

М. Н. БАШКАТОВ И
Ю. Ф. ОГОРОДНИКОВ



КОЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ

АКАДЕМИЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАУК РСФСР

ИНСТИТУТ МЕТОДОВ ОБУЧЕНИЯ

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ

М. Н. БАШКАТОВ и Ю. Ф. ОГОРОДНИКОВ

ШКОЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧИТЕЛЕЙ

Под редакцией

Л. И. РЕЗНИКОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО

АКАДЕМИИ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАУК РСФСР

МОСКВА 1960



Scan AAW

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	3
1. Оборудование по теме «Волновые свойства света»	4
2. Методика наблюдений интерференции и дифракции света с помощью лупы	12
Интерференция света	15
3. Опыт Юнга	—
4. Цвет и длина волны	22
5. Определение длины световой волны в воздухе	25
6. Определение длины световой волны в стекле и в воде	31
7. Опыт Френеля (с зеркалами)	35
8. Интерференция света в тонком воздушном клине	42
9. Интерференция в отраженном и проходящем свете	50
10. Кольца Ньютона	51
11. Полосы интерференции в спектре	56
Дифракция света	60
12. Дифракция света от прямого края широкого экрана	—
13. Дифракция от различных узких экранов	61
14. Дифракция от малых круглых экранов	62
15. Дифракция от узких щелей с параллельными краями	63
16. Дифракция от клиновидной щели	65
17. Дифракция от малых круглых отверстий	—
18. Дифракция от квадрата и сетки	67
19. Наблюдение спектров с помощью отражательной дифракционной решетки	69
Поляризация света	70
20. Поперечность световых колебаний	—
Дисперсия света	72
21. Непрерывный спектр	—
22. Линейчатые спектры	—
23. Спектр Солнца	74
24. Спектры Солнца и натрия	75
Приложение: Фотографирование дифракционных и интерференционных картин	77
Литература	89
Таблицы фотографий (на вклейке)	

ВВЕДЕНИЕ

При изучении волновой оптики в средней школе физический эксперимент занимает небольшое место, вследствие этого и знания учащихся по этому разделу физики поверхностны. Мы поставили перед собой задачу разработать демонстрационный и лабораторный эксперимент по волновой оптике, по возможности легко осуществимый в средней школе и опирающийся на уже имеющееся в школах оборудование физических кабинетов, с привлечением лишь несложных самодельных приборов. Эта задача решалась нами в течение нескольких лет. В данном пособии излагаются результаты проведенной работы — дано описание демонстрационных опытов и лабораторных работ, большинство из которых за последние три года неоднократно включалось в физический практикум на семинарах и летних курсах при Орловском институте усовершенствования учителей.

Ниже приводится перечень опытов, которые рекомендуется поставить при различных формах работы с учащимися.

Демонстрационные опыты: опыт Юнга*, определение длины световой волны (1-й способ), интерференция света в тонком воздушном клине, интерференция в отраженном и проходящем свете, кольца Ньютона (в новой постановке), поперечность световых колебаний, непрерывный спектр.

Фронтальные лабораторные работы: опыт Юнга**, определение длины световой волны (2-й способ), опыт с зеркалами Френеля, полосы интерференции в спектре, дифракция света, линейчатые спектры, спектр Солнца.

* Второй вариант

** Первый вариант

Наблюдения в классе (при наличии 3—4 установок): цвет и длина волны, спектры Солнца и натрия.

Физический практикум: определение длины световой волны в стекле и в воде.

Домашние опыты и наблюдения: опыт Юнга (1-й вариант), определение длины световой волны (3-й способ), опыты по дифракции света.

Описанию демонстраций и лабораторных работ можно предпослать следующие замечания.

Так как изучение интерференции и дифракции света предполагает наличие у учащихся хотя бы элементарных представлений о дисперсии света, целесообразно еще до прохождения темы «Волновые свойства света», например, после рассмотрения хода луча через призму сообщить учащимся начальные сведения о дисперсии.

При изучении интерференции света в качестве основного опыта мы предлагаем опыт Юнга, несмотря на то, что здесь интерференция связана с явлением дифракции. Этот опыт прост по идее, весьма нагляден, легко осуществим, дает возможность уже на втором уроке провести работу по измерению длины световой волны, наконец, экспериментально обосновать некоторые положения волновой оптики, обычно сообщаемые догматически.

Несмотря на то, что вопрос о поляризации света в школьную программу по физике не включен, нам думается, целесообразно поставить хотя бы один опыт для доказательства того, что световые колебания поперечны.

