение фаз.

Пятнистая структура представляет собой картину максимумов и минимумов интенсивности, возникшую в результате интерференции волнового фронта со случайным фазовым распределением на отдельных малых участках 6, 7 рассматриваемой поверхности 4.

Пятнистые помехи в голографическом изображении имеют общую физическую природу с интерференционными помехами, возникающими в радиолокационных системах, и многие качественные закономерности и количественные соотношения, известные из теории радиолокационных систем, справедливы и для систем передачи

оптических голографических изображений. Однако процессы изобразительной голографии и голографического кинематографа существенно отличаются от радиолокационных процессов тем, что для них характерны требования получения изображения, максимально близкого к оригинальному объекту, с очень низким, едва заметным

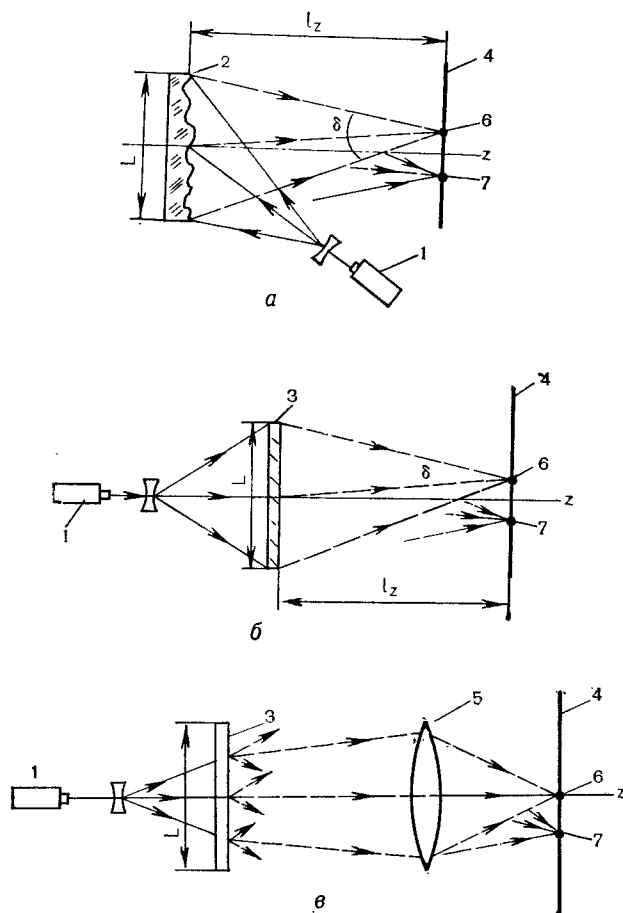


Рис. 130. Схемы возникновения пятнистой структуры голографического изображения при: а — отражении света от неровной поверхности объекта; б — прохождении света через светорассеивающую пластинку; в — прохождении света через оптику, формирующую изображение

уровнем помех, а не требования распознавания в рассматриваемом изображении оригинального объекта в условиях, когда уровень шума даже превышает полезный сигнал.

Рассмотрим возникновение пятнистой структуры в изображении на поверхности 4 в случаях, показанных на рис. 130. Вследствие случайного характера микроскопической структуры поверхности

отражающего 2 или пропускающего слоя 3 объекта характеристики пятнистой структуры можно найти, пользуясь статистическими методами и соотношениями теории вероятности. Считаем свет монохроматическим и линейно поляризованным. Тогда световое поле описывается следующим уравнением:

$$\vec{V}(x, y, z, t) = \vec{\Psi}(x, y, z) e^{i2\pi\nu t}, \quad (\text{II.183})$$

где $\vec{V}(x, y, z, t)$ — вектор электрического поля в точке пространства с координатами x, y, z в момент времени t ; ν — частота световых колебаний; $\vec{\Psi}(x, y, z)$ — комплексный вектор амплитуды электрического поля в точке пространства x, y, z . При этом

$$\vec{\Psi}(x, y, z) = \vec{a}(x, y, z) e^{i\varphi(x, y, z)}, \quad (\text{II.184})$$

где $\vec{a}(x, y, z)$ — вектор амплитуды электрического поля в точке пространства x, y, z ; $\varphi(x, y, z)$ — фаза электрического поля в точке x, y, z .

Комплексная амплитуда электрического поля в рассматриваемой точке на поверхности 4 может быть приближенно выражена следующим образом:

$$|\vec{\Psi}(x, y, z)| \cong \sum_{q=1}^N |\vec{a}_q| e^{i\varphi_q}, \quad (\text{II.185})$$

где $|\vec{a}_q|$, φ_q — амплитуда и фаза элементарной составляющей электрического поля волны света, приходящей в рассматриваемые точки 6 и 7 от малого участка номер q поверхности рассеивающих объектов 2 и 3; N — общее число малых участков.

Выражение (II.185) — приближенное, поскольку не учитывает влияния поляризации света. Однако оно достаточно точно, если принять, что поляризация света всех элементарных волн линейна и плоскости поляризации параллельны друг другу, а углы между направлениями распространения отдельных элементарных волн света малы.

Примем, что амплитуда $|\vec{a}_q|$ и фаза φ_q элементарных световых волн статистически не зависят друг от друга и не зависят от амплитуды и фазы других элементарных волн. Примем, кроме того, что предельное изменение фазы элементарных световых волн от разных малых участков поверхности объектов 2 и 3 в несколько раз больше, чем 2π , и поэтому любые значения фазы φ_q в пределах от $-\pi$ до $+\pi$ имеют одинаковую вероятность.

Тогда, согласно теории вероятности, плотность распределения вероятности интенсивности света пятнистой интерференционной структуры равна:

при $I \geq 0$

$$P(I) = \frac{I}{\bar{I}} e^{-\frac{I}{\bar{I}}}, \quad (\text{II.186})$$

где I — интенсивность света пятнистой интерференционной структуры; $\bar{I}$ — среднее значение (математическое ожидание) интенсивности света пятнистой структуры.

Вероятность того, что интенсивность света пятнистой структуры I превысит заданную величину I_t :

$$P(I > I_t) = e^{-\frac{I_t}{\bar{I}}}. \quad (\text{II.187})$$

Важной особенностью экспоненциального закона (с отрицательным аргументом) распределения вероятности (II.186) является равенство среднего квадратического отклонения величины ее среднему значению, т. е.

$$\sigma_I = \bar{I}, \quad (\text{II.188})$$

где σ_I — среднее квадратическое отклонение интенсивности света пятнистой структуры изображения.

Контраст интерференционной пятнистой структуры можно определить как отношение:

$$k_z = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}. \quad (\text{II.189})$$

Согласно (II.188) и (II.189), контраст интерференционной пятнистой структуры для линейно поляризованного света равен единице

$$k_z = 1. \quad (\text{II.190})$$

Эта величина соответствует визуальному восприятию спеклов как структуры высокого контраста.

В случае, когда рассматриваемая точка лежит в области формирования изображения оптической системой (см. рис. 130), число N малых участков светорассеивающей поверхности, которые создают элементарные световые волны, интерферирующие в рассматриваемых точках 6 и 7, может стать сравнительно малым. Однако в подавляющем большинстве случаев в системах, формирующих изображения, число элементарных световых волн, обладающих случайными фазами, оказывается достаточно большим; можно считать правомерными приведенные соотношения, полученные на основе теории вероятности.

Особенности и параметры пятнистой структуры находят полезное применение в голографической спекл-интерферометрии, но в большинстве случаев практического использования оптической голографии как средства визуализации появление пятнистой структуры серьезно снижает качество изображения.

Приведенные соотношения позволяют обосновать способы подавления и устранения спеклов в голографическом изображении.

Из теории вероятности следует, что сумма M идентично распределенных действительных величин, взаимно некоррелированных,

имеет среднюю величину, которая в M раз больше среднего значения каждой составляющей, а среднее квадратическое отклонение в $\sqrt{M}$ раз больше среднего квадратического отклонения одного компонента.

Поэтому, если складываются M некоррелированных пятнистых структур, контраст результирующей пятнистой структуры снижается и оказывается равным:

$$k_{zv} = \frac{k_z}{\sqrt{M}} = \frac{1}{\sqrt{M}}. \quad (\text{II.191})$$

Некоррелированные пятнистые структуры для данного объекта могут различаться во времени и пространстве, по частоте и поляризации.

Например, при круговой поляризации интенсивность пятнистой структуры определяется как сумма интенсивностей двух ортогональных линейно поляризованных компонент при отсутствии корреляции между этими компонентами. Следовательно, контраст пятнистых структур, возникающих при применении отражающих или пропускающих пластинок, диффузно рассеивающих свет, согласно (II.191), равен при часто встречающейся в таких случаях круговой поляризации света:

при $M=2$

$$k_{zv} = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (\text{II.192})$$

Если светорассеивающая пластинка освещается монохроматическим излучением нескольких взаимно некогерентных лазеров, число которых равно M , то при равной интенсивности света всех источников контраст результирующей пятнистой структуры будет меньше в $\sqrt{M}$ раз (II.191).

Если светорассеивающая пластинка освещается несколькими лазерами с различной частотой излучения, контраст результирующей пятнистой структуры при одинаковых интенсивностях компонент оказывается в $\sqrt{M}$ раз ниже контраста каждой отдельной пятнистой структуры, причем для получения некоррелированных пятнистых структур различие в частотах $\Delta\nu$ должно быть не менее

$$\Delta\nu \cong \frac{c}{2\sigma_z}, \quad (\text{II.193})$$

где c — скорость света; σ_z — среднее квадратическое отклонение высоты флуктуации неровностей поверхности.

Способ получения различий спеклов во времени является эффективным для их подавления. Если, например, светорассеивающую пластинку привести в движение так, что спеклы будут изменяться на протяжении времени восстановления изображения в течение времени зрительной инерции, происходит последовательное наложение друг на друга (во времени) многих спекл-структур и сложение их интенсивностей со снижением контраста по закону $\frac{1}{\sqrt{M}}$.

Очень важно отметить, что снижение контраста путем наложения друг на друга некоррелированных пятнистых структур дает положительный результат только в том случае, если складываются интенсивности пятнистых структур отдельных компонентов. Если происходит сложение комплексных амплитуд векторов электрического поля, никакого подавления пятнистой структуры не происходит; высокий контраст, близкий к единице, сохраняется неизменным. Это объясняется тем, что наложение отдельных пятнистых структур — в данном случае плотность распределения вероятности интенсивности пятнистой структуры — следует неизменно экспоненциальному закону с отрицательным аргументом.

Для оценки пятнистой структуры в голографическом процессе передачи изображения, а также для ее восприятия зрителем большое значение имеет спектр пространственных частот пятнистой структуры, или спектр Винера.

Пространственные частоты в рассматриваемой плоскости 4 (см. рис. 130), где наблюдается пятнистая структура, определяются вектором пространственной частоты, который равен:

$$\vec{v} = v_x \vec{n}_x + v_y \vec{n}_y, \quad (II.194)$$

где v_x, v_y — составляющие вектора пространственной частоты в направлении осей x, y ; $\vec{n}_x, \vec{n}_y$ — единичные векторы в направлении осей x, y , лежащих в плоскости 4.

Спектр пространственных частот пятнистой структуры определяется функцией $w(v_x, v_y)$, которая равна:

$$w(v_x, v_y) = \frac{\partial^2 I}{\partial v_x \partial v_y}, \quad (II.195)$$

где I — интенсивность излучения.

Для квадратной светорассеивающей пластинки ($b_x = b_y = b$) функция спектра пространственных частот пятнистой структуры для сделанных допущений может быть представлена в следующем виде:

при

$$\begin{aligned} -\frac{L}{\lambda z} < v_x < +\frac{L}{\lambda z}; -\frac{L}{\lambda z} < v_y < +\frac{L}{\lambda z}; L \ll l_z; \\ w(v_x, v_y) = \bar{I}^2 \left(\frac{\lambda}{\delta}\right)^2 \left(1 - \frac{\lambda}{\delta} v_x\right) \left(1 - \frac{\lambda}{\delta} v_y\right); \\ \delta = \frac{L}{l_z}; \end{aligned} \quad (II.196)$$

при

$$\begin{aligned} -\frac{L}{\lambda z} > v_x; \quad L \frac{L}{\lambda z} < v_x; \quad -\frac{L}{\lambda z} > v_y; \quad +\frac{L}{\lambda z} < v_y; \quad L \ll l_z; \\ w(v_x, v_y) = 0, \end{aligned}$$

где δ — угол расходимости лучей света в точке наблюдения; $\bar{I}$ — среднее значение интенсивности света.

Для светорассеивающей пластинки круглой формы функция спектра пространственных частот пятнистой структуры при сделанных допущениях может быть представлена в следующем виде:

при

$$\begin{aligned} -\frac{D}{\lambda z} < v < +\frac{D}{\lambda z}; D \ll l_z; \\ w(v) = \bar{I}^2 \frac{4}{\pi} \left(\frac{\lambda}{\delta_D}\right)^2 \left[\cos^{-1} \left(\frac{\lambda}{\delta_D} v\right) - \frac{\lambda}{\delta_D} v \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\delta_D} v\right)^2} \right]; \\ \delta_D = \frac{D}{l_z}; \end{aligned} \quad (II.197)$$

при

$$\begin{aligned} -\frac{D}{\lambda z} > v; \quad +\frac{D}{\lambda z} < v; \\ w(v) = 0, \end{aligned}$$

где δ_D — угол расходимости лучей света в точке наблюдения; D — диаметр светорассеивающей пластинки.

На рис. 131 показана зависимость $w(v_x)$ для поверхности светорассеивающей пластинки квадратной формы (II.196). Как видно из этого рисунка, наиболее интенсивными являются составляющие пятнистых помех, имеющие низкие пространственные частоты.

Предельное значение пространственной частоты пятнистой структуры равно:

$$v_m = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (II.198)$$

Если частотно-контрастная характеристика голографического процесса, включая восприятие изображения, имеет критическую

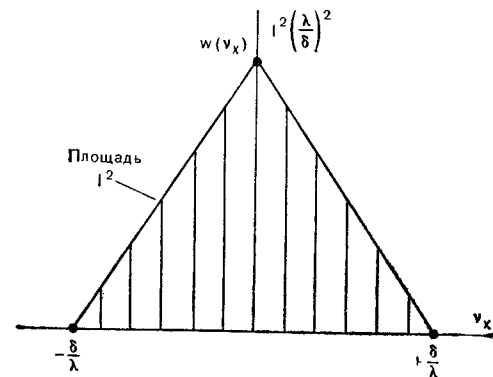


Рис. 131. Спектр пространственных частот пятнистой структуры изображения

пространственную частоту ν_e ниже, чем предельное значение пространственной частоты пятнистой структуры ν_m , контраст пятнистой структуры видимого изображения (в пределах разрешающей способности системы, включая восприятие) оказывается ниже, чем контраст k_z , подсчитанный без учета частотно-контрастной характеристики:

$$k_e = c_z k_z; \quad c_z \cong \left(\frac{\nu_e}{\nu_m} \right)^2 \left[2 - \frac{\nu_e}{\nu_m} \right]^2, \quad (\text{II.199})$$

где k_e — контраст пятнистой структуры голографического изображения с учетом влияния частотно-контрастной характеристики голографического процесса, включая восприятие; c_z — коэффициент снижения контраста пятнистой структуры голографического изображения, обусловленный ограничением пропускания высоких пространственных частот. Соотношение (II.199) может быть получено из (II.196). Если соблюдается условие

$$\nu_e \ll \nu_m, \quad (\text{II.200})$$

то, согласно соотношению (II.199),

$$c_z \cong 4 \left(\frac{\nu_e}{\nu_m} \right)^2. \quad (\text{II.201})$$

В голографических системах с оптическим формированием изображения в соотношения (II.198)—(II.201) входят значения пространственных частот, приведенные по оптическому увеличению к единой плоскости, например сетчатки глаза наблюдателя, или к главной плоскости рассматриваемого изображения.

Соотношения (II.199)—(II.201) указывают на весьма эффективный путь подавления пятнистых структур голографического изображения за счет увеличения пространственной частоты за пределы разрешающей способности системы передачи — восприятия голографического изображения.

На рис. 132 показана схема подавления спеклов, в которой увеличение предельного значения пространственной частоты ν_m получается путем увеличения угла расходимости светового пучка δ за счет использования двух последовательно расположенных друг за другом мелкоструктурных линзовых растров 2.

Другой эффективный способ устранения спеклов — применение фазовых масок с мелким случайным шагом. На рис. 133 изображена фазовая маска 3, состоящая из большого количества малых элементов с разной толщиной прозрачных слоев, так что свет, проходящий через соседние разнотолщинные элементы прозрачной фазовой маски, оказывается сдвинутым по фазе на половину периода колебаний π .