В практике преподавания нет необходимости ставить все предлагаемые нами демонстрационные опыты и лабораторные работы.

Учителю предоставляется широкая возможность выбора или замены одной работы другой.

1. ОБОРУДОВАНИЕ ПО ТЕМЕ «ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА»

В дополнение к имеющимся в каждой средней школе приборам нужно приобрести только измерительную лупу и изготовить двойные щели Юнга, зеркала Френеля, наборы узких и малых круглых экранов, экраны

с узкими щелями и малыми круглыми отверстиями и некоторые приспособления (об их изготовлении сказано при описании соответствующих опытов).

Для большинства экспериментов необходимы специальные штативы. Каждый из них состоит из вертикальной стойки и подставки. В качестве стойки используется обыкновенная масштабная линейка длиной 20 или 25 см. Подставку можно сделать из дерева (рис. 1, а). Ее размер соответственно $7 \times 7 \times 2$ см или $8 \times 8 \times 2$ см. Стойка и подставка скрепляются сделанным из жести хомутиком с лапками (рис. 1, б). Хомутик плотно охватывает нижний конец стойки. Отходящие в противоположные стороны лапки хомутика маленькими гвоздиками прибивают к подставке. Пунктиром указаны линии изгиба жести. Подставку с хомутиком можно сделать из кровельного железа. Такая подставка и выкройка из железа представлены на рис. 1, в, г.

К штативам изготавливаются держатели для различных приборов. Особые держатели нужны для двойных щелей Юнга и приборов по дифракции света (рис. 2), для линзы (рис. 3), зеркал Френеля, трапециевидной стеклянной пластинки (рис. 4), измерительной лупы (рис. 5) и спектроסקопа прямого зрения (рис. 6). Все держатели сзади имеют муфту, которая охватывает стойку штатива. Вместе с держателем и прибором она легко перемещается вдоль стойки и удерживается на месте благодаря трению.

Для опытов по интерференции и дифракции света требуется точечный или линейный источник света (узкая ярко освещенная щель). Доступным для всех школ и пригодным для выполнения опытов источником света является лампочка от карманного фонарика. При известной ориентации ее нити накала относительно приборов и наблюдателя она может служить и точечным и линейным источником света. Так, например, в опытах по интерференции нить накала лампочки устанавливается параллельно двойной щели Юнга или общему ребру двух зеркал Френеля; в этом случае она служит линейным источником света. Если же нить расположена по лучу зрения так, что к наблюдателю обращен один из ее концов, то тогда лампочка используется как точечный источник света. Это требуется для большинства работ по дифракции.

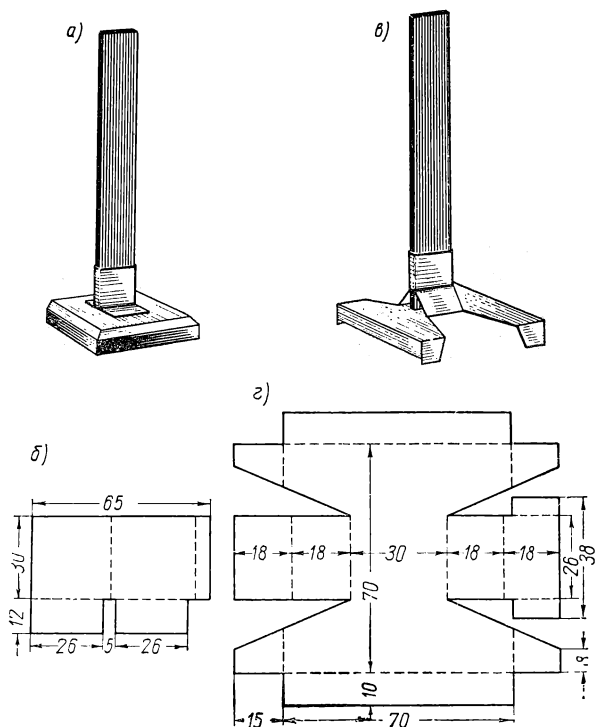


Рис. 1. Самодельные штативы для опытов по оптике: а, в — общий вид штативов; б — фигура из жести для изготовления хомутика; г — выкройка из железа для изготовления подставки

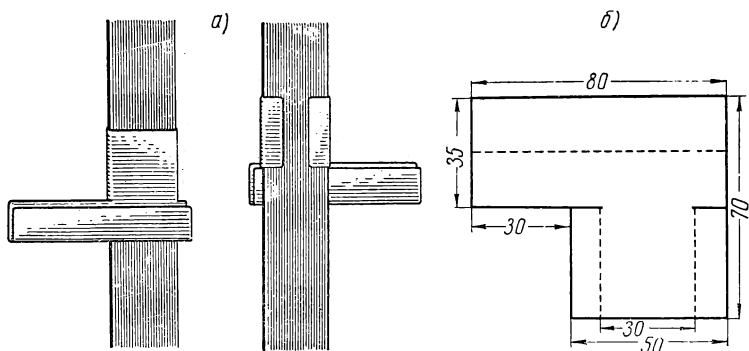


Рис. 2. Держатель к штативу для опытов по дифракции света: а — общий вид; б — выкройка из жести

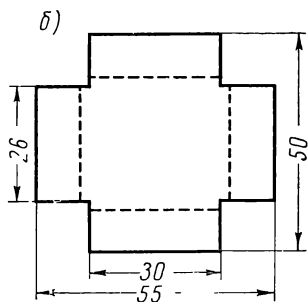
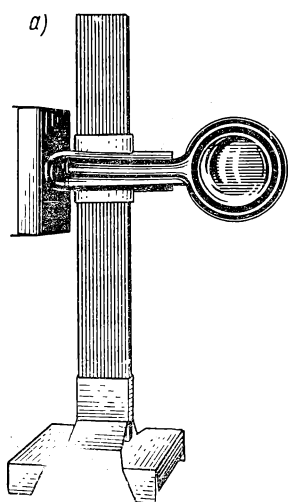


Рис. 3. Крепление линзы на штативе: *а* — общий вид; *б* — выкройка из жести для держателя

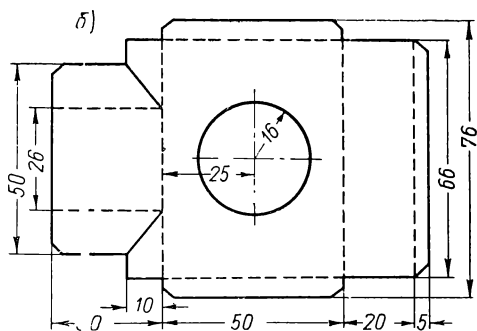
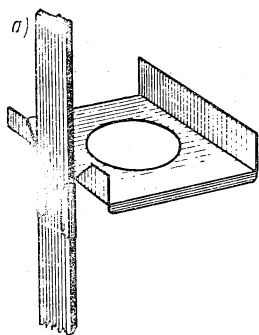


Рис. 4. Держатель для зеркал Френеля и стеклянной пластинки: *а* — общий вид; *б* — выкройка из жести для изготовления держателя

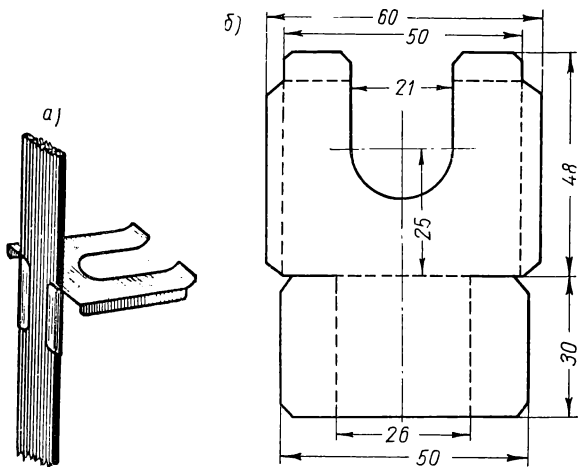


Рис. 5. Держатель для установки в штативе измерительной лупы:
а — общий вид; *б* — выкройка из жести для изготовления держателя

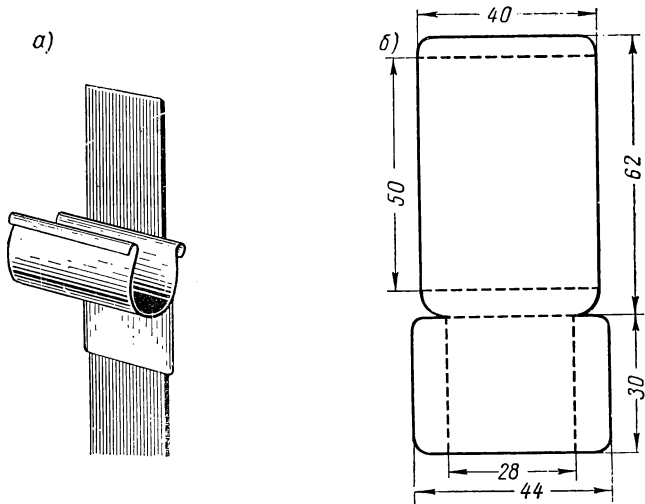


Рис. 6. Желобок для установки спектроסקопа прямого зрения в штативе (*а*) и выкройка из жести для желобка (*б*)