Для более равномерного снижения интенсивности пятнистых помех различных пространственных частот следует применять фазовые маски, имеющие разброс шага элементов случайного характера, например в пределах 1—1,5 раза от минимального шага.

При работе с фазовой маской (см. рис. 133) в воспроизводимом изображении появляется интенсивная пятнистая структура с высокой пространственной частотой, соответствующей шагу маски, а интенсивность более низких пространственных частот сильно снижается. Поэтому, если шаг фазовой маски выбирается настолько

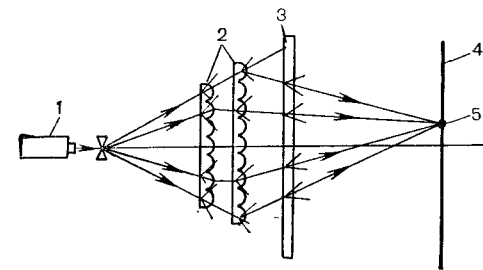


Рис. 132. Схема подавления пятнистых помех изображения с помощью мелкоструктурных растров: 1 — лазер; 2 — линзовый растр; 3 — светорассеивающая пластинка; 4 — плоскость формирования пятнистой структуры изображения; 5 — точка, в которую интерферирующие лучи света приходят в различных направлениях

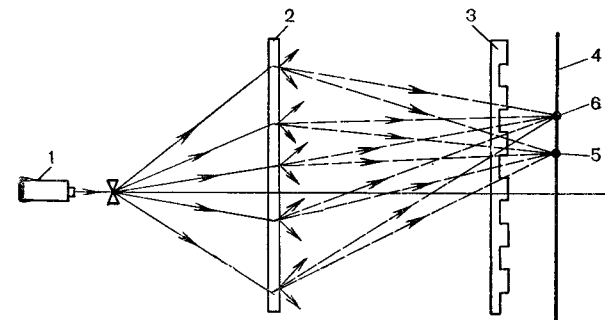


Рис. 133. Схема подавления пятнистых помех изображения с помощью фазовой маски: 1 — лазер; 2 — светорассеивающая пластинка; 3 — фазовая маска; 4 — плоскость, в которой образуются спеклы; 5, 6 — точки наблюдения

малым, что он оказывается за пределами разрешающей способности голографического процесса (включая восприятие изображения), пятнистые помехи становятся настолько малыми, что совершенно незаметны.

Когда голографическое изображение регистрируется на обычном фотоматериале, например, когда кинокадр фильма с плоским изображением переводится на голографическую пленку с целью длительного хранения, а затем вновь печатается с голографической на обычную кинопленку, использование фазовых масок и мелкоструктурных линзовых растров весьма эффективно.

Увеличивая угол расходимости светового пучка δ растром, можно значительно увеличить пространственную частоту пятнистой структуры и сделать ее незаметной для зрителей. При выборе

параметров линзовых растров и фазовых масок следует учитывать последующее оптическое увеличение изображения для непосредственного рассматривания его, например при проекции на экран.

Когда регистрация изображения осуществляется только голографическим методом, без использования обычных фотоматериалов, а результирующее изображение рассматривается в лазерном свете, восприятие спеклов существенно отличается от рассмотренного выше случая.

Приведенные соотношения относятся к пространственным частотам интерференционной пятнистой структуры для поперечных направлений. При регистрации светового поля в фотоматериале с достаточно толстым слоем возникают обусловленные спеклами неоднородности экспозиции не только в поперечных, но и в продольном направлениях, и это имеет существенное значение при наблюдении голографического изображения, воспроизводимого в когерентном свете. В направлении вдоль оси z (см. рис. 130) максимальное значение пространственной частоты пятнистой структуры вместо (II.198) определяется следующим соотношением:

$$\nu_{mz} = \frac{\delta^2}{\lambda}. \quad (\text{II.202})$$

Функция спектра продольных пространственных частот при этом равна:
для

$$\begin{aligned} -\nu_{mz} < \nu_z < +\nu_{mz}; \\ w(\nu_z) = \bar{l} \frac{\lambda}{\delta^2} \left(1 - \frac{\lambda}{\delta^2} \nu_z \right); \\ \delta = \frac{l}{l_z}; \end{aligned} \quad (\text{II.203})$$

для

$$\begin{aligned} -\nu_{mz} > \nu_z; +\nu_{mz} < \nu_z; \\ w(\nu_z) = 0. \end{aligned} \quad (\text{II.204})$$

Так как обычно $\delta \ll 1$, то пространственные частоты пятнистой структуры в продольном направлении значительно ниже, чем в поперечных направлениях, и поэтому более заметны.

В изобразительной голографии и голографическом кинематографе процесс передачи изображения состоит из нескольких последовательных звеньев, каждое из которых может влиять на пятнистую структуру результирующего изображения, наблюдаемого зрителем. При этом отдельные звенья могут как порождать и усиливать пятнистую структуру, так и подавлять ее.

Возникновение и усиление спеклов в отдельных звеньях передачи голографического изображения обуславливаются прежде всего рассеянием света и появлением вследствие этого расхожимости

световых пучков. Светорассеяние может происходить, во-первых, на объекте съемки, который часто имеет шероховатую поверхность, диффузно рассеивающую свет. Если наблюдать такой объект, то впереди и позади его поверхности оказываются темные и светлые пятна, заполняющие пространство.

Часто соблюдается условие, когда пятнистая структура определяется угловым размером зрачка глаза, а не углом рассеяния света поверхностью объекта. В этом случае

$$\delta > \delta_a, \quad (\text{II.205})$$

где δ — угол рассеяния света поверхностью объекта; δ_a — угловой размер глаза, равный:

$$\delta_a = \frac{d_a}{l_a}, \quad (\text{II.206})$$

где d_a — диаметр зрачка глаза; l_a — расстояние от глаза до рассматриваемого элемента пятнистой структуры.

При условии (II.205) пятнистая структура может быть количественно оценена соотношениями (II.196) и (II.197), но вместо величины δ в эти соотношения следует подставлять величину δ_a . Если рассматривается не объект, а его изображение, сформированное многозвенным голографическим процессом, то пятнистая структура, порождаемая шероховатой поверхностью объекта съемки, определяется приведенным значением углового размера зрачка глаза, зависящего от оптического увеличения системы:

$$\begin{aligned} \delta_{as} &= \frac{\delta_a}{M_a}; \\ M_a &= \frac{l_{ae}}{l_{as}}, \end{aligned} \quad (\text{II.207})$$

где M_a — оптическое увеличение от звена съемки до звена наблюдения; δ_{as} — приведенное значение углового размера зрачка глаза к звену киносъемки; l_{as} , l_{ae} — оптически сопряженные расстояния от точки наблюдения (глаза) до оптически сопряженных элементов, соответственно, поверхности объекта и его изображения.

Пятнистая структура может порождаться рассеивающей свет поверхностью голографической пленки после ее обработки.

Спеклы, возникающие в процессе воспроизведения изображения, можно ослабить использованием некогерентного восстанавливающего источника за счет снижения резкости изображения. Если глубина изображения невелика и оно располагается вблизи голограммы, снижение резкости оказывается небольшим.

Для воспроизведения голографических изображений с большой глубиной пространства используют ртутные и ртутно-кадмиевые лампы, имеющие линейчатый спектр излучения. Пятнистая структура в этом случае практически также устраняется вследствие нарушения монохроматичности и гомоцентричности опорного пучка света хотя и в меньшей, но вполне достаточной степени.

При воспроизведении голографического изображения лазерным светом для уменьшения контраста пятнистой структуры можно нарушить в небольших пределах гомоцентричность опорного пучка света путем введения в пучок светорассеивающей пластинки. Аналогичные результаты могут быть получены быстрыми изменениями направления опорных лучей света, падающих на одни и те же элементы поверхности голограммы в пределах малого угла. При этом несколько уменьшается глубина передаваемого пространства, но подавляется пятнистая структура.

Для устранения спеклов, появляющихся в процессе воспроизведения голографического изображения, можно применить сканирующий восстанавливающий пучок, освещающий небольшую часть голограммы в каждый момент времени так, что глаз наблюдателя воспринимает множество следующих друг за другом некоррелированных составляющих пятнистой структуры.

Если максимальный контраст единичной составляющей пятнистой структуры равен 0,4, пространственная частота отдельных ее составляющих находится за пределами разрешающей способности зрительного анализатора (глаза), а его контрастная чувствительность равна 0,02, то можно сделать незаметной для зрителя пятнистую структуру, если число наложенных элементарных некоррелированных составляющих равно:

$$M = \left(\frac{0,4}{0,02} \right)^2 = 400. \quad (\text{II.208})$$

Преимущество данного метода — отсутствие снижения резкости изображения, возникающее в ранее рассмотренных случаях.

При голографической киносъемке движущихся объектов возможно возникновение интерференционной пятнистой структуры голографического изображения часто в виде светлых и темных полос. Если за время импульса света не происходит существенного смещения изображения, то интерференционных полос не возникает.

Интенсивность интерференционных полос зависит от абсолютной величины смещения элементов поверхности объекта, а также от направления их смещения по отношению к источнику лазерного освещения и к объективу съемочного устройства. В наиболее неблагоприятном случае перемещение во время экспонирования на половину длины волны света приводит к сдвигу по фазе на угол 2π , что соответствует периоду интерференционных полос на изображении.

Если источник лазерного излучения расположить в одном фокусе эллипса, а голографическую фотопленку в другом его фокусе, то при перемещении объекта по эллипсу даже при длительной экспозиции никаких интерференционных полос на голографическом изображении не возникает.

Одним из способов устранения спекл-структуры изображения является способ воспроизведения изображения при обращении поля через неоднородную среду, в качестве которой используется голографический рассеиватель.

II.4.1. Контраст изображения

Правильная передача контраста — важнейшее условие получения голографического изображения высокого качества. Чрезмерно высокий контраст обуславливает снижение качества изображения за счет потери деталей на светлых и темных участках изображения. Чрезмерно низкий контраст тоже приводит к потере деталей объекта, которые мало отличаются между собой по яркости, и изображение воспринимается как неестественное, вялое, нечеткое.

По своей физической природе идеальный голографический процесс передачи яркости деталей изображений (объект — изображение) является линейным. Однако многие факторы нарушают эту линейность, особенно в области низких и высоких значений яркости. Главной характеристикой, определяющей передачу контраста в голографическом процессе, является характеристическая дифракционная кривая фотоматериала, рабочей частью которой является приблизительно прямолинейная часть зависимости дифракционной эффективности от объектной составляющей экспозиции при неизменном значении опорной составляющей. В верхней части прямолинейный участок ограничивается предельным значением дифракционной эффективности; в нижней части — уровнем шума, который определяется главным образом светорассеянием в слое, зависящим от опорной составляющей. Уровень шума определяется при этом коэффициентом i_N , равным отношению интенсивности рассеянного света к интенсивности восстанавливающего пучка (рис. 134).

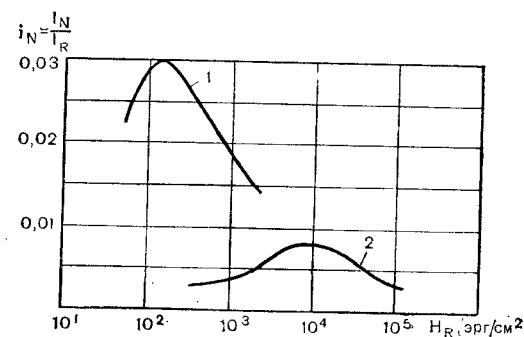


Рис. 134. Уровень шума голографических пленок — отношение интенсивности рассеянного света i_N к интенсивности восстанавливающего пучка света i_R в зависимости от опорной слагающей экспозиции в отсутствие объектной слагающей: 1 — 8E75HD; 2 — ПЭ НИКФИ (двухслойная)

В обычном кинематографическом процессе происходит снижение контраста из-за рассеяния света в пленках, оптике, аппаратуре, экране. Подобные явления происходят и в голографическом процессе, поэтому нужно применять киноплёнки оптимальной структуры по размеру зерна, толщине слоя и выбирать оптимальные условия их экспонирования по соотношению интенсивностей опорного и объектного пучков света, а также химико-фотографической обработки плёнок.

Для компенсации падения контраста результирующего изображения в современном кинематографическом процессе повышают коэффициент контрастности позитивных киноплёнок. При этом произведение коэффициентов контрастности негативной и позитивной киноплёнок превышает единицу. Подобный метод, однако, неприменим для киноголографического процесса, поскольку коэффициент контрастности голографической киноплёнки не влияет на контраст изображения.

Контраст результирующего изображения в голографическом кинематографе можно количественно оценить критерием, определяемым следующим соотношением:

$$\xi_k = \frac{15}{k_N}, \quad (\text{II.209})$$

где ξ_k — нормированный критерий контраста результирующего изображения; k_N — отношение сигнал/шум для результирующего изображения.

При этом

$$\frac{100}{k_N} \cong \sum_{k=1,2,3,\dots,p} \frac{100}{k_{Nk}}, \quad (\text{II.210})$$

где k_{Nk} — отношение сигнал/шум для звена номер k киноголографического процесса, имеющего всего p звеньев.

Величина k_{Nk} равна отношению яркости светлого поля изображения к яркости смежного темного поля оригинального объекта, снятого на плёнку. При этом светлое поле оригинального объекта диффузно отражает свет и имеет в 200 или более раз высокую яркость, чем темное поле этого же объекта.

Значение величины k_{Nk} зависит от светорассеяния в данном звене киноголографического процесса, например в объективах, киноаппаратуре, осветительных устройствах, экране.

Особенно значительное светорассеяние обуславливается плёнками, на которых регистрируются голографические изображения. При этом светорассеяние, происходящее в пределах малых углов (порядка нескольких минут), снижает резкость, а в пределах более значительных углов (порядка нескольких градусов или нескольких десятков градусов) приводит к уменьшению контраста. Именно такого характера светорассеяние учитывается величиной k_{Nk} в формулах (II.209) и (II.210).

Светорассеяние, обусловленное голографическими фотослоями, по своему характеру может быть разделено на следующие группы:

1) дифракция на основных голографических решетках, формирующих основное изображение;

2) дифракция на ложных голографических решетках, возникающих в результате взаимодействия объектных лучей при получении голограммы;

3) светорассеяние в толще голографического слоя, не связанное с дифракцией на голограммных структурах (рассеяние на эмульсионных зернах).

Светорассеяние первого из трех указанных видов, связанное с голограммными структурами, несет полезную информацию.

Светорассеяние, не связанное с голограммной структурой, оказывает вредное действие на передачу контраста и зависит от гранулярности светочувствительного слоя, экспозиции, а также режима обработки. В процессе отбеливания при получении фазовых голограмм в толще слоя возникают зернистые образования, которые сильно рассеивают свет и снижают контраст. Кроме того, на поверхности плёнки имеются царапины, захваты, дефекты поверхности основы, рельеф на желатиновом слое, которые также вызывают светорассеяние.

Для уменьшения светорассеяния необходимо усовершенствовать фотоматериалы и режимы их обработки, оптимизировать процессы съёмки и копирования и использовать иммерсионные методы проекции и копирования.

Локальные нарушения правильной передачи контраста по полю изображения могут возникать, например, за счет перемодуляции света, если отдельные детали объекта имеют фокусирующие зеркальные поверхности или светопреломляющие фокусирующие грани, которые обуславливают в отдельных местах регистрирующего слоя чрезмерно большие интенсивности объектного пучка.

Локальные нарушения правильной передачи контраста могут возникать также за счет поляризационных эффектов, когда отдельные участки поверхности объекта, расположенные под определенным углом к падающим на них лучам света, изменяют поляризацию таким образом, что в результате в воспроизводимом изображении появляются более темные или более светлые участки, чем в оригинальном объекте.

Рассмотрим пример голографической съёмки, копирования и проекции монохромного изображения при следующих параметрах.