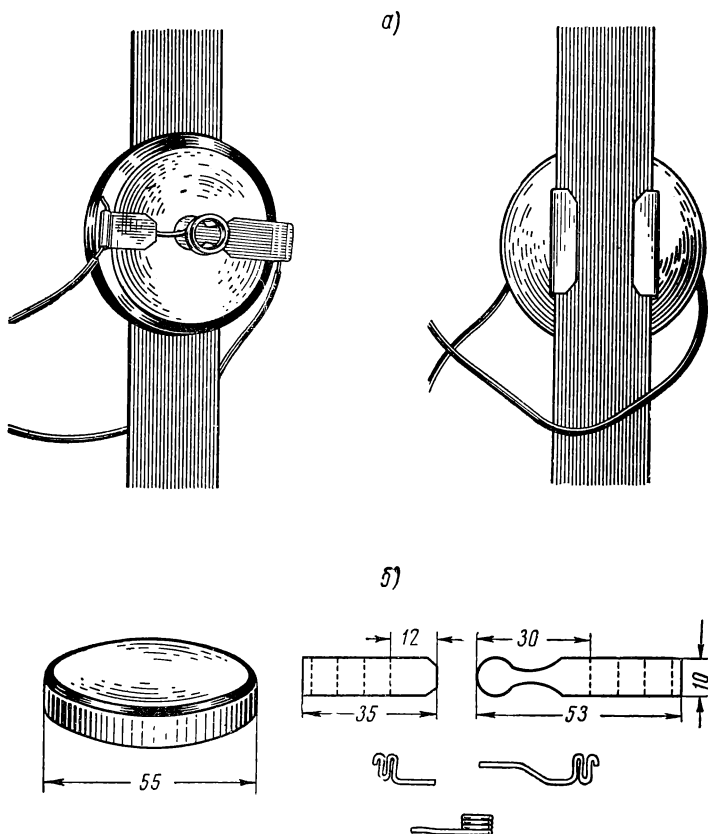


Рис. 7. Установка в штативе подрозетника с патроном для лампочки от карманного фонарика (а) и детали к установке (б)

Для лампочки от карманного фонарика нужно сделать патрон с муфтой, чтобы ее можно было перемещать вдоль штатива (рис. 7). Патрон монтируется на малом подрозетнике (для радио); к нему, сзади, прибивается муфта, охватывающая стойку штатива. Благодаря гибкости подпятника патрона включенную лампочку можно поворачивать в патроне, не вызывая ее выключения, и устанавливать нить накала горизонтально или вертикально.

Точечный источник света можно получить из одноточечной лампочки, например на 6 в, 5 вт. Для этого на нее нужно надеть сделанную из черной бумаги трубочку, в которой посередине ее высоты кругом прорезана узкая щель (шириной около 0,4 мм) с тремя перемычками (шириной 5 мм), чтобы трубочка не распалась на части. Окруженная таким экраном лампочка, будучи установлена на возвышении в середине физического кабинета, была использована в качестве точечного источника света одновременно для звеньев всего класса при фронтальном проведении опытов по оптике.

Некоторые авторы¹ указывают, что точечный источник света можно получить из аллоскопа, надев на его объектив светонепроницаемый колпак с малым круглым отверстием, сделанным тонкой иглой. Для домашних экспериментов в качестве точечного источника света можно использовать уличный фонарь, находящийся на расстоянии 100—150 м от наблюдателя.

Линейным источником света может служить щель в экране, пропускающая рассеянный свет от небосвода или от матовой лампы.

Для опытов и наблюдений учащимся нужно подготовить 25—30 малых и 2—3 больших экрана. Малый экран размером 8×10 см изготавливается из картона или плотной непросвечивающей бумаги. Посередине прорезывается щель высотой 4 см и шириной около 0,5 мм. Большой экран, который в процессе работы подвешивается против окна, должен быть шире окна, чтобы не пропускать света с боков. Высота его достаточна в 60 см. Среднюю часть экрана, где должна быть вертикальная щель высотой 20 см и шириной 0,5 мм, лучше сделать из фанеры или из плотного картона, а справа и слева к ней

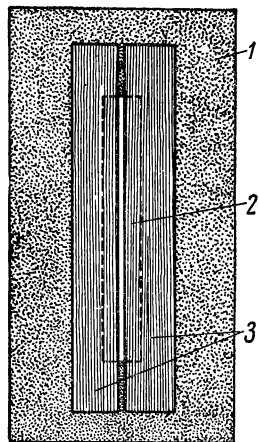


Рис. 8. Экран с узкой щелью.

1—лист картона; 2—щель в нем; 3—линейки

прикрепить плотную, не пропускающую свет бумагу (можно склеенную многослойно). Очень важно, чтобы края

¹ Журн. «Физика в школе», 1948, № 6, стр. 50—53.

узкой щели были ровные. С этой целью в фанере следует вырезать щель высотой 20 см и шириной 1 см, на нее симметрично наложить две масштабные линейки с ровными краями длиной 25 см, отодвинуть их друг от друга на 0,5 мм и маленькими гвоздиками прибить линейки к фанере (рис. 8).

Узкая щель экрана должна размещаться против оконного стекла, через которое свет от небосвода проходит в класс.

Для целого ряда опытов требуются спектральные аппараты. Из тех, что имеются в школах (призмы флинт и прямого зрения, спектроскоп прямого зрения), наиболее пригоден и доступен спектроскоп. Призмы прямого зрения, необходимые, например, для фронтального наблюдения линейчатых спектров, легко получить из спектроскопов прямого зрения. Для этого от него нужно отвинтить две розетки (окулярную и с постоянной щелью), вывинтить фокусирующий винт и удалить из тубуса диафрагму с вмонтированной в нее линзой. Все эти детали во избежание утери следует завернуть в бумагу и уложить в футляр спектроскопа. От спектроскопа остается призма прямого зрения в тубусе.

При отсутствии спектроскопов или недостаточном их количестве в качестве спектрального аппарата можно использовать трапецевидную стеклянную пластинку, которая применяется для работ по геометрической оптике (преломление света, ход луча через призму и через плоскопараллельную пластинку, определение показателя преломления). В этой пластинке используется преломляющий угол в 75° , образованный ее двумя непараллельными гранями.

Линейная дисперсия и разрешающая способность пластинки уступают призмам прямого зрения и призмам флинт. Однако будет совсем неплохо, если при отсутствии других возможностей с ее помощью учащиеся увидят около десяти фраунгоферовых линий в солнечном спектре, около 14 полос в сине-фиолетовой части спектра азота и т. д.

Для облегчения наводки трапецевидной стеклянной пластинки на источник света нужно на листе картона нарисовать контур пластинки и ход луча через нее при наименьшем его отклонении (рис. 9).

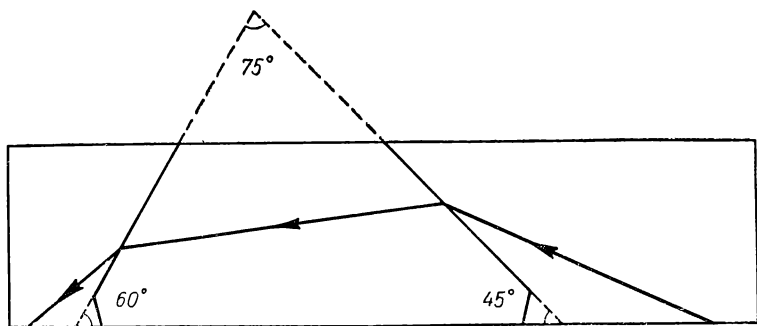


Рис. 9. Ход луча через трапецевидную пластинку

2. МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ И ДИФРАКЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ЛУПЫ

В целом ряде опытов требуется производить наблюдения с помощью лупы. Методика таких наблюдений разработана и описана одним из основоположников волновой теории света французским ученым Огюстеном-Жаном Френелем¹.

Желая лучше и подробнее рассмотреть дифракционные полосы на границе света и тени, отбрасываемой телом, вместо белого картона Френель применил матовое стекло (просвечивающий экран), а дифракционные полосы, получавшиеся на нем, наблюдал с помощью лупы, на просвет. Как-то во время наблюдения он перевел глаз, вооруженный лупой, за пределы матового стекла и с удивлением заметил, что продолжает видеть дифракционные полосы и к тому же значительно яснее. При этом полосы, оказалось, были совершенно сходны с теми, которые наблюдались на матовом стекле. Таким образом выяснилось, что при наблюдении с помощью лупы нет необходимости в экране.