Дифракционные эффективности голографических плёнок для съёмки и копирования и пластинки для голографического экрана примем равными:

$$\eta_1 = 0,4; \quad \eta_2 = 0,6; \quad \eta_3 = 0,6.$$

Коэффициенты шума для тех же элементов:

$$i_{N1} = 0,006; \quad i_{N2} = 0,003; \quad i_{N3} = 0,003.$$

Отношения сигнал/шум, обусловленные светорассеянием в съёмочном, копировальном и проекционном объективах, равны:

$$k_{N4} = 300; \quad k_{N5} = 150; \quad k_{N6} = 300.$$

Отношения сигнал/шум, обусловленные светорассеянием в осветительных устройствах и светопропускающих узлах съемочной, копировальной и проекционной установок, равны:

$$k_{N7} = 310; \quad k_{N8} = 150; \quad k_{N9} = 300.$$

Определим отношение сигнал/шум пленки для съемки, копирования, а также голографического экрана:

$$k_{Nk} = \frac{\eta_k}{i_{Nk}}; \quad (II.211)$$

$$k_{N1} = \frac{0,4}{0,006} = 66,7; \quad k_{N2} = \frac{0,6}{0,003} = 200; \quad k_{N3} = \frac{0,6}{0,003} = 200.$$

Определим по формуле (II.210) отношение сигнал/шум для результирующего изображения:

$$k_N = \frac{100}{\frac{100}{66,7} + \frac{100}{200} + \frac{100}{200} + \frac{100}{300} + \frac{100}{150} + \frac{100}{300} + \frac{100}{300} + \frac{100}{150} + \frac{100}{300}} = 20,7.$$

Определим по формуле (II.209) значение критерия контраста изображения:

$$\xi_k = \frac{15}{20,7} = 0,72.$$

Полученное значение критерия контраста результирующего голографического изображения соответствует приемлемому, хотя и невысокому качеству изображения. Данный пример иллюстрирует, насколько важной и трудной является задача создания совершенных технических средств голографического кинематографа, обеспечивающих получение высокого контраста изображения. При этом следует принять во внимание, что приведенный пример относится к монохромному, а не цветному изображению.

II.4.2. Цветопередача изображения

Правильная цветопередача является основным требованием получения цветного голографического изображения высокого качества.

В процессах изобразительной голографии и голографического кинематографа искажения цветопередачи происходят по разным причинам. Основная причина возникновения таких искажений — использование на стадии съемки лазерных источников света с узкополосным спектром излучения. Однако если правильно выбрать длины волн излучения лазеров, можно снизить искажения цветопередачи до незначительного уровня.

При выборе длин волн можно руководствоваться требованием достаточно большого цветового охвата; три выбранных длины волн должны обеспечивать получение многообразия цветов окружающих нас в жизни предметов.

На рис. 135 показаны координаты цветности объектов съемки, характерных для кинематографии и фотографии. Из этого рисунка видно, что цвет объектов может быть воспроизведен с помощью трех линий излучения лазеров (0,473; 0,514; 0,647 мкм), которые соответствуют излучению аргонового и криптонового лазеров. Из рисунка видно, что цвет объектов может быть воспроизведен, например, с помощью ртутно-кадмиевой лампы с использованием трех линий излучения (0,468; 0,546; 0,644 мкм).

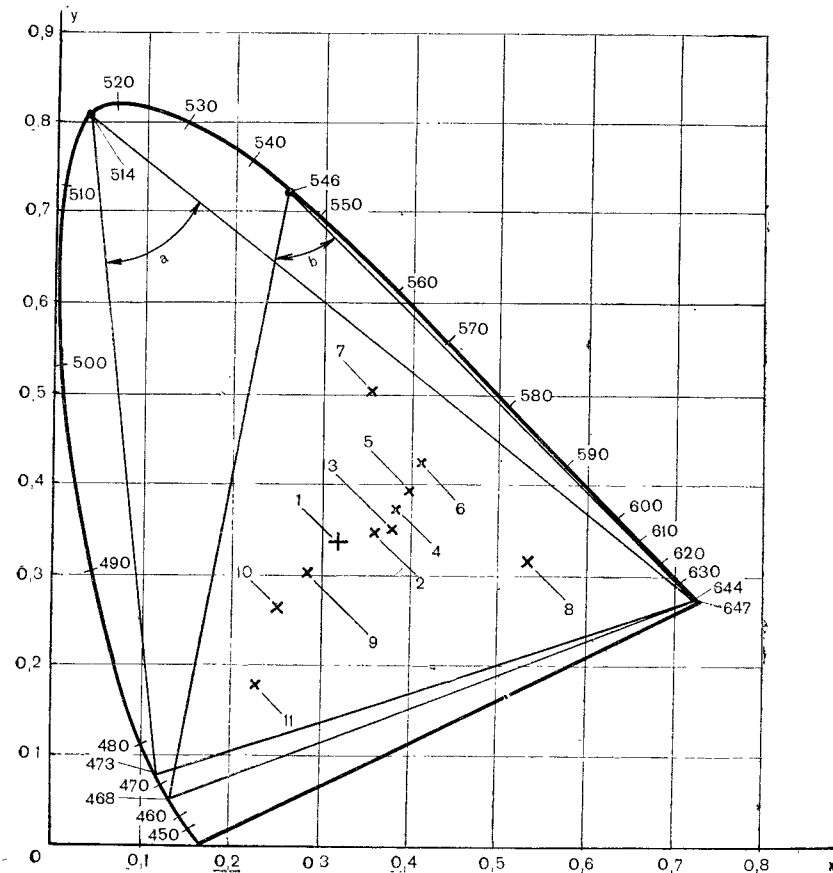


Рис. 135. Координаты цветности объектов съемки, характерных для кинематографии и фотографии: 1 — белая поверхность; 2 — снег с ледяной коркой; 3 — бледнолицый человек; 4 — булыжная шоссе́нная дорога; 5 — песок; 6 — желтый олу́вничик; 7 — летняя зеленая трава; 8 — красный мак; 9 — голубое небо; 10 — поверхность озера в ясную погоду; 11 — синий василек

Для количественной оценки цветопередачи голографического изображения может быть применен объективный критерий:

$$\xi_c = \frac{\Delta E}{20}, \quad (\text{II.212})$$

где ξ_c — нормированный критерий цветопередачи для результирующего изображения; ΔE — цветовые различия по критерию Н. С. Овечкиса в единицах NBS; одна единица NBS равна пяти едва заметным порогами цветопередачи.

Для определения цветовых различий можно пользоваться следующей формулой:

$$\Delta E = 49 \sqrt{\frac{(D_1 - D_{10})^2 + (D_2 - D_{20})^2 + (D_3 - D_{30})^2}{D_1 + D_{10} + D_2 + D_{20} + D_3 + D_{30} - 6 \lg \frac{Y}{y'}}}, \quad (\text{II.213})$$

где D_1, D_2, D_3 — зональные оптические плотности цвета результирующего изображения в синей, зеленой и красной частях спектра; D_{10}, D_{20}, D_{30} — зональные оптические плотности цвета оригинального объекта (снимаемого на пленку) в синей, зеленой и красной частях спектра. Y, y' — координаты цвета и цветности.

При этом

$$D_1 = -\lg \tau_1; \quad D_2 = -\lg \tau_2; \quad D_3 = -\lg \tau_3, \quad (\text{II.214})$$

где τ_1, τ_2, τ_3 — зональные коэффициенты пропускания в красной, зеленой и синей частях спектра.

В соотношениях (II.214):

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0,103 x' - 0,172 y' + 1,258 z'; \\ \tau_2 &= -1,336 x' + 2,333 y' + 0,103 z'; \\ \tau_3 &= 1,945 x' + 0,667 y' - 0,301 z', \end{aligned} \quad (\text{II.215})$$

где x', y', z' — координаты цветности.

Координаты цветности объекта, освещенного источником света с линейчатым спектром излучения, входящие в уравнения (II.215), можно определить по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{\sum c p x_s}{\sum c p x_s + \sum c p y_s + \sum c p z_s}; \\ y' &= \frac{\sum c p y_s}{\sum c p x_s + \sum c p y_s + \sum c p z_s}; \\ z' &= \frac{\sum c p z_s}{\sum c p x_s + \sum c p y_s + \sum c p z_s}, \end{aligned} \quad (\text{II.216})$$

где x_s, y_s, z_s — координаты цветности объекта, освещенного источником света с линейчатым спектром излучения. При этом:

$$\begin{aligned} \sum c p x_s &= c_1 \rho_1 x_{s1} + c_2 \rho_2 x_{s2} + c_3 \rho_3 x_{s3}; \\ \sum c p y_s &= c_1 \rho_1 y_{s1} + c_2 \rho_2 y_{s2} + c_3 \rho_3 y_{s3}; \\ \sum c p z_s &= c_1 \rho_1 z_{s1} + c_2 \rho_2 z_{s2} + c_3 \rho_3 z_{s3}, \end{aligned} \quad (\text{II.217})$$

где x_{s1}, y_{s2}, z_{s3} — координаты цветности x, y, z спектральных излучений источника света 1, 2, 3, освещающего объект; ρ_1, ρ_2, ρ_3 — коэффициенты отражения поверхности объекта для трех линий излучения источника света с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$; c_1, c_2, c_3 — коэффициенты интенсивности излучения на длинах волн, соответственно, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$.

При этом

$$\begin{aligned} \frac{c_1}{c_2} &= \frac{I_1}{I_2}; \quad \frac{c_1}{c_3} = \frac{I_1}{I_3}; \\ c_1 + c_2 + c_3 &= 1, \end{aligned} \quad (\text{II.218})$$

где I_1, I_2, I_3 — интенсивности излучения на трех линиях спектра источника света.

Значения коэффициентов интенсивности излучения на разных длинах волн источника света выбираются из условия наиболее точной цветопередачи объекта (например, лица человека, белого снега). При этом искажения цвета других объектов в том же кадре зависят от выбранных длин волн. Если их значения таковы, что охватывают внутри треугольника (с вершинами, соответствующими этим длинам волн на рис. 135) цвета объектов, окружающих нас в жизни, то при выборе соотношения интенсивностей излучения на трех длинах волн из условия точной цветопередачи для одного из объектов многоцветной сцены искажения цвета других объектов оказываются в приемлемых пределах.

Такая особенность получения достаточно низкого уровня искажений цвета, возникающих вследствие линейчатой структуры спектра излучения источника освещения, обусловлена плавным характером изменения коэффициента отражения в зависимости от длины волны для большей части объектов съемки (рис. 136).

Длины волн, в пределах которых может быть получен приемлемый уровень искажений цвета, как показывают расчеты по изложенному методу, составляют: $\lambda_1 = 450-480$ нм (синий); $\lambda_2 = 510-560$ нм (зеленый); $\lambda_3 = 600-650$ нм (красный).

В табл. 19 и на рис. 137 показаны результаты расчета искажений цвета в голографическом процессе.

Рассмотрим пример расчета искажений передачи цвета, обусловленных линейчатым характером спектра излучения источника света. Примем значения длин волн соответствующими ртутно-кадмиевой лампе (табл. 7): $\lambda_1 = 468$ нм; $\lambda_2 = 546$ нм; $\lambda_3 = 644$ нм, а значения координат цветности спектральных излучений выбранных линий равными:

$$\begin{aligned} x_{s1} &= 0,121; \quad x_{s2} = 0,320; \quad x_{s3} = 0,709; \quad y_{s1} = 0,097; \\ y_{s2} &= 0,675; \quad y_{s3} = 0,291; \quad z_{s1} = 0,783; \quad z_{s2} = 0,005; \quad z_{s3} = 0. \end{aligned}$$

Цветовые различия для голографических изображений
восьми характерных объектов при трех линиях источника света

$\lambda_1=460$ нм	$\lambda_2=570$ нм	$\lambda_3=630$ нм
Объект см. рис. 135)	Голографический процесс	Кинематографический процесс («Kodak»)
Снег (2)	0,3	0,9
Лицо человека (3)	3,1	2,2
Шоссейная дорога (4)	1,3	1,9
Желтый песок (5)	1,9	3,0
Желтый одуванчик (6)	1,4	6,5
Зеленая трава (7)	4,5	8,0
Красный мак (8)	9,2	7,3
Синий василек (11)	3,8	7,0

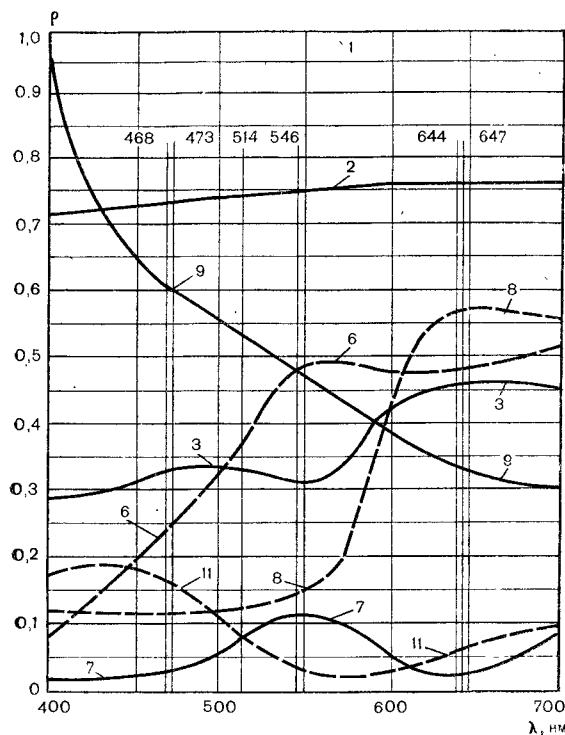


Рис. 136. Коэффициент отражения в зависимости от длины волны для объектов съемки, характерных для кинематографии и фотографии (см. рис. 135)

Примем значения коэффициентов интенсивности излучения источника света на трех выбранных линиях: $c_1=0,424$; $c_2=0,325$; $c_3=0,251$.

Эти коэффициенты соответствуют совершенно точной передаче белого цвета ($x_1=y_1=z_1=0,333$).

Найдем величину цветовых различий ΔE для лица человека (европейца) с координатами цвета $x_0=0,372$; $y_0=0,357$; $z_0=0,271$ при освещении источником с непрерывным спектром излучения, с координатами $x_s=y_s=z_s=0,333$.

При освещении объекта источником света с линейчатым спектром и тремя выбранными длинами волн коэффициенты отражения этого объекта, согласно рис. 136, равны: $\rho_1=0,325$; $\rho_2=0,305$; $\rho_3=0,460$. Найдем суммы произведений: коэффициента интенсивности, коэффициента отражения и координат цветности излучений источника света по уравнениям (II.217):

$$\Sigma c\rho x_s = 0,424 \cdot 0,325 \cdot 0,121 + 0,325 \cdot 0,305 \cdot 0,32 + 0,251 \cdot 0,46 \cdot 0,702 = 0,130;$$

$$\Sigma c\rho y_s = 0,424 \cdot 0,325 \cdot 0,097 + 0,325 \cdot 0,305 \cdot 0,675 + 0,251 \cdot 0,46 \cdot 0,291 = 0,114;$$

$$\Sigma c\rho z_s = 0,424 \cdot 0,325 \cdot 0,783 + 0,325 \cdot 0,305 \cdot 0,005 + 0,251 \cdot 0,46 \cdot 0 = 0,108;$$

$$\Sigma c\rho x_s + \Sigma c\rho y_s + \Sigma c\rho z_s = 0,130 + 0,114 + 0,108 = 0,352.$$

Находим координаты цветности объекта, освещенного источником с линейчатым спектром излучения по уравнениям (II.216):

$$x = \frac{0,130}{0,352} = 0,370; \quad y = \frac{0,114}{0,352} = 0,322;$$

$$z = \frac{0,108}{0,352} = 0,307.$$

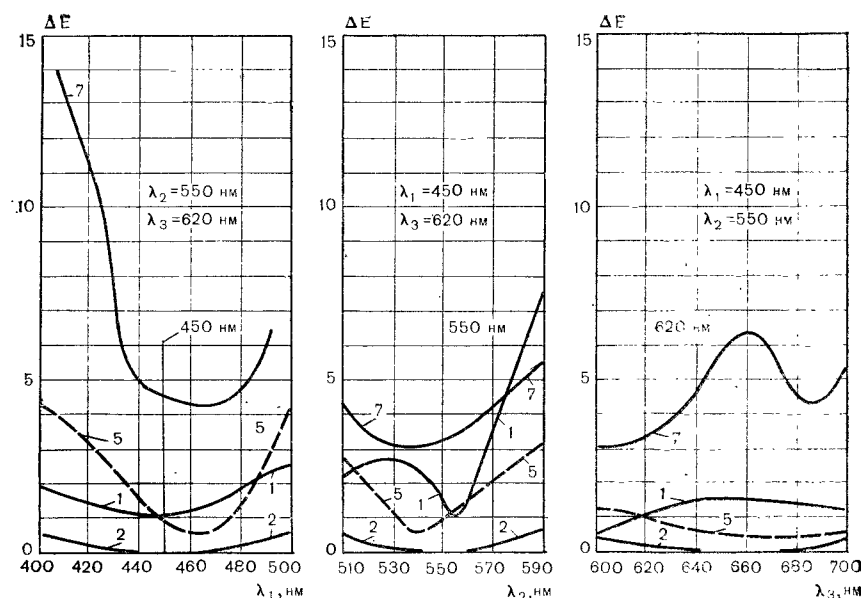


Рис. 137. Искажения цвета голографического изображения — цветовые различия ΔE в зависимости от длины волны при съемке и воспроизведении

Находим зональные коэффициенты пропускания по уравнениям (II.215) для освещения с линейчатым спектром:

$$\tau_1 = 0,103 \cdot 0,370 - 0,172 \cdot 0,322 + 1,258 \cdot 0,307 = 0,369;$$

$$\tau_2 = 1,336 \cdot 0,370 + 2,333 \cdot 0,322 + 0,103 \cdot 0,307 = 0,364;$$

$$\tau_3 = 1,934 \cdot 0,370 - 0,667 \cdot 0,322 - 0,301 \cdot 0,307 = 0,413.$$

Находим зональные коэффициенты пропускания по уравнениям (II.215) для освещения с непрерывным спектром:

$$\tau_{10} = 0,103 \cdot 0,372 - 0,172 \cdot 0,357 + 1,258 \cdot 0,271 = 0,318;$$

$$\tau_{20} = 1,336 \cdot 0,372 + 2,333 \cdot 0,357 + 0,103 \cdot 0,271 = 0,364;$$

$$\tau_{30} = 1,934 \cdot 0,372 - 0,667 \cdot 0,357 - 0,301 \cdot 0,271 = 0,567.$$

Находим зональные оптические плотности по подсчитанным значениям коэффициентов пропускания по формулам (II.214):

$$D_1 = -\lg 0,369 = 0,433; \quad D_2 = -\lg 0,289 = 0,540;$$

$$D_3 = -\lg 0,413 = 0,385;$$

$$D_{10} = -\lg 0,318 = 0,498; \quad D_{20} = -\lg 0,364 = 0,439;$$

$$D_{30} = -\lg 0,567 = 0,246.$$

Примем координату цвета, определяющую яркость рассматриваемого изображения $Y=34,3$. Находим цветовые различия по формуле (II.213):

$$\Delta E = 49 \sqrt{\frac{(0,433 - 0,498)^2 + (0,54 - 0,439)^2 + (0,385 - 0,246)^2}{0,433 + 0,498 + 0,54 + 0,439 + 0,385 + 0,246 - 6 \lg \frac{34,3}{0,322}}};$$

$$\Delta E = 12,6.$$

Определяем значение критерия цветопередачи по формуле (II.212):

$$\xi_c = \frac{12,6}{20} = 0,63.$$

Это значение ξ_c соответствует приемлемому качеству изображения.

Другой причиной искажений цветопередачи является светорассеяние в пленке, оптике, аппаратуре, экране. Чем меньше величина отношения сигнал/шум, тем более значительные возникают искажения, количественную оценку которых можно производить с помощью того же критерия ξ_c (II.209), что и оценку контраста.

Искажения цвета вследствие светорассеяния особенно заметны в тенях, где яркость основного изображения невелика. Если светорассеяние обусловлено тремя пучками света в цветном голографическом процессе, то оно имеет нейтральный (неокрашенный) характер и приводит к снижению насыщенности цвета.

II.4.3. Яркость изображения

Как подтверждает опыт современного кинематографа, яркость светлых (белых) деталей киноизображения может быть принята из условий искажений равной 40—60 кд/м². В голографическом кинематографе такое значение яркости может быть принято для белой диффузной поверхности исходного объекта. Эта яркость определяется следующим соотношением:

$$B = \frac{4\tau_r \eta_p \eta_E E_r}{\pi \varepsilon_r^2 N_z}; \quad (II.219)$$

$$E_r = \frac{F}{Q_r},$$

где E_r — освещенность в плоскости кадрового окна кинопроектора; N_z — число зрительских мест; η_p, η_E — дифракционная эффективность голограммы-фильма и экрана; τ_r, ε_r — коэффициент пропускания света и относительное отверстие проекционного объектива; F — световой поток, проходящий через кадровое окно кинопроектора; Q_r — площадь кадрового окна.

Кинопроекция голографических фильмов может осуществляться как с помощью газоразрядных ламп, так и лазеров.

Если для кинопроекции использовать лазеры непрерывного действия, лучистый поток можно определить по следующей формуле:

$$P_L = \frac{F}{c_L \eta_L}, \quad (II.220)$$

где η_L — коэффициент полезного действия осветительной системы кинопроектора от лазера до кадрового окна; c_L — коэффициент соотношения между световым и лучистым потоками одного и того же излучения.

При этом

$$c_L = 683 \sum k_{pk} k_{\lambda k};$$

$$\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \quad (II.221)$$

где $k_{\lambda k}$ — значение относительной видности излучения для длины волны света λ_k (рис. 138); k_{pk} — доля лучистого потока для данной длины волны света по отношению ко всему лучистому потоку.

Примем для примера:

$$B = 50 \text{ кд/м}^2; \quad \varepsilon_r = 1; \quad N_z = 300;$$

$$Q_r = 48 \cdot 47 \text{ мм}; \quad \eta_p = 0,3; \quad \eta_E = 0,4; \quad \eta_L = 0,5; \quad \tau_r = 0,85;$$

$$\lambda_1 = 460 \text{ нм}; \quad \lambda_2 = 515 \text{ нм}; \quad \lambda_3 = 647 \text{ нм}; \quad k_{p1} = 0,332;$$

$$k_{p2} = 0,305; \quad k_{p3} = 0,363.$$

Находим по формуле (II.219) освещенность в плоскости кадрового окна проектора:

$$E_r = \frac{\pi B \varepsilon_r^2 N_z}{4 \tau_r \eta_p \eta_E}; \quad E_r = \frac{\pi 40 \cdot 1 \cdot 300}{4 \cdot 0,85 \cdot 0,3 \cdot 0,4};$$

$$E_r = 92\,400 \text{ лк.}$$

Находим по формуле (II.219) световой поток, проходящий через кадровое окно кинопроектора:

$$F = 92\,400 \cdot 48 \cdot 47 \cdot 10^{-6} = 208 \text{ лм.}$$

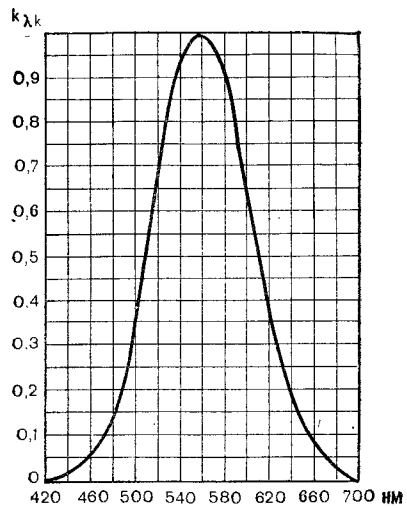


Рис. 138. Коэффициент соотношения между световым и лучистым потоками в зависимости от длины волны

Находим по формуле (II.221) значение коэффициента соотношения между световым и лучистым потоками:

$$c_L = 683 (0,332 \cdot 0,06 + 0,305 \cdot 0,606 + 363 \cdot 0,127).$$

$$c_L = 171 \text{ лм/Вт.}$$

Находим по формуле (II.220) лучистый поток лазеров:

$$P_L = \frac{208}{171 \cdot 0,5} = 2,43 \text{ Вт.}$$

В обычных кинотеатрах на 300 мест при демонстрации кинофильмов с академическим форматом кадра световой поток достигает около 2300 лм, что на порядок больше подсчитанной величины 208 лм при голографической кинопроекции.

Высокая световая эффективность системы голографического киноаппарата объясняется малым количеством поверхностей, диффузно рассеивающих свет при передаче изображения.

В голографическом киноаппарате могут быть переданы блики более высоких яркостей, чем в обычном. Максимальные значения яркости таких бликов определяются по следующей формуле:

$$B_m = B \frac{\Omega_s}{\Omega_B}, \quad (\text{II.222})$$

где Ω_s — телесный угол поля зрения съемочного объектива; Ω_B — телесный угол яркого зеркального элемента поверхности объекта съемки по отношению к съемочному объективу (но не менее угла разрешения системы).

Интересно, что, в отличие от обычного киноаппарата, в голографическом яркость изображения при данном световом потоке кинопроектора непосредственно не зависит от размеров экрана, как видно из формул (II.219). Подобная закономерность характерна для зеркальных систем передачи изображения без использования диффузных поверхностей.

С увеличением числа зрительных зон N_z яркость изображения B при данном световом потоке пропорционально уменьшается. Это обуславливает косвенную зависимость светового потока кинопроектора (необходимого для получения заданной яркости изображения) от размеров экрана, поскольку с увеличением числа зрительных зон необходимо увеличивать размеры экрана, чтобы обеспечить достаточно большие угловые размеры изображения, обуславливающие комфортные условия для зрителей.

Можно принять ширину голографического экрана приблизительно равной:

$$b_E \cong 0,3 \sqrt{N_z}. \quad (\text{II.223})$$

Например, согласно формуле (II.223),

$$\text{при } N_z = 300 \quad b_E = 5,2 \text{ м;}$$

$$\text{при } N_z = 150 \quad b_E = 3,7 \text{ м.}$$

Эти размеры экранов близки к тем, которые используются в обычных кинотеатрах для того же числа зрительских мест.

Угловые размеры проецируемой сцены зависят от назначения системы. Практика современного киноаппарата (театрального, учебного, телевизионного) показывает, что угловые размеры проецируемой сцены по отношению к проектору для обычного формата кадра составляют по ширине от 10° до 20° . Эти угловые размеры можно принять и для систем голографического киноаппарата. Такой же порядок имеют, очевидно, и угловые размеры снимаемой сцены.

Абсолютные размеры сцены зависят от условий киносъемки. Для съемки в некогерентном свете вне помещения размеры снимаемой сцены неограниченны. При съемке в помещении максимальные размеры снимаемой сцены определяют светочувствительностью киноплёнок, энергией излучения и длиной когерентности лазеров, светосилой оптики, а также условиями экспонирования.

Необходимую энергию излучения лазера при заданных размерах сцены можно определить по следующей формуле:

$$W_s = \frac{4H_s Q_s k_Q 10^{-3}}{k_L k_I \rho \varepsilon_l \varepsilon_h}, \quad (\text{II.224})$$

где W_s — энергия лазера (Дж); H_s — чувствительность голографической пленки, численно равная объектной слагающей экспозиции (эрг/см²); Q_s — площадь освещаемой поверхности объекта (м²); ρ — коэффициент отражения света поверхностью снимаемого объекта; k_L, k_I — коэффициент пропускания света, соответственно, съемочного объектива и осветительного устройства; $\varepsilon_l, \varepsilon_h$ — относительное отверстие съемочного объектива по горизонтали и вертикали; k_Q — коэффициент равномерности освещения снимаемой сцены.

Мощность излучения лазеров равна:

$$P_L = \nu_L W_s, \quad (\text{II.225})$$

где ν_L — частота повторения импульсов излучения лазеров.

Световой поток, непосредственно испускаемый лазерами, равен:

$$F_L = c_L P_L. \quad (\text{II.226})$$

Освещенность снимаемой сцены равна:

$$E_s = \frac{F_L k_I}{k_Q Q_s}. \quad (\text{II.227})$$

Примем, например: $H_s = 20$ эрг/см²; $W_s = 10$ Дж; $\varepsilon_l = \varepsilon_h = \frac{1}{0,75}$; $\rho = 0,8$; $k_L = 0,85$; $k_I = 0,7$; $\nu_L = 16$ с⁻¹; $c_L = 170$ лм/Вт; $k_Q = 0,5$.

Находим по формуле (II.227) площадь, которая может быть освещена при киносъемке:

$$Q_s = \frac{W_s k_L k_I \rho \varepsilon_h \varepsilon_l 10^3}{4H_s k_Q};$$

$$Q_s = \frac{10 \cdot 0,85 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \left(\frac{1}{0,75}\right)^2 10^3}{4 \cdot 20 \cdot 0,5} = 212 \text{ м}^2.$$

Удельная плотность энергии на поверхности снимаемых объектов на каждый импульс в среднем составляет:

$$E_R = \frac{10 \cdot 10^7}{212 \cdot 10^4} = 47,2 \text{ эрг/см}^2.$$

Находим среднюю мощность излучения лазеров по формуле (II.225):

$$P_L = 16 \cdot 10 = 160 \text{ Вт}.$$

Находим полезный световой поток, непосредственно излучаемый лазерами по формуле (II.226):

$$F_L = 170 \cdot 160 = 27\,200 \text{ лм}.$$

Находим среднюю освещенность снимаемой сцены по формуле (II.227):

$$E_s = \frac{27\,200 \cdot 0,7}{0,5 \cdot 212} = 168 \text{ лк}.$$

Таким образом, для голографических съемок необходима сравнительно небольшая освещенность снимаемой сцены.

Однако для киносъемки больших сцен необходимо создание мощных лазеров с высокой степенью когерентности и цветных голографических киноплёнок с высокой чувствительностью и характеристиками, обеспечивающими получение трехмерного изображения высокого качества.

II.5.1. Искажения формы изображения

В изобразительной голографии, особенно в голографическом кинематографе, могут возникать геометрические искажения, т. е. отличия формы объемных изображений от формы оригинальных объектов.

Геометрические искажения можно разделить на следующие виды: пропорциональное изменение абсолютных размеров, обращение изображения, сплющивание и растяжение в продольном (по глубине) и поперечных (по вертикали и горизонтали) направлениях, трапецевидные нарушения формы в продольном и поперечном направлениях, искривление контуров.

Рассмотрим геометрические искажения, возникающие в киноголографическом процессе, состоящем из следующих основных звеньев (рис. 139): киносъемка (а), копирование (б), проекция и наблюдение (в). На этом рисунке l_{1s}, l_{2s} — расстояние от главных плоскостей съемочного объектива 3 до, соответственно, элемента объекта съемки 1 и сопряженного элемента изображения 2; l_{1p}, l_{2p} — расстояние от главных плоскостей копировального объектива 3' до сопряженных элементов на входе 2' и выходе 2'' объектива; l_{1r}, l_{2r} — расстояния от главных плоскостей проекционного объектива 3'' до сопряженных элементов проецируемого изображения, соответственно, на входе 2''' и выходе 1' объектива; f_s, f_p, f_r, f_E — фокусные расстояния, соответственно, съемочного 3, копировального 3', проекционного 3'' объективов и экрана 4 для данной зрительной зоны; l_{1E}, l_{2E} — расстояния от экрана 4 до сопряженных элементов изображения на входе 1' и выходе 1'' экрана; 5-фильм-оригинал; 6-фильм-копия; 7 — зритель.

Для передачи изображения объективами справедливы известные соотношения:

$$\frac{1}{l_{1s}} + \frac{1}{l_{2s}} = \frac{1}{f_s}; \quad \frac{1}{l_{1p}} + \frac{1}{l_{2p}} = \frac{1}{f_p}; \quad \frac{1}{l_{1r}} + \frac{1}{l_{2r}} = \frac{1}{f_r}. \quad (\text{II.228})$$

Для передачи изображения голографическим экраном, представляющим собой фокусирующее множительное зеркало, для каждой зоны видения справедливо соотношение:

$$\frac{1}{l_{1E}} - \frac{1}{l_{2E}} = \frac{1}{f_E}. \quad (\text{II.229})$$

При этом: если изображение находится перед экраном, то $l_{1E} > 0, l_{2E} > 0$, а если за экраном, то $l_{1E} < 0, l_{2E} < 0$.