Нужно лишь поместить лупу позади тела, отбрасывающего тень, и смотреть через нее на светящуюся точку.

¹ Френель, О свете, Госиздат, М.—Л., 1928, стр. 17—20.

При наблюдении в телескоп небесного объекта через окуляр, играющий роль лупы, мы видим изображение, образуемое пучками света, прошедшими через объектив. Точно так же в явлениях дифракции и интерференции мы видим в лупу картину, образуемую световыми пучками, идущими к лупе позади тела, дающего тень, или от двойной щели, зеркал Френеля и т. п.

Когда мы наблюдаем в лупу, глаз аккомодируется на бесконечность¹. В этих случаях на сетчатке получается отчетливое изображение тех точек, испускающих или отражающих свет, которые находятся в фокальной плоскости лупы. В самом деле, свет от каждой такой точки после преломления в лупе попадает в глаз параллельным пучком, а глаз сводит пучок на сетчатку. Таким образом, картина, наблюдаемая в лупу, находится в ее фокальной плоскости. Где же следует располагать лупу относительно глаза, чтобы было видно все поле зрения лупы? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно рассмотреть изменение ширины светового пучка по выходе его из лупы. От светящейся точки (рис. 10) на

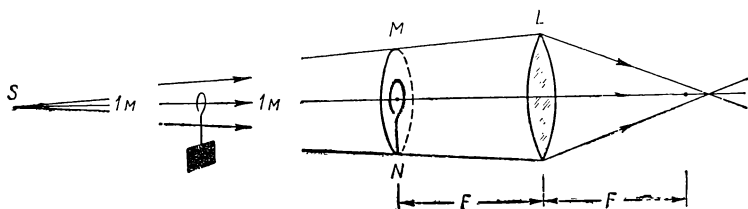


Рис 10. К вопросу о рассмотрении дифракционных и интерференционных картин при помощи лупы

лупу падает расходящийся пучок света (MN — сечение этого пучка фокальной плоскостью лупы), а из нее после преломления выходит сходящийся пучок, который затем переходит в расходящийся. Чтобы видеть все сечение MN , в котором находится наблюдаемая картина дифракции или интерференции, нужно лупу расположить на таком расстоянии от глаза, чтобы выходящий из нее пучок света в своем наиболее узком месте проходил через зрачок. Для этого, как видно из рисунка, лупу надо поместить от глаза на расстоянии, немного пре-

¹ Л. И. Резников, Глаз как составная часть оптических инструментов, журн. «Физика в школе», 1946, № 3, стр. 79—90.

вышающем фокусное. Тогда вся лупа будет казаться равномерно и ярко освещенной. Имеющиеся в школах лабораторные линзы с фокусным расстоянием $F=7\text{ см}$ (будем их называть линзами 1) нужно помещать от глаза на расстоянии около 8 см, а линзы с фокусным расстоянием 14 см (линзы 2)—на расстоянии около 16 см. Линза 1 дает большее увеличение и более устойчивую картину, чем линза 2. При использовании последней достаточно небольшого смещения глаза относительно линзы, чтобы наблюдаемая картина исчезла из поля зрения.

Для того чтобы быстро найти нужное положение лупы относительно глаза, нужно смотреть через нее на светящуюся точку, поместив лупу от глаза на расстоянии, заведомо превышающем фокусное, и затем приближать ее к глазу. При этом видимый на темном фоне светлый кружок с красноватой каймой увеличивается в размерах, пока не заполнит все поле зрения лупы, которое все станет ярко и равномерно освещенным. В этот момент и следует остановить лупу.

В тех случаях, когда в ходе работы приходится перемещать лупу, нужно соответственным образом перемещать и глаз, чтобы сохранялось неизменным оптимальное для наблюдения расстояние между глазом и лупой.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

3. ОПЫТ ЮНГА

Если свет распространяется при помощи волн, то в известных условиях должны наблюдаться явления дифракции и интерференции. Если бы удалось создать эти условия и наблюдать загибание света в область тени и усиление и ослабление света при наложении друг на друга двух световых пучков, то спор между сторонниками волновой и корпускулярной теорий был бы решен в пользу первой, так как с точки зрения корпускулярной теории эти явления объяснить невозможно.