Поперечное оптическое увеличение для съемочного, копировального и проекционного объективов равно:

$$M_s = \frac{l_{2s}}{l_{1s}}; \quad M_p = \frac{l_{2p}}{l_{1p}}; \quad M_r = \frac{l_{2r}}{l_{1r}}. \quad (\text{II.230})$$

Поперечное оптическое увеличение экрана равно:

$$M_E = \frac{l_{2E}}{l_{1E}}. \quad (\text{II.231})$$

Продольные оптические увеличения объективов и экрана равны:

$$M'_s = M_s^2; \quad M'_p = M_p^2; \quad M'_r = M_r^2; \quad M'_E = M_E^2, \quad (\text{II.232})$$

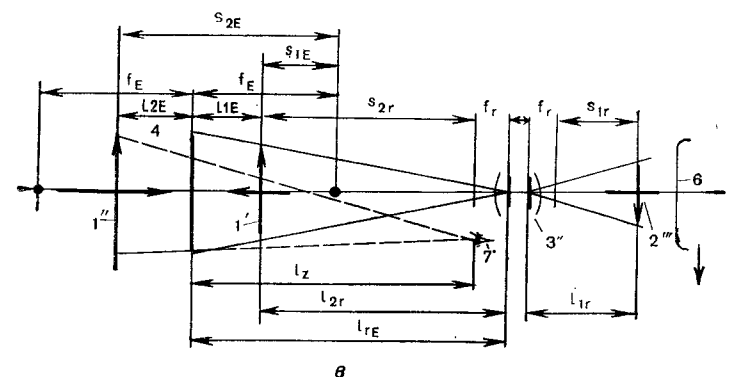
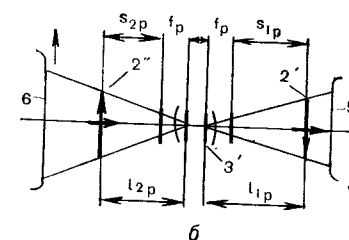
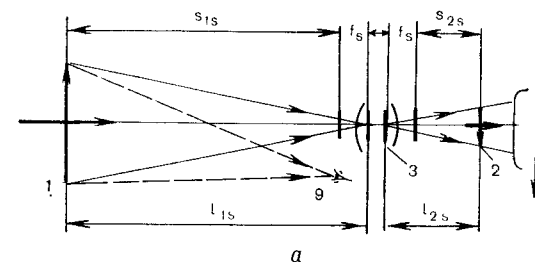


Рис. 139. Схема киноголографического процесса с взаимной компенсацией геометрических искажений в виде обращения изображения

где M'_s, M'_p, M'_r, M'_E — продольные оптические увеличения при передаче изображения, соответственно, съемочным, копировальным, проекционным объективами и экраном.

Результирующее поперечное оптическое увеличение всей киноголографической системы — от оригинального объекта до его изображения, рассматриваемого зрителем, — равно:

$$M_k = M_s M_p M_r M_E. \quad (\text{II.233})$$

Результирующее продольное оптическое увеличение всей киноголографической системы равно:

$$M'_k = M'_s M'_p M'_r M'_E. \quad (\text{II.234})$$

Согласно уравнениям (II.233), (II.234) и (II.232):

$$M'_k = M_k^2. \quad (\text{II.235})$$

Это очень важное соотношение, из которого видно, что правильные пропорции между продольными и поперечными размерами изображения, наблюдаемого зрителем в киноголографической системе (по отношению к оригинальному объекту) соблюдается только при условии

$$M_k = 1. \quad (\text{II.236})$$

Так как результирующее оптическое увеличение M_k зависит от фокусного расстояния экрана (II.233), (II.240), которое в свою очередь зависит от положения зрительского места, то условие $M_k = 1$ (II.236) можно совершенно точно выдержать только для одного, например центрального, места.

Однако для практического распределения зрительских мест, связанного с комплексом требований проекции, геометрические искажения при нарушении условия $M_k = 1$ для других зрительских мест оказываются в допустимых пределах.

Геометрические искажения, возникающие при нарушении условия (II.236), заключаются в том, что трехмерное изображение, наблюдаемое зрителем, оказывается сжатым или растянутым по глубине пространства. Количественно их можно оценить с помощью нормированного критерия сжатия или растяжения изображения по глубине пространства:

при $M_k > 1$

$$\xi_l = \frac{M_k - 1}{4}; \quad (\text{II.237})$$

при $M_k < 1$

$$\xi_l = \frac{\frac{1}{M_k} - 1}{4}. \quad (\text{II.238})$$

Важным требованием к киноголографическому процессу передачи изображения является сохранение оптического увеличения по всей глубине пространства, т. е. соблюдение условия

$$M_k \neq M_k(l_{is}). \quad (\text{II.239})$$

Для нахождения значений параметров киноголографической системы, обеспечивающих соблюдение данного условия, представим выражения (II.230) и (II.231) в следующей форме:

$$M_s = \frac{f_s}{s_{1s}}; \quad M_p = \frac{f_p}{s_{1p}}; \quad M_r = \frac{f_r}{s_{1r}}; \quad M_E = \frac{f_E}{s_{1E}}.$$

При этом

$$s_{1s} = l_{1s} - f_s; \quad s_{1p} = l_{1p} - f_p; \quad s_{1r} = l_{1r} - f_r; \quad s_{1E} = l_{1E} - f_E, \quad (\text{II.240})$$

где s_{1s}, s_{1p}, s_{1r} — расстояния от фокальной плоскости объектива до элемента поверхности объекта съемки 1, до сопряженного элемента 2' копируемого изображения (на входе копировального объектива) и до сопряженного элемента проецируемого изображения 2'' (на входе проекционного объектива); s_{1E} — расстояние от фокальной плоскости экрана до сопряженного элемента изображения на входе экрана (1' на рис. 139).

Подставляя значения M_s, M_p, M_r, M_E из (II.240) в (II.233), получаем:

$$M_k = \frac{f_s f_p f_r f_E}{s_{1s} s_{1p} s_{1r} s_{1E}}. \quad (\text{II.241})$$

Положения сопряженных элементов изображения на выходе предыдущего и на входе последующего звена киноголографической системы связаны между собой следующими соотношениями:

$$s_{1p} = s_{2s} + s_{1p0}; \quad s_{1r} = s_{2p} - s_{1r0}; \quad s_{1E} = s_{2r} - s_{1E0}. \quad (\text{II.242})$$

При этом

$$s_{2s} = \frac{f_s^2}{s_{1s}}; \quad s_{2p} = \frac{f_p^2}{s_{1p}}; \quad s_{2r} = \frac{f_r^2}{s_{1r}}; \quad s_{2E} = \frac{f_E^2}{s_{1E}},$$

где s_{2s}, s_{2p}, s_{2r} — расстояния от фокальной плоскости объектива до элемента изображения 2 на выходе съемочного объектива, до элемента изображения 2'' на выходе копировального объектива, до элемента изображения 1' на выходе проекционного объектива; s_{2E} — расстояние от фокальной плоскости экрана до элемента изображения на выходе экрана 1'' (см. рис. 139); $s_{1p0}, s_{1r0}, s_{1E0}$ — параметры системы, постоянные величины для каждой конкретной системы.

Подставляя значения s_{1s}, s_{1p}, s_{1r} из (II.240) в (II.241), получаем в соответствии с (II.242) следующее выражение для оптического увеличения системы в целом:

$$M_k = \frac{f_s f_p f_r f_E}{f_s^2 (f_r^2 + s_{1r0} s_{1E0}) + c_M s_{1s}}; \quad (\text{II.243})$$

$$\text{Здесь } c_M = f_r^2 s_{1p0} - f_p^2 s_{1E0} + s_{1p0} s_{1r0} s_{1E0}.$$

Чтобы соблюдалось постоянство оптического увеличения по глубине (II.239), необходимо, чтобы $c_M = 0$, так как при этом $M_k \neq M_k(s_{1s})$ (II.243). Для этого, согласно (II.243), требуется соблюдение равенства:

при $c_M = 0$

$$s_{1r0} = \frac{f_p^2}{s_{1p0}} - \frac{f_r^2}{s_{1E0}}. \quad (\text{II.244})$$

Можно принять при $l_{1s} \rightarrow \infty$,

$$s_{2s} = 0, \quad s_{1p} = s_{2p} = f_p, \quad s_{1E} = 0 \quad (\text{II.245})$$

Тогда, согласно (II.242) и (II.244):

$$s_{1p0} = f_p; \quad s_{1r0} = f_p - \frac{f_r^2}{s_{1E0}}; \quad (\text{II.246})$$

$$s_{1E0} \cong l_{rE} - f_E.$$

Кроме того,

$$\frac{1}{f_E} = \frac{1}{l_{rE}} + \frac{1}{l_z}. \quad (\text{II.247})$$

Для принятых условий (II.244), (II.246), согласно (II.243) и (II.247), оптическое увеличение киноголографической системы равно

$$M_k \cong \frac{f_r l_z}{f_s l_{rE}}, \quad (\text{II.248})$$

где l_z , l_{rE} — расстояние между экраном 4 и зрителем 7, и между экраном и проекционным объективом 3''.

Для количественной оценки геометрических искажений, обусловленных непостоянством оптического увеличения по глубине, можно воспользоваться следующим критерием:

$$\xi_q = \frac{\frac{M_1}{M_2} - 1}{4}, \quad (\text{II.249})$$

где M_1 , M_2 — поперечное оптическое увеличение изображения наиболее близкого и наиболее удаленного объекта в кадре. При этом

$$M_1 > M_2. \quad (\text{II.250})$$

Следует отметить, что в отдельных случаях для усиления худо-

жественной выразительности, выделения в изображении наиболее существенных признаков предметов может быть целесообразным внести геометрические искажения в нужных масштабах.

Высказывается ошибочное мнение, что недостатком голографического кинематографа является якобы невозможность получения крупного плана. Действительно, при результирующем оптическом увеличении, значительно большем единицы, продольные размеры

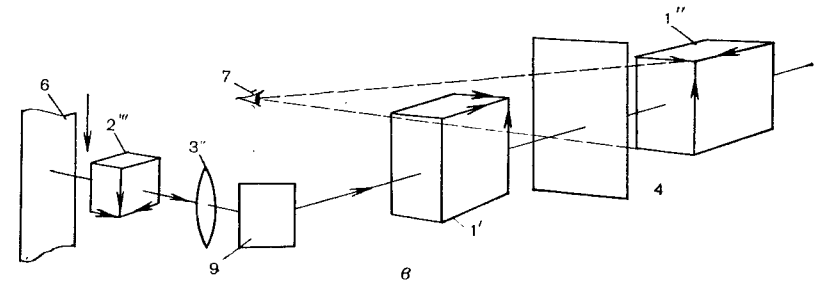
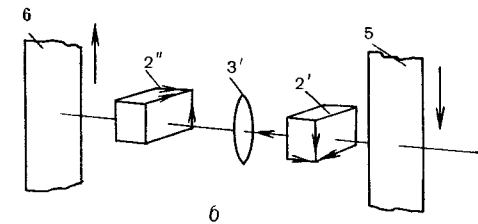
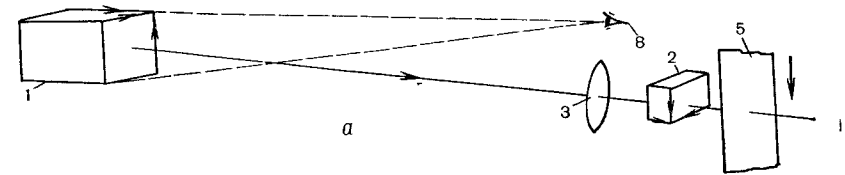


Рис. 140. Обращение изображения в сквозном киноголографическом процессе, включающем звенья съемки, копирования, проекции и наблюдения

чрезмерно возрастают. Однако в голографическом кинематографе всегда возможна съемка объекта в виде плоского изображения (обычным объективом и на обычную пленку) с последующим переводом этого изображения в голографическое и затем проекция в голографическом фильме.

Геометрические искажения в голографическом кинематографе могут быть обусловлены сильной дисторсией сверхсветосильных объективов, применяемых для передачи объема. Использование метода обратного хода лучей через объективы в процессах съем-

ка — копирование — проекция можно устранить этого рода искажения.

При передаче трехмерных голографических изображений возможно возникновение геометрических искажений в виде образования псевдоскопических изображений, когда элементы, наиболее

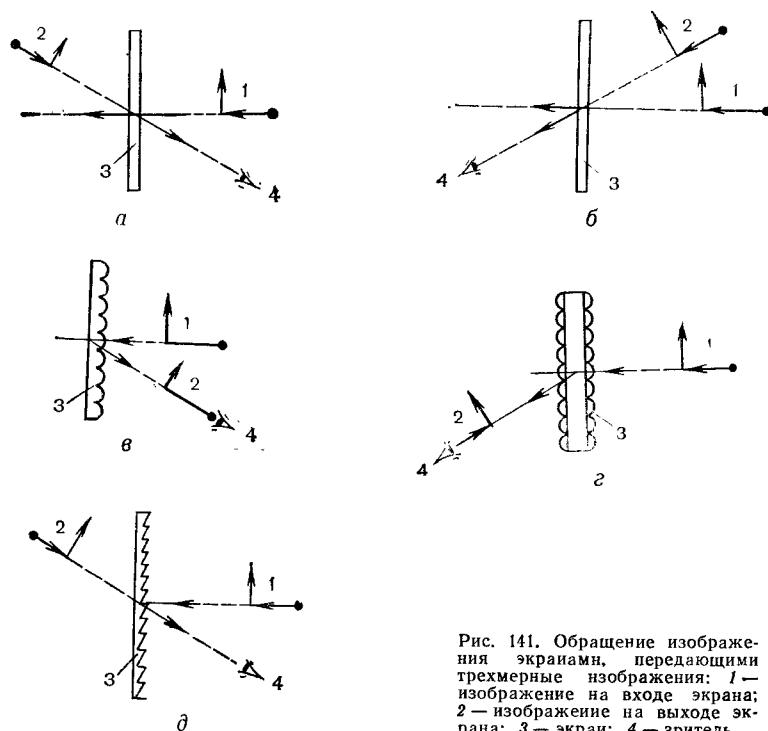


Рис. 141. Обращение изображения экранами, передающими трехмерные изображения: 1 — изображение на входе экрана; 2 — изображение на выходе экрана; 3 — экран; 4 — зритель

близкие в объекте, оказываются наиболее удаленными в изображении.

На рис. 140 показана схема киноголографического процесса, в котором в результате двух ступеней обращения (съемка — копирование — проекция) зритель наблюдает ортоскопическое изображение. Обозначения на этой схеме те же, что и на рис. 139. Кроме того, здесь 8 — оператор; 9 — зеркало, с помощью которого устраняется зеркальное обращение киноизображения 1, наблюдаемого зрителем и обусловленного зеркальными свойствами голографического экрана.

Следует отметить, что не все экраны, применяемые для проекции трехмерных изображений, обладают одинаковыми свойствами обращения. На рис. 141 показаны свойства обращения изображения различного вида экрана: голографическим (а, б), зеркально-растровым (в), линзо-растровым отражательного (г) и пропускающего (з) типов.

II.5.2. Устойчивость изображения

В голографическом кинематографе допустима неустойчивость изображения такого же порядка, как в обычном кинематографе. Принимается допустимой взвешенная величина двойных среднеквадратичных отклонений, равная:

$$2\sigma_N = 0,35\%, \quad (\text{II.251})$$

а неприемлемой:

$$2\sigma_m > 0,45\%. \quad (\text{II.252})$$

Указанные величины отнесены к полной высоте кадра, которая соответствует в системе обычного кинематографа угловому размеру наблюдаемого изображения:

для передних мест

$$\beta_m \cong 25^\circ; \quad (\text{II.253})$$

для центральных мест

$$\beta_c \cong 10^\circ. \quad (\text{II.254})$$

Согласно формуле (II.253), допустимый угловой размер взвешенной величины двойных среднеквадратичных отклонений, обусловленных неустойчивостью изображения, для передних мест достигает:

$$\gamma_m \cong 6 \text{ угл. мин.} \quad (\text{II.255})$$

Указанная здесь величина γ_m соответствует действительным угловым размерам двойных среднеквадратичных отклонений, если частота их невелика и равна примерно 2 колебаниям в секунду.

При частоте 24 колебания в секунду допустимая угловая величина двойных среднеквадратичных отклонений оказывается меньше и достигает

$$\gamma'_m = 3 \text{ угл. мин.} \quad (\text{II.256})$$

В системах голографического кинематографа с квазисфокусированным изображением на пленке допустимым угловым отклонением, обусловленным неустойчивостью изображения, соответствуют поперечные отклонения изображения в кадровом окне кинопроектора, равные:

$$2\sigma_m = \frac{16,67 \gamma_m}{\beta_m} h_p, \quad (\text{II.257})$$

где $2\sigma_m$ — допустимая взвешенная величина двойных среднеквадратичных поперечных отклонений на пленке, мкм; h_p — высота кадра на пленке, мм; γ_m — допустимый угловой размер взвешенной величины двойных среднеквадратичных отклонений (угл. мин);

β_m — угловой размер полной высоты кадра, наблюдаемого зрителем (град).

Примем для примера $\gamma'_m = 3$ угл. мин, $\beta_m = 25^\circ$; $h_p = 47,5$ мм.

Получаем по формуле (II.257) для допустимых отклонений на пленке значение:

$$2\sigma_m = \frac{16,67 \cdot 3 \cdot 47,5}{25} = 95 \text{ мкм.}$$

Если используют систему с анаморфированием квазисфокусированного изображения, требования к устойчивости изображения в кадровом окне кинопроектора значительно возрастают. Например, при высоте кадра на пленке $h_p = 4,75$ мм и для $\gamma'_m = 3$ угл. мин $\beta_m = 25^\circ$ по формуле (II.257):

$$2\sigma_m = \frac{16,67 \cdot 3 \cdot 4,75}{25} = 9,5 \text{ мкм.}$$

При воспроизведении трехмерных голографических киноизображений с непрерывным движением пленки в кадровом окне кинопроектора возникает неустойчивость изображения, наблюдаемого зрителем. Она обусловлена тем, что условия точного преобразования Фурье выполняются только для плоского изображения, которое расположено в фокальной плоскости объектива.

Элементы изображения, лежащие вне фокальной плоскости, колеблются с частотой смены кадров. Величина неустойчивости изображения достигает при этом значения, которое можно определить по формуле (II.257). При этом параметры схем киносъемки и кинопроекции, определяющие неустойчивость изображения, наблюдаемого зрителем при непрерывном движении пленки для щелевого преобразования Фурье, показаны на рис. 142. На этом рисунке

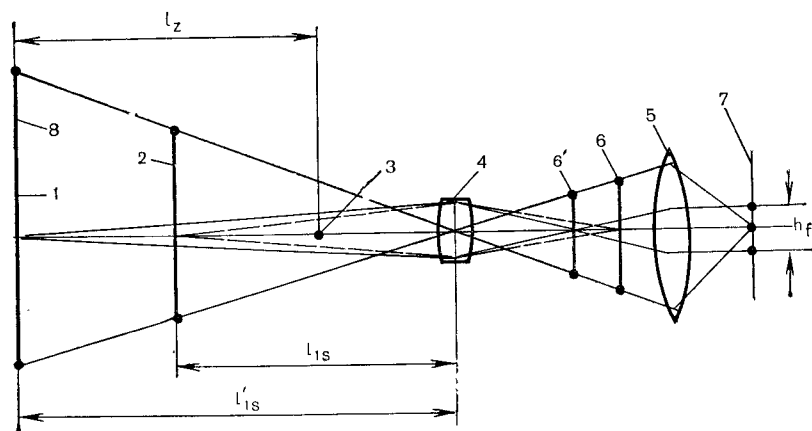


Рис. 142. Неустойчивость трехмерного голографического изображения, наблюдаемого зрителем при непрерывном движении пленки в кинопроекторе с оптическим преобразованием Фурье

2 — киноизображение, снимаемое на пленку 7 и наблюдаемое зрителем 3 — при кинопроекции; 1 — киноизображение, соответствующее главной плоскости снимаемого объекта и расположенное в плоскости голографического экрана 8 при проекции; 4 — щелевой объектив; 5 — объектив преобразования Фурье при съемке и проекции; 6' — киноизображение объекта 1, уменьшенное объективом 4 при съемке; 6 — киноизображение объекта 3, лежащее в фокальной плоскости объектива Фурье 5.

$$\gamma = \frac{h_f f_L}{l_z f_F} \cdot \frac{\left| \frac{l'_{1s}}{l_{1s}} - 1 \right|}{1 - \frac{f}{l'_{1s}}}, \quad (\text{II.258})$$

где γ — угловая величина поперечного отклонения (вверх—вниз) элемента изображения по отношению к зрителю (радианы); l_z — расстояние от зрителя до экрана, соответствующего плоскости точного преобразования Фурье; f_L — фокусное расстояние щелевого объектива при съемке и проекции; f_F — фокусное расстояние объектива Фурье-преобразования при съемке и проекции; l'_{1s} — расстояние от щелевого объектива до главной плоскости снимаемого объекта, соответствующей точному преобразованию Фурье; l_{1s} — расстояние от щелевого объектива до элемента объекта, для которого рассматривается неустойчивость изображения; h_f — высота кадра на пленке.

Обычно $l'_{1s} \gg f_L$, поэтому формула (II.258) может быть представлена в виде:

$$\gamma = \frac{h_f f_L}{l_z f_F} \left| \frac{l'_{1s}}{l_{1s}} - 1 \right|. \quad (\text{II.259})$$

Возьмем для примера $h_f = 0,92$ мм, $f_L = 300$ мм, $f_F = 112$ мм, $l_{1s} = 3000$ мм, $\frac{l'_{1s}}{l_{1s}} = 0,5$.

По формуле (II.259) получаем:

$$\gamma = \frac{0,92 \cdot 300}{3000 \cdot 112} \left(\frac{1}{0,5} - 1 \right) = 0,000821 \text{ рад};$$

$$\gamma = 2,82 \text{ угл. мин.}$$

II.5.3. Особенности растрово-голографического изображения

В системах голографического кинематографа предусмотрена съемка малых и средних сцен с помощью лазеров, а больших сцен вне помещения — в обычном некогерентном свете. Изобразительные голограммы больших объектов в ряде случаев более целесообразно получать многоракурсной (растровой или многообъективной) съемкой объекта в обычном некогерентном свете с последующим переводом в голографическое.

Съемка трехмерных изображений в свете лазеров обладает большим преимуществом перед съемкой в обычном свете с помощью растров или многообъективных оптических блоков. Эти преимущества обусловлены значительно большим количеством информации, которое может быть зарегистрировано на голографической пленке вследствие ее чрезвычайно высокой разрешающей силы по сравнению с обычной кинофотопленкой при одинаковых размерах кадра. Максимальная плотность информации при съемке на голографическую пленку может превосходить в тысячи раз плотность информации при съемке на обычную фотопленку, что обеспечивает более высокое качество изображения и значительно более экономное решение.

Однако при съемке больших сцен вне помещения практически невозможно использовать лазерное освещение; в таких случаях предусматривается съемка на первом этапе при естественном свете. Приходится мириться с существенными недостатками такого процесса: более громоздкой съемочной установкой, меньшей глубиной резкости, отсутствием близких передних планов, меньшим диапазоном яркости объектов. Несмотря на это, качество изображения при растровом методе съемки может быть получено в целом более высоким, чем в обычном кинематографе, поскольку вместо плоского получается объемное изображение.

На рис. 143 показана схема растровой съемки кинофильма с трехмерным изображением при некогерентном освещении с помо-

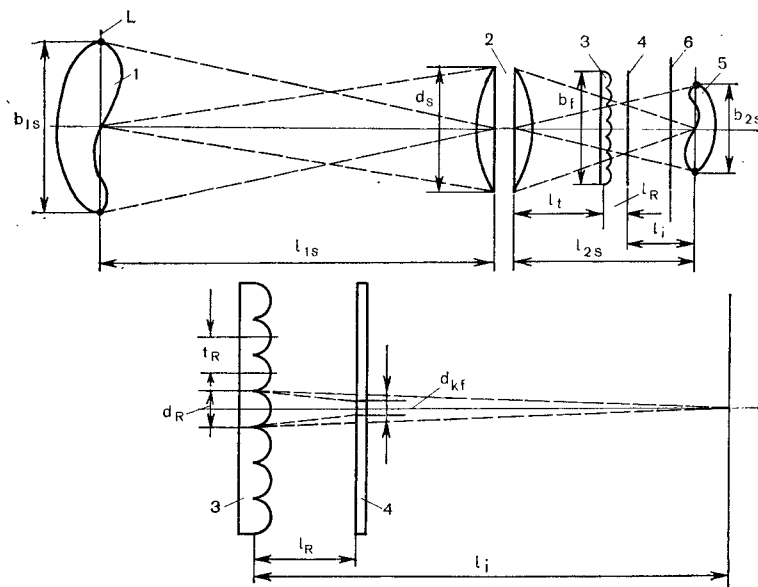


Рис. 143. Схема растровой съемки кинофильма с трехмерным изображением при некогерентном освещении

щью оптического блока, состоящего из объектива с большой апертурой и мелкоструктурного линзового раstra. На этой схеме 1 — снимаемый объект; 2 — объектив с большой апертурой; 3 — мелкоструктурный линзовый растр; 4 — кинопленка; 5 — изображение снимаемого объекта, формируемое объективом без раstra; 6 — фокальная плоскость объектива с большой апертурой.

Для схемы рис. 143 справедливы следующие соотношения:

$$l_{2s} = \frac{f_s}{1 - \frac{f_s}{l_{1s}}}; \quad l_t + l_i = l_{2s}, \quad (\text{II.260})$$

где l_{1s} , l_{2s} , l_t — расстояния от главной плоскости объектива 2 до снимаемого объекта 1, киноизображения 5, уменьшенного объективом 2, главной плоскости раstra; f_s — фокусное расстояние объектива 2.

Назовем главной плоскостью снимаемого изображения плоскость 1, для которой достигается максимальная резкость изображения, регистрируемого на пленке 4. При этом соблюдается условие:

$$l_R = \frac{f_R}{1 + \frac{f_R}{l'_i}}; \quad l'_{2s} = \frac{f_R}{1 - \frac{f_R}{l'_{1s}}}; \quad l_t = l_{2s} - l'_i, \quad (\text{II.261})$$

где l_R — расстояние от главной плоскости линз раstra до светочувствительного слоя пленки 4; f_R — фокусное расстояние линз раstra; l'_{1s} , l'_{2s} , l'_i — расстояния l_{1s} , l_{2s} , l_i при расположении объекта съемки в главной плоскости снимаемой сцены; l_i — расстояние между растром 3 и изображением 5.

Из условия максимальной резкости изображения (отсутствия перекрытия изображений на пленке от двух соседних линз раstra) и полного использования площади кадра необходимо соблюдение равенства относительного отверстия объектива и шага раstra:

$$t_R = l_R \frac{d_s}{l_t}, \quad (\text{II.262})$$

где t_R — шаг раstra; d_s — ширина зрачка объектива 2.

Для определения резкости результирующего изображения в системе голографического кинематографа, содержащей звено растровой киносъемки и звено перевода растрового изображения в голографическое, можно воспользоваться формулами (II.167), (II.169). В формулу (II.168) должны быть подставлены значения критических пространственных частот всех звеньев киноголографического процесса, включая звено растровой киносъемки и перевода растрового изображения.

Киноголографический процесс с растровой съемкой характеризуется количеством ракурсов изображения, которое может быть передано в системе. Как видно из рис. 143, это число равно:

$$m_R = \frac{b_s l_i}{t_R l_{2s}}. \quad (\text{II.263})$$

Увеличение числа передаваемых ракурсов m_R повышает качество изображения в отношении его непрерывности. Если передаваемое число ракурсов чрезмерно мало, то при перемещении глаз зрителя в поперечном горизонтальном направлении в пределах зрительной зоны непрерывность наблюдаемого изображения нарушается. Это выражается в скачкообразном изменении ракурсов, в особенности заметном при большой глубине сцены, и в изменении яркости изображения, в особенности заметном, если линзы раstra диафрагмированы, что часто оказывается необходимым при использовании объективов с большим относительным отверстием для соблюдения условия (II.262).

Увеличению числа ракурсов препятствует снижение резкости изображения, которое может быть до известных пределов компенсировано увеличением размеров кадра на пленке. Однако возрастание размеров кадра ограничивается технико-экономическими условиями.

Для количественной оценки зависимости резкости изображения от числа ракурсов и размеров кадра на пленке воспользуемся формулой (II.169). Кроме того, введем величину углового размера наблюдаемого изображения, которая не должна быть чрезмерно низкой для комфортных условий восприятия:

$$\zeta_r = \frac{250}{l_q \nu_{sE}}; \quad b_E \cong 2 l_q \operatorname{tg} \frac{\alpha_E}{2}, \quad (\text{II.264})$$

где ζ_r — нормированный критерий качества изображения по резкости; l_q — расстояние от глаз зрителя до наблюдаемого изображения, которое примем лежащим в плоскости экрана; ν_{sE} — критическая пространственная частота сквозного кинематографического процесса, приведенная к плоскости экрана; α_E — угол наблюдения изображения, соответствующего ширине экрана.

Критическая пространственная частота сквозного кинематографического процесса, приведенная к плоскости киноплёнки, равна

$$\nu_{sf} = \nu_{sE} \frac{l'_{1s}}{l'_{2s}} \cdot \frac{l'_i}{l_R} \cdot \frac{b_E}{b_{1s}}; \quad (\text{II.265})$$

$$b'_{1s} = b'_{2s} \frac{l'_{1s}}{l'_{2s}},$$

где b'_{1s} — ширина объекта съёмки при расположении его в главной плоскости сцены; b'_{2s} — ширина изображения на выходе объектива.

Подставляя в (II.265) значения l'_i , l_R из (II.262) и (II.263), получаем:

$$\frac{\nu_{sf} b_f}{m_R} = c_R; \quad (\text{II.266})$$

$$\text{Здесь } c_R = 500 \frac{\operatorname{tg} \frac{\alpha_E}{2}}{\zeta_r} \cdot \frac{l'_{2s}}{l'_i} \cdot \frac{b_f}{b_{2s}}; \quad c_R \cong \text{const.}$$

Так как величина c_R может быть принята постоянной для заданного качества изображения, то из соотношений (II.266) можно сделать важный вывод, что для увеличения числа ракурсов m_R необходимо увеличивать ширину кадра на пленке b_f , а также критическую пространственную частоту сквозного кинематографического процесса. Повысить эту частоту ν_{sf} можно в первую очередь за счет критической пространственной частоты киноплёнки ν_f (на которой регистрируется растровое изображение), поскольку киноплёнка является наиболее слабым звеном кинематографического процесса.

Отношение величин $\frac{b_f}{l'_{2s}}$ в выражении (II.266) определяется соотношениями

$$b_f = b'_{2s} + (d_s - b'_{2s}) \frac{l'_i}{l'_{2s}}; \quad (\text{II.267})$$

$$b'_{2s} = \frac{2 f_s \operatorname{tg} \frac{\alpha_E}{2}}{1 - \frac{f_s}{l'_{1s}}}.$$

Как видно из уравнений (II.266), (II.267), для получения возможно меньших размеров кадра при заданной резкости изображения и числе ракурсов целесообразно растр и киноплёнку располагать между главной и фокальной плоскостью объектива, ближе к фокальной, т. е. выбирая небольшим отношение

$$\frac{l'_i}{l'_{2s}} \ll 1. \quad (\text{II.268})$$

При чрезмерно малых значениях отношения (II.268) уменьшается глубина резкости снимаемых сцен. Кроме того, шаг раstra оказывается при этом настолько малым, что возникают технологические трудности изготовления подобных растров высокого качества.

Согласно (II.262), (II.263), шаг раstra из условия согласования относительных отверстий объектива и линз раstra, а также из условия передачи заданного числа ракурсов определяется соотношениями

$$t_R = m_R \frac{l_R}{l'_i} \cdot \frac{1}{1 - \frac{l'_i}{l'_{2s}}};$$

$$l'_{2s} = \frac{l_{s1} l_s}{1 - \frac{f_s}{l'_{1s}}}; \quad (II.269)$$

$$l_R \cong f_R,$$

где f_s — фокусное расстояние кинесъемочного объектива (2 на рис. 143); f_R — фокусное расстояние линз раstra.

При чрезмерно близком расположении раstra от фокальной плоскости объектива снижается глубина резкости, что может быть количественно учтено с помощью следующего выражения:

$$d_{kf} = d_R l_R \left| \frac{1}{l'_i} - \frac{1}{l_i} \right|, \quad (II.270)$$

где d_{kf} — ширина пятна рассеяния света на киноплёнке в случае, когда объект съемки находится вне главной плоскости сцены; d_R — рабочая ширина линзы раstra (с учетом диафрагмы).

В устройствах для съемки растровых изображений с последующим их переводом в изобразительные голограммы больших размеров можно применять растры со сферическими линзами, образующими регулярную, например гексагональную, структуру. В устройствах получения растровых киноизображений с последующим переводом в голографические практически можно применить только линейные растры с цилиндрическими линзами (с передачей горизонтальных ракурсов изображения), так как только в этом случае можно получить приемлемые в технико-экономическом смысле решения, обеспечивающие приемлемое по резкости и числу ракурсов изображение. В этом случае основной объектив также имеет цилиндрические линзы и обладает разными фокусными расстояниями для горизонтальной и вертикальной плоскостей.

Экспозиция при съемке растровых киноизображений для последующего перевода их в голографические может быть определена на основе следующих соображений.