В 1802 г. английский ученый Томас Юнг осуществил свой классический опыт, который, если и не решил окончательно спора, все же значительно усилил позиции сторонников одной из двух теорий — волновой¹.

Юнг, задумав произвести опыт, так расставил три экрана, чтобы солнечный свет, прошедший через малое отверстие в одном экране, на дальнейшем пути прошел через два очень близких друг от друга малых отверстия во втором экране и упал на третий. Если справедлива корпускулярная теория, то на последнем экране должны быть два светлых пятна. Но Юнг, будучи убежденным сторонником волновой теории, ожидал увидеть другую картину. Согласно этой теории, от отверстий второго экрана должны распространяться расходящиеся пучки света, которые, налагаясь друг на друга, должны интерферировать, в результате чего на экране будет видна система из чередующихся светлых и темных полос.

¹ Интересные сведения о почти трехвековой дискуссии о природе света, в ходе которой менялись некоторые основные положения волновой теории, можно почерпнуть из книги: П. С. Кудрявцев, История физики, т. I, Учпедгиз, 1956.

Первый вариант

Визуальное наблюдение явления интерференции света (лабораторная работа)

Оборудование: набор двойных щелей Юнга, большой экран с вертикальной щелью высотой 20 см и шириной 0,5 мм, малый экран со щелью высотой 4 см и шириной 0,5 мм, матовая электрическая лампа.

Для изготовления двойных щелей Юнга необходимо иметь небольшие стеклянные пластинки. Из старых негативов (6×9 см или 9×12 см) следует нарезать пластинки размером $4,5 \times 6$ см. Желатин надо удалить.

Одну сторону пластинки следует кисточкой покрыть тушью (лучше морозоустойчивой). Наклонив пластинку, дают стечь избытку туши на кисточку, а затем ее кладут на какую-нибудь горизонтальную поверхность.

Когда тушь высохнет, в ней прорезают несколько двойных щелей Юнга одним из следующих способов:

1-й способ. На поверхность стеклянной пластинки, покрытую тушью, накладывают металлическую масштабную линейку параллельно короткой стороне пластинки и, проводя вдоль края линейки острием лезвия безопасной бритвы (рис. 11), прорезают в туши одну щель, а затем, изменив наклон лезвия, — другую щель;

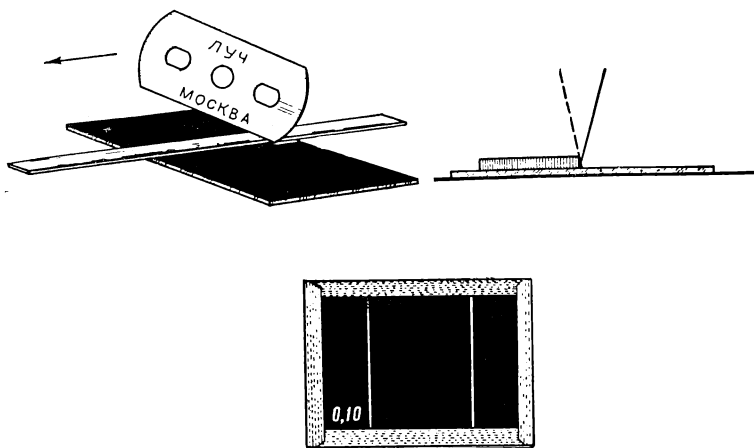


Рис. 11. Изготовление двойных щелей в экране

2-й способ. Прорезав одну щель, как указано выше, немного смещают линейку параллельно ее первоначальному положению и прорезают другую щель;

3-й способ. Остриями сложенных вместе двух лезвий безопасной бритвы, зажатых между большим и указательным пальцами правой руки, проводят вдоль края металлической линейки и прорезают в слое туши сразу две щели.

На каждой стеклянной пластинке нужно прорезать 6—8 двойных щелей Юнга на расстоянии 5—6 мм друг от друга.

Щели надо испытать и пригодные оставить, а неудовлетворительные — уничтожить, замазав их тушью. На каждой пластинке должно остаться не меньше двух двойных щелей с различными расстояниями между их серединами. Для проверки двойных щелей используются малые экраны с узкой щелью.

Испытание проводится следующим образом: надо сесть против окна, где свет от небосвода не загораживается деревьями; в вытянутой левой руке нужно держать экран против окна, чтобы свет через щель в нем попадал в глаз. Держа пластинку с двойными щелями правой рукой, поместить ее перед глазом и по очереди смотреть через каждую двойную щель на щель в экране. Щели в двух экранах должны быть параллельны.