Яркость освещенного объекта съемки с поверхностью, диффузно рассеивающей свет, равна:

$$B_s = \frac{\rho E_s}{\pi}, \quad (II.271)$$

где B_s , E_s — яркость и освещенность объекта съемки; ρ — коэффициент отражения света снимаемым объектом.

Световой поток, отраженный от снимаемого объекта и падающий на кинесъемочный объектив, равен:

$$F_s = \frac{B_s b_{1s} h_{1s}}{l_{1s}^2} b_s h_s. \quad (II.272)$$

где b_{1s} , h_{1s} — ширина и высота снимаемого объекта; b_s , h_s — ширина и высота зрачка кинесъемочного объектива.

Освещенность киноплёнки при экспонировании равна:

$$E_f \cong \frac{F_s}{b_f h_f} \tau_s \tau_R \frac{b_R}{l_R}, \quad (II.273)$$

где b_f , h_f — ширина и высота кадра на плёнке; τ_s , τ_R — коэффициент пропускания света объективом и растром; t_R , b_R — шаг раstra, равный полной ширине линзы, и полезная часть ширины линзы без диафрагмы.

Экспозиция при съемке кадра фильма равна:

$$H_f = \frac{E_f \gamma_t}{360 \gamma_t}, \quad (II.274)$$

где γ_t — угол открытия обтюратора; γ_t — частота кинесъемки.

Из уравнений (II.271), (II.272) получаем следующую формулу для определения необходимой освещенности сюжетно важной части объекта при растровой кинесъемке:

$$E_s \cong \frac{1130 \gamma_t H_f}{\gamma_t \tau_s \tau_R \rho^{\varepsilon_H} \varepsilon_V} \cdot \frac{t_R}{b_R}; \quad (II.275)$$

$$\varepsilon_b = \frac{b_s}{f_{sb}}; \quad \varepsilon_h = \frac{h_s}{f_{sh}},$$

где f_{sb} , f_{sh} — фокусное расстояние кинесъемочного объектива в горизонтальной и вертикальной плоскостях; ε_b , ε_h — относительное отверстие кинесъемочного объектива в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

На протяжении последних двадцати лет голография дала исключительно эффективный способ создания безукоризненных по качеству трехмерных изображений. Появилась самостоятельная область голографической техники — изобразительная голография, которая прочно вошла в нашу жизнь и продолжает интенсивно развиваться, особенно в направлении повышения качества голографического изображения.

Дальнейшее совершенствование изобразительной голографии обусловлено прогрессом в трех областях: развития схемных решений процессов записи и восстановления изображений; разработки лазерной техники, особенно импульсной и на красителях; усовершенствования существующих и создания новых фотоматериалов и процессов их обработки, о чем говорится в соответствующих разделах книги.

Переход к импульсной лазерной технике упростит процесс получения голограмм за счет устранения громоздких антивибрационных устройств и, кроме того, расширит круг голографируемых объектов.

Решение технических задач приведет к тому, что в развитии изобразительной голографии важное место займет художественная голография как новая область изобразительного искусства.

Для обеспечения работ по цветной голографии необходимо создание импульсных лазеров с большой энергией импульса и узкой линией красного, зеленого и синего излучения.

Уже сейчас наблюдается значительный прогресс в области голографических фотоматериалов. Их характеристики непрерывно улучшаются. Так, созданные в нашей стране «прозрачные» фотоматериалы, обладающие очень низким уровнем шума, но ранее непригодные для работы с импульсными лазерами, в течение последних лет значительно усовершенствованы. Светочувствительность возросла в десятки раз, и их стали применять для голографирования с импульсными лазерами.

Трехмерное голографическое изображение имеет настолько большое преимущество по сравнению с плоским, что представляется закономерным переход от уже законченного этапа создания экспериментальной системы голографического кинематографа к его практическому применению.

Более сложная техника голографического кинематографа, очевидно, не сможет стать тормозом на пути его практического применения, ибо эта техника постоянно будет совершенствоваться и упрощаться.

Эффект, достигаемый при замене обычного плоского изображения на голографическое как в отношении художественно-выразительных средств, так и по достоверности воспроизводимого изобра-

жения, столь велик, что вполне оправдывает и увеличение затрат.

Большие перспективы развития имеет голографический кинематограф и как средство научного исследования. При этом перспективными представляются системы голографического кинематографа, в которых изображение, регистрируемое на пленке и воспроизводимое для наблюдения и инструментальной оценки, может являться либо световой копией снимаемого объекта, либо интерференционной картиной, определяющей характер движения и вибрации объекта.

- Андреев Ю. С., Вахтанова Л. П., Гапоненко И. Е., Груз Э. А., Янушевская Т. А. Исследование зависимости параметров фазовых голограмм от величины экспозиции и условий химико-фотографической обработки. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л., «Наука», 1979, с. 96—103.
- Андреева О. В., Борин А. В., Гафурова Н. С., Михеева В. П., Просалова Н. А., Суханов В. И. Особенности регистрации трехмерных голограмм на фотопленке ФП-ГТ. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л., «Наука», 1979, с. 16.
- Басов Н. Г., Прохоров А. М. — «ЖЭТФ», 1954, т. 27, с. 431, 1956, т. 30, с. 560.
- Бектимирова З. А., Комар В. Г. Информационная оценка качества изображения различных систем кинематографа. — «Техника кино и телевидения», 1978, с. 3—10.
- Беляев В. П., Zubov В. В., Камальдинов Н. А., Лесной М. А., Лябин Н. А., Рутковский С. В., Чурсин А. Д. Эффективный излучатель на парах меди. — «Электронная промышленность», 1984, № 10, с. 28—30.
- Буймистрюк Г. Я., Дмитриев А. Я. О выборе длин волн излучения лазеров для получения цветных голографических изображений. — «Приборостроение», 1982, № 3, с. 79—82.
- Вендровский К. В., Вейцман А. И. Фотографическая структурометрия. М., «Искусство», 1982.
- Ворзобова Н. Д., Стаселько Д. И. О дифракционной эффективности трехмерных голограмм, записанных при кратковременных засветках. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л., «Наука», 1979, с. 49—57.
- Гафурова Н. С., Ровинская Ю. И., Михеева В. П. Галогенидосеребряные фотопленки для голографии, разработанные Казнитехфотопроектом и выпускаемые промышленностью. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л., «Наука», 1979, с. 8—10.
- Гребенников О. Ф., Кулаков А. К. Информационная оценка четкости и резкости изображения. Запись звука и изображения. — «Труды ЛИКИ», 1980, 88—105.
- Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения. — «ДАН СССР», 1962, т. 144, с. 1275; «Оптика и спектроскопия», 1963, т. 15, с. 522; 1965, т. 18, с. 152.
- Денисюк Ю. Н. Принципы голографии. Л., ГОИ, 1978.
- Денисюк Ю. Н. Оптическая голография. Л., «Наука», 1979.
- Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М., «Мир», 1978.
- Дударева Л. Г., Комар В. Г., Котельникова Н. Н., Любавская И. К., Мелешевич Я. И., Серов О. Б., Широкова Н. И. Киносъемка мультипликационного голографического фильма с цветным трехмерным изображением. — «Труды НИКФИ», 1985, вып. 122.
- Ермолаев М. М., Селявко Л. В., Смаев В. П. Влияние проявляющих растворов на качество голографического изображения. — «ОМП», 1984, № 9, с. 39—43.

- Загорская З. А., Шевченко С. Б. Получение и обработка регистрирующего материала для голографии на основе бихромированной желатины. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л., «Наука», 1979, с. 114—116.
- Звелто О. Физика лазеров. М., «Мир», 1979.
- Зельдович Б. Я., Шкунов В. В., Яковлева Т. В. Модовая теория объемных голограмм. — «ФИАН, препринт», 1978, № 54.
- Зельдович Б. Я., Шкунов В. В. Модовая теория просветных объемных голограмм с учетом поглощения при записи. Краткие сообщения по физике. — «ФИАН», 1979, № 1, с. 24—27.
- Зельдович В. Я., Мировицкий Д. И., Ростовцева Н. В., Серов О. Б. Особенности двухслойных фазовых голограмм. — «Квантовая электроника», 1984, т. 11, вып. 3, с. 537—543.
- Качмарек Ф. Введение в физику лазеров. М., «Мир», 1981.
- Кириллов Н. И. Высокоразрешающие фотоматериалы для голографии и процессы их обработки. М., «Наука», 1979.
- Клиот-Дашинская И. М., Стаселько Д. И., Стригун В. Л. Исследование записи изобразительных отражательных голограмм с помощью импульсного лазера на рубине. — «Оптика и спектроскопия», 1985, т. 59, вып. 3, с. 618—622.
- Колфилд Г. Оптическая голография. М., «Мир», 1982.
- Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., «Мир», 1973.
- Комар В. Г. О зернистости изображения в кинематографе. — «Техника кино и телевидения», 1968, № 4, с. 3—9.
- Комар В. Г. Информационная оценка качества изображения кинематографических систем. — «Техника кино и телевидения», 1971, № 10, с. 9—22.
- Комар В. Г. О возможности создания театрального голографического кинематографа с цветным объемным изображением. — «Техника кино и телевидения», 1975, № 4, с. 5, 31, 34.
- Комар В. Г. О принципиальной схеме кинопроекции цветных объемных голографических изображений. — «Труды НИКФИ», 1976, вып. 82, с. 5—32.
- Комар В. Г. Системы голографического кинематографа, совместимые с системами стереоскопического и обычного кинематографа. — «Техника кино и телевидения», 1978, № 10, с. 3.
- Комар В. Г. Информационная оценка систем голографического кинематографа, предусматривающих съемку больших сцен в некогерентном свете. — «Труды НИКФИ», 1980, в. 99, 5—37.
- Комар В. Г. Характеристические дифракционные кривые голографических фотоматериалов. — «Труды НИКФИ», 1982, вып. 110, с. 29—37.
- Комар В. Г., Голенко Г. Г. Разрешающая способность и глубина резко передаваемого пространства в системе голографического кинематографа на основе растровой киносъемки. — «Труды НИКФИ», 1982, вып. 110, 127—144.
- Комар В. Г., Налимов И. П., Овечкис Ю. Н., Федчук И. У., Шакиров А. Х. Запись голографических экранов для проекции объемных изображений. — «Техника кино и телевидения», 1978, № 1, с. 15—17.
- Комар В. Г., Овечкис Ю. Н. О цветопередаче голографических изображений. — «Техника кино и телевидения», 1976, № 9, с. 18—22.
- Комар В. Г., Серов О. Б., Скибин В. А., Селезнев В. Г., Еленевский Д. С., Сипухин И. Г., Шапошников Ю. Н., Машковцев А. Н. О системе голографического кинематографа, предназначенной для исследования и контроля интерфей-

- реционным методом деформаций и напряжений вибрирующих и вращающихся изделий. — «Труды НИКФИ», 1982, вып. 110, с. 5—13.
- Копейко Л. Г., Серов О. Б. Разрешающая способность иммерсионного метода голографоскопии глаза. — «Труды НИКФИ», 1982, вып. 110, 185—191.
- Крупицкий Э. И., Чернов Б. К. Строгий анализ объемных голографических решеток с произвольным наклоном слоев. Материалы X Всесоюзной школы по голографии. Л., «ЛИЯФ», 1977, с. 84—85.
- Кузин В. А., Стаселько Д. И. Особенности записи отражательных голограмм диффузно рассеивающих объектов с использованием импульсного лазера на рубине. — В кн.: Оптическая голография. Л., «Наука», 1979, с. 85—92.
- Лазеры на красителях. Под ред. Ф. П. Шефера. М., «Мир», 1976.
- Лецев А. А., Сидорович В. Г. Теория преобразования световых волн отражательными трехмерными голограммами. — «Оптика и спектроскопия», 1978, т. 44, вып. 2, с. 302—308.
- Локиши В. И., Орлов В. В. Получение голограмм транспарантов с избыточностью без зернистой структуры в изображении. «Оптика и спектроскопия», 1985, т. 58, вып. 4, с. 860—865.
- Любавская И. К., Серов О. Б., Смолович А. М. О влиянии поглощения запясы- вающих пучков на дифракционную эффективность толстослойных голограмм. — «ЖТФ», 1980, т. 6, вып. 1, с. 38—44.
- Машковцев А. Н., Дударева Л. Г. Импульсные лазеры для голографической кино- съемки. — «Труды НИКФИ», 1985, вып. 122.
- Милер М. Голография. Л., «Машиностроение», 1979.
- Озол А. О. Дифракционная эффективность тонких амплитудно-фазовых голо- грамм. — «Оптика и спектроскопия», 1977, т. 42, вып. 1, с. 168—174.
- Озол А. О., Августов П. А., Шварц К. К. Дифракционная эффективность тонких голограмм при наличии многократных внутренних отражений. — «Оптика и спектроскопия», 1978, т. 44, вып. 6, с. 1171—1179.
- Протас И. Р., Кракау Ю. А., Михайлова В. И. Фотографические пластинки ЛОИ-1 и ЛОИ-2 для регистрации голограмм. — В кн.: Регистрирующие среды для голо- графии. Л., «Наука», 1975, с. 41—43.
- Рябова Р. В., Любавская И. К., Баринова Е. С., Овечкина Т. Г., Серов О. Б. Фотопластинки ИАЭ для съемки голограмм во встречных пучках. Доклад на IV Всесоюзной конференции по голографии. Ереван, 1982.
- Серов О. Б., Любавская И. К., Широкова Н. М., Егорова С. Г. Синтез, исследова- ние и обработка высокоразрешающих материалов для голографирования во встречных пучках. — «Труды НИКФИ», 1976, вып. 82, с. 105—109.
- Серов О. Б., Смолович А. М., Соболев Г. А. Свойства трехмерных голограмм, полученных с использованием разбухания фотоэмульсионного слоя. — «Журнал технической физики», 1977, т. 47.
- Серов О. Б., Смолович А. М., Соболев Г. А. О тонких голограммах, зарегистри- рованных во встречных пучках. — «Письма в ЖТФ», 1978, т. 4, вып. 4, с. 231—235.
- Серов О. Б., Смолович А. М., Соболев Г. А. Снижение требований к разрешаю- щей способности фотоматериалов при получении отражательных голограмм. — «ЖНПФИК», 1979, т. 24, с. 47—48.
- Серов О. Б., Смолович А. М., Соболев Г. А. Общность свойств голограмм, за- регистрированных на сходящихся и встречных пучках. — В кн.: Оптическая го- логRAFIA. Л., «Наука», 1979, с. 122—128.

- Серов О. Б., Соболев Г. А. Запись цветных отражательных голограмм. — «Пись- ма в ЖТФ», 1980, т. 6, вып. 12, с. 729—732.
- Серов О. Б., Широкова Н. М., Любавская И. К., Смолович А. М., Машков- цев А. Н., Вишневская Г. А., Филиппук Н. Ю. Голографический экран для проекции цветных голографических киноизображений. — «Труды НИКФИ», 1985, вып. 122.
- Сидорович В. Г. Расчет дифракционной эффективности трехмерных фазовых го- лограмм. — «Оптика и спектроскопия», 1976, т. 41, с. 507—510.
- Сидорович В. Г. О дифракционной эффективности трехмерных фазовых голо- грамм. — «ЖТФ», 1976, т. 46, вып. 6, с. 1306—1310.
- Стаселько Д. И., Чураев А. Л. Метод расчета контраста изображений диффузно рассеивающих объектов, создаваемых толстослойными фазовыми пропус- кающими голограммами. — «ЖТФ», 1986, т. 56, вып. 2, с. 324—332.
- Устройство и эксплуатация лазеров. Санитарные нормы и правила. М., Мин- здрав СССР, 1982, вып. 2392, с. 81.
- Франсон М. Оптика спеклов. М., «Мир», 1980.
- “Agfa-Gevaert”. Technical Information. — “NDTF/Holography”.
- Alfjerness R. Analysis of optical propagation on thick holographic gratings. — “Appl. Physics”, 1975, v. 7, N 1, p. 29—33.
- Alfjerness R. Analysis of propagation at the second-order Bragg angle of thick holographic grating. — “JOSA”, 1976, v. 66, N 4, p. 353—362.
- Benton S. A. Hologram reconstruction with incoherent extender sources. — “JOSA”, 1969, v. 59, p. 1545.
- Burckhardt C. B. Diffraction of a plane wave at sinusoidally stratified dielectric grating. — “JOSA”, 1966, v. 56, N 11, p. 1502—1509.
- Cross L. Multiplex holograms. — “Proc. SPIE”, Seminar 3D imaging, 1977.
- Case S. K. Coupled-wave theory for multiply exposed thick holographic gratings. — “JOSA”, 1975, v. 65, N 6, p. 724—729.
- Denisjuk J. N. Perspektiven und Probleme der Holographischen Kinematographie. — “Bild und Ton”, 1974, 27, N 3, p. 71.
- “Eastman Kodak Co.”. — “Kodak Tech. Bits”, 1976, v. 4, p. 5.
- Gabor D. New microscopic principle. — “Nature” (London), 1948, v. 161, p. 777.
- Gabor D. — “US Patent” 3479111, 18.11.1969.
- Goodman J. W. Dependence of image speckle contrast on surface roughness. — “Opt. commun.”, 1975, v. 14, p. 324.
- Goodman J. W. Some fundamental properties of speckle. — “JOSA”, 1976, v. 66, N 11, p. 1145—1150. Statistical properties of laser speckle patterns. В кн.: Laser speckle and related phenomena, 1975, 10.
- Hains K. A., Brumm D. B. A technique for bandwidth reduction of holographic system. — “Proc. IEEE”, 1967, v. 55, p. 1520.
- Happe B. The most extensive UNITEC paper programme. — “The BKSTS Journal”, 1977, v. 59, N 1.
- John D. S. Three dimensional large screen move techniques employing holography and a cylindrical optical system. — “US Patent”, 1970, Jan., N 3625584.
- Leith E. N., Upatnieks J. Reconstructed waveform and communication theory. — “JOSA”, 1962, v. 52, p. 1123.
- Leith E. N., Brumm D. B., Hsiao S. S., H. Holographic cinematography. — “Appl. Opt.”, 1972, v. 11, p. 2016.

"Le technicien du film et de la vide", 1985, N 398, 15.07—15.09. Le premier film holographique.

Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram grating. "The Bell System Technical journal" 1969, v. 48, N 9, p. 2909.

Kaspar F. G. Diffraction by thick, periodically stratified gratings with complex dielectric constant.—"JOSA", 1973, v. 63, N 1, p. 37—45.

Kermisch D. Nonuniform sinusoidally modulated dielectric gratings.—"JOSA", 1969, v. 59, N 11, p. 1409—1414.

Kermisch D. Speckle reduction in holography by means of random spatial sampling.—"Appl. Opt.", 1974, v. 13, p. 1000.

Komar V. G. Progress on the holographic movie process in the USSR.—"Proceedings SPIE", 1977, v. 120, p. 127—144.

Komar V. G., Ioshin O. I. Motion picture and holography.—"SMPTE Journal", 1980, v. 89, N 12, p. 927—930.

Komar V. G. Die Perspektiven der Schaffung einer holographischen Kinematografie.—"Bild und Ton", 1981, N 6, S. 165—172.

Kozma A., Christensen C. R. Effect of speckle on resolution.—"JOSA", 1976, v. 66, p. 1257.

Kurtz R. L., Perry L. M. Real-time holographic motion picture camera capable of recording front surface detail from a random velocity vector. "Appl. Opt.", v. 12, 1973, 2815—2821.

McKechnie T. S. Reduction of speckle in an image by moving aperture.—"Opt. Commun.", 1975, v. 13, p. 29, 35.

Pennington K. S. CRC Handbook of lasers with selected data on optical technology.—"Chem. Rubber Co", 1971, p. 549.

Pole V. Method of making a hologram.—"US Patent", 1966, June, N 558871, p. 20.

Siebert D.—"Proc. IEEE", 1968, v. 56, p. 1242.

Smith H. M. Effect of emulsion thickness on the diffraction efficiency of amplitude holograms.—"JOSA", 1972, v. 62, N 6, p. 802—806.

Takai N. Statistics of dynamic speckles produced by moving diffuser under the gaussian beam laser illumination.—"Japan Journ. Appl. Phys.", 1974, v. 13, p. 2025.

Yamaguchi I., Komatsu S., Saito H. Dynamics of speckles produced by a moving object and its application.—"Japan Journ. Appl. Phys.", 1975, v. 14, p. 301.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аберрации 118, 128

Биологический эффект лазерного излучения 100

Вектор голограммной структуры 183
— электрического поля 176
Воспроизведение голографического изображения 16

Гиперсенситизация 67, 72
Глубина резкости изображения 112
Голограмма изобразительная 4
— квазисфокусированная 111
— квази-Фурье 111
— копия 28, 98
— монохромная 67
— мультиплексная 6
— оригинал 28, 98
— отражательная 5, 12, 14
— параметр «силы» 217
— пропускающая 14, 25
— радужная 6
— фазовая 14, 65, 193
— цветная 6, 25
— частичная 27

Голограммная структура 7, 11, 75, 186
— — сложная 7, 185
— — фазовая 13
— — элементарная 13, 187

Голографическая диапроекция 3
— интерференционная структура 175
177

— интерферограмма 174
— разрешающая способность 57
— оптика 127
— телевизионная система 152

Голографические диафильмы 9
Голографический барабан 6, 150
— неразрушающий контроль 174
— объектив 128
— портрет 6, 97
— стол 89

Голографическое световое поле 11, 28
«Голотейп» 7

Градационная характеристика 58

Диафрагма точечная 92, 97

— изготовление 93

Дифракционная эффективность 21, 25, 57

— решетка голографическая 11, 13

Длина волны света при получении голограммы 14, 17
— когерентности излучения 36

Задубливание термическое 74, 78
— химическое 79

Закон взаимозаместимости 61
Зрительная зона 111, 135, 138

Изображение голографическое 3, 18
— — многолучевое 6, 31, 111, 152
— — монохромное 6, 25, 113
— — ортоскопическое 29
— — псевдоскопическое 18, 29
— растровое 6, 33, 119
— растрово-голографическое 267
— стереоскопическое 6, 31, 140
— — трехмерное 8
— — цветное 111, 113

Интермодуляция 186, 188

Интерференционная голографическая структура 176, 183
— картина 12, 181

Интерференция света в слое 12, 186
Интерферометрия 68
— голографическая 172
— — двухимпульсная 173

— — с усреднением во времени 174
Иттрий-алюминиевый гранат 44

Комплексный вектор амплитуды электрического поля 176, 186, 191

Контраст голографического изображения 243

— пятистой структуры 234

Координаты цветности 247

Копирование голограмм 28, 68, 98, 118

— голографических фильмов 170

Коэффициент изменения толщины слоя 182

— модуляции интерференционной структуры 176, 180

— самовоздействия пучков 217

— связи световых волн 199

Критерий геометрических искажений 260

— качества изображения 221

— — — обобщенный 221

— контраста изображения 244

— пятистой структуры изображения 231, 242

— резкости изображения 221, 222

- слитности изображения 227
- цветопередачи 221, 249
- Критическая пространственная частота 269
- — сквозного кинематографического процесса 270
- Критическая толщина слоя голограммы 22
- Кроссмодуляция 186

- Лазер 5, 153
 - газовый 36, 37
 - на гранате 36, 47, 153
 - импульсный 35, 44
 - ионный 42
 - непрерывного действия 35, 86
 - на красителях 36, 49
 - на неодимовом стекле 36
 - на парах металлов 48
 - на рубине 36, 46, 47, 153
- Лампа газоразрядная 53
 - галогенная 55
 - ксеноновая 54
 - накаливания 55
 - накачки 47
 - ртутная 53, 54, 55, 108
 - ртутно-кадмиевая 54, 55
 - тело свечения 53, 108
 - циркониевая 55
- Линзовый растр 127
 - линейный 142
 - мелкоструктурный 269
 - перспективный 141
- Ложное изображение 231

- Максимальный контраст изображения 85
- Масштабные искажения 86
- Метод больших цилиндрических линз 7, 147
 - большого зеркала 146
 - большой сферической линзы 7, 145
 - голографического экрана с зональным фокусированием 7, 147
 - большого числа зеркал 7, 151
 - светорассеивающей пластинки 7, 144
 - с движением по эллипсу 7, 150
 - фронт-проекции 120
- Многоракурсное изображение 32
- Многообъективная съемка 117, 149
- Многоракурсная стереоскопия 9
- Мода голограммы 212
 - лазерного излучения 35
- Модовая теория дифракции 7, 212
- Модулятор добротности активный 45
 - — пассивный 45
 - — электрооптический 46
- Мультипликационный фильм 4, 162

- Наклон полос голограммной структуры 200

- Обработка голографических фотоматериалов 65, 76
- Обратный рельеф 29
- Обращение изображения 29
- Объектная волна 11, 176, 186
 - слагающая экспозиции 189
 - — элементарная 186
- Объектив с широким зрачком 110
- Объектный луч 11, 13
- Опорная волна 11, 176
 - слагающая экспозиции 189
- Опорный луч 13
- Оптическое преобразование Фурье 130
 - — — блок 130
- Отбеливание 68, 74
- Отношение сигнал/шум 25, 57, 61

- Переменная слагающая интенсивности света 176, 185
- Период голограммной структуры 181
- Поляризация света круговая 178
 - — линейная 178, 196
 - — эллиптическая 178
- Порядок дифракции 194
- Проекционная голография 9
- Пространственная частота 56
 - — пятнистой структуры 236
- Пучок света восстанавливающий 11
 - — восстановленный 16
 - — дифрагированный 16
 - — объектный 120
 - — — элементарный 187
 - — опорный 12

- Разрешающая способность 8
- Ракурс изображения 110
 - — вертикальный 111, 122
 - — горизонтальный 112, 122
- Растровая съемка 6
- Растровая пластинка 111
- Регистрирующие среды 56
 - — галогенидосеребряные 56, 59
 - — на бихромированной желатине 56, 76
- Режим работы лазера
 - — — импульсный 35, 45
 - — — модулированной добротности 45, 172
 - — — непрерывный 35
 - — — одномодовый 35
 - — — одночастотный 35
 - — — свободной генерации 45, 172
- Резонатор лазера 37, 154

- Световая копия объекта 11, 18
- Световое поле 11, 28, 175, 213
- Световод гибкий 127
- Селективность голограммы спектральная 7, 23, 111, 209
 - — — угловая 7, 23, 111, 209
- Сенсибилизация 88
- Спекл-структура 169
- Средняя квадратическая флуктуация яркости 231
- Сушка голографических фотоматериалов 73

- Толщина слоя голограммы 21, 59, 74
 - — — критическая 21
 - — — стабильность 59

- Угол Брюстера 37, 99, 154
 - направления восстанавливающего луча 17
 - — — дифрагированного луча 17
 - между опорным и объектным лучами 14, 181
 - наклона интерференционных полос 181
 - — — полос голограммной структуры 182, 200
 - падения восстанавливающего луча 201
 - — — объектного луча 14
 - — — опорного луча 14
- Усадка слоя 59, 75, 182
- Условие Брэгга 23

- Фоновая освещенность роговицы глаза 100

- Фосфатное стекло 44
- Фотоматериал цветной 81

- Характеристическая дифракционная кривая 58, 64, 243
- Художественная голография 9

- Частотно-контрастная характеристика 216
- Чувствительность 57
 - голографическая 58
 - спектральная 61

- Шум голографического изображения 243

- Щелевая оптика 10
- Щелевой метод 6
 - объектив 132

- Экран голографический 4, 8, 132, 167
 - зеркальный 138
 - зеркально-растровый 140, 143
 - линзо-растровый 140
 - — — линейно-фокусирующий 141
 - — — точно-фокусирующий 8, 36
 - отражательный 133
 - просветный 133, 140
 - — — перспективный 141
 - с зональным фокусированием 147
 - — — фокусирующий множительный 4, 8, 111, 135
- Эллипс поляризации света 176
- Эталон Фабри-Перо 38

Предисловие	3
Введение	5
Часть I. ОСНОВЫ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИИ И ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КИНЕМАТОГРАФА	11
Глава I. 1. ПРИНЦИПЫ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ ГОЛОГРАФИИ	11
I.1.1. Получение изобразительной голограммы	12
I.1.2. Воспроизведение голографического изображения	16
I.1.3. Влияние отклонений направления восстанавливающих лучей и длины волны света	19
I.1.4. Влияние толщины слоя регистрирующей среды	21
I.1.5. Цветные голограммы	25
I.1.6. Копирование голограмм	28
I.1.7. Перевод многокурсовых стереоскопических изображений в голографические	31
Глава I. 2. ИСТОЧНИКИ СВЕТА	35
I.2.1. Гелий-неоновые лазеры	37
I.2.2. Криптоновые и аргоновые ионные лазеры	42
I.2.3. Импульсные твердотельные лазеры	44
I.2.4. Лазеры на парах металлов	48
I.2.5. Лазеры на красителях	49
I.2.6. Лампы для воспроизведения голографического изображения	53
Глава I. 3. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ СРЕДЫ	56
I.3.1. Высокора разрешающие галогенидосеребряные фотоматериалы	59
I.3.2. Обработка галогенидосеребряных фотоматериалов	65
I.3.3. Фотоматериалы на бихромированной желатине и их обработка	76
I.3.4. Перспективы создания новых фотоматериалов для изобразительной голографии и голографического кинематографа	80

	I.3.5. Методы и приборы для определения характеристик голографических фотоматериалов	81
Глава I.	4. ТЕХНИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ДЕМОНСТРИРОВАНИЯ ИЗОБРАЗИТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ	86
	I.4.1. Особенности техники получения голограмм с лазерами непрерывного действия	86
	I.4.2. Особенности техники получения голограмм с импульсными лазерами	96
	I.4.3. Особенности техники копирования изобразительных голограмм	98
	I.4.4. Техника безопасности при изготовлении голограмм	99
	I.4.5. Техника воспроизведения голографических изображений	105
Глава I.	5. ПРИНЦИПЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КИНЕМАТОГРАФА	110
	I.5.1. Съемка голографических фильмов	113
	I.5.2. Копирование голографических фильмов и перевод многокурсовых киноизображений в голографические	118
	I.5.3. Проекция голографических кинофильмов	121
	I.5.4. Проекция статических голографических изображений	123
	I.5.5. Прямой и обратный перевод обычных двухмерных киноизображений в голографические	124
Глава I.	6. ОПТИКА	127
	I.6.1. Объективы	127
	I.6.2. Блоки оптического преобразования Фурье	130
	I.6.3. Голографические экраны	132
	I.6.4. Зеркальные и растровые экраны	138
Глава I.	7. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО КИНЕМАТОГРАФА	144
	I.7.1. Краткий исторический обзор работ по созданию голографического кинематографа и голографического телевидения	144
	I.7.2. Экспериментальные работы НИКФИ по созданию голографического кинематографа	153
	I.7.3. Интерференционные измерительные киноголографические системы	172
Часть II.	ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ В ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	175
Глава II.	1. ГОЛОГРАММНАЯ СТРУКТУРА	175
	II.1.1. Простейшая голограммная структура, образованная двумя плоскими световыми волнами	175

	II.1.2. Сложная голограммная структура, образованная множеством объектных волн	185
Глава II.	2. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ГОЛОГРАММНЫХ СТРУКТУРАХ	191
	II.2.1. Дифракция света на двухмерной голограмме	191
	II.2.2. Дифракция света основного порядка на трехмерных голограммах с простой голограммной структурой	196
	II.2.3. Дифракция света первых и вторых порядков на трехмерных голограммах . .	209
	II.2.4. Дифракция света на трехмерных голограммах со сложной голограммной структурой, образованной множеством объектных волн	211
Глава II.	3. ОСОБЕННОСТИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕГО СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	220
	II.3.1. Особенности голографического изображения	220
	II.3.2. Резкость изображения	222
	II.3.3. Слитность изображения	226
	II.3.4. Пятнистая структура изображения	231
Глава II.	4. ЯРКОСТНЫЕ И ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ	243
	II.4.1. Контраст изображения	243
	II.4.2. Цветопередача изображения . .	246
	II.4.3. Яркость изображения	253
Глава II.	5. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ .	258
	II.5.1. Искажения формы изображения .	258
	II.5.2. Устойчивость изображения	265
	II.5.3. Особенности растрово-голографического изображения	267
	Заключение	274
Литература		276
Предметный указатель		281

Комар В. Г., Серов О. Б.
 К 63 Изобразительная голография и голографический кинематограф. — М.: Искусство, 1987.—286 с., ил., 8 л. ил.

Книга знакомит с современным состоянием и тенденциями развития изобразительной голографии, а также с перспективами создания голографического кинематографа. Она состоит из двух частей. В первой — рассматриваются принципы построения голографических систем и даются их схемные решения. Во второй — анализируется процесс образования и воспроизведения голограмм.

Для специалистов — научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами голографии и современного кинематографа.

К 4911010000—065
 025(01)—87 159—86

ББК 37.95