Если будут видны пять, семь или большее число светлых полос интерференции, отделенных друг от друга темными полосами, то такие двойные щели можно считать удовлетворительными. Исследование этих щелей под микроскопом показывает, что перегородка между ними в два, три или большее число раз шире каждой щели. Непригодными нужно считать такие пластинки, когда видны только три светлых полосы (в этом случае перегородка между щелями равна ширине каждой щели) или видна одна широкая центральная светлая полоса, а по бокам узкие и не такие светлые (когда вместо двух щелей получилась одна).

Пластинку со щелями нужно покрыть другой стеклянной пластинкой такого же размера и окантовать, как диапозитивы.

Если проверка пластинок производится вечером, то можно воспользоваться светом от матовой электрической лампы. Однако для проведения лабораторных ра-

бот свет от небосвода предпочтительнее, так как в этом случае интерференционные полосы получаются почти ахроматические, хотя и менее яркие.

Ход работы. После раздачи учащимся двойных щелей и малых экранов и установки перед окнами двух-трех больших экранов с узкими щелями учитель рассказывает, как производить наблюдение.

Нужно сесть лицом к окну и держать двойную щель около глаза, смотреть через нее на щель в большом экране, повешенном против окна, или в малом экране, который нужно держать в вытянутой руке.

Вместо двух светлых полос, согласно законам геометрической оптики, видно их много (5, 7 и больше), но обязательно нечетное число. Между светлыми полосами имеется четное число темных промежутков. Можно заметить, что светлые полосы имеют одинаковую ширину, что самая яркая из них — средняя, а у боковых полос освещенность постепенно, без резких скачков убывает (рис. 12).

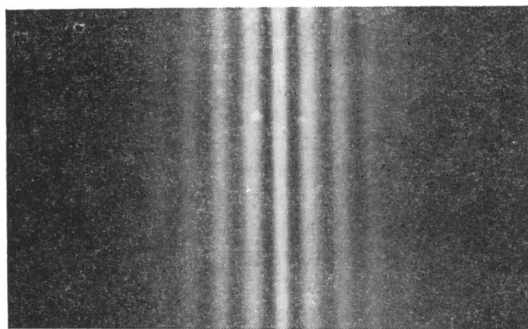


Рис. 12. Картина интерференции света, наблюдаемая с помощью двойной щели Юнга.

Условия съемки:

пленка ФЭД, изопанхром, чувствит. 90 ед. ГОСТ, фотоаппарат «Зенит» без объектива, выдержка 15 сек. Расстояние от фотоаппарата до двойной щели 0,4 м, а от последней до лампочки карманного фонаря — 0,6 м

После того как учащиеся рассмотрят описанную выше картину интерференции, нужно объяснить им ее происхождение, используя для этого таблицу с нарисо-

ванной в крупном масштабе схемой (рис. 13). Наконец, выводится формула для определения длины световой волны. S_1 и S_2 — два когерентных источника света (рис. 14). На экране в A_0 — середина центральной (нулевой) светлой полосы, а по бокам ее в N_1 и N_1' — тем-

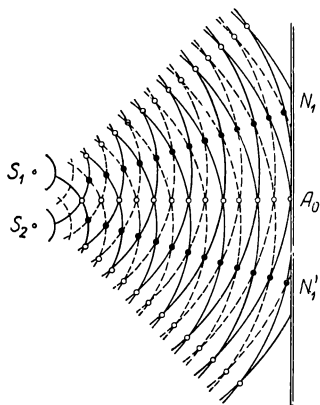


Рис. 13. К объяснению интерференции света: белыми кружками отмечены места максимумов освещенности, а черными кружками — минимумы освещенности

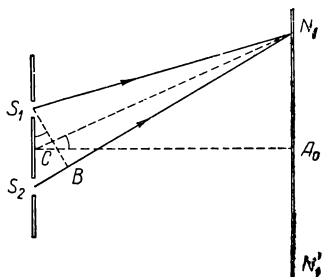


Рис. 14. К выводу формулы для определения длины световой волны

ные полосы первого порядка. Так как N_1 — первая темная полоса, то разность хода $S_2N_1 - S_1N_1$ равна половине длины световой волны. На рисунке:

$$S_1S_2 \parallel N_1N_1';$$

$$CA_0 \perp N_1N_1';$$

C — середина отрезка S_1S_2 ,

A_0 — середина N_1N_1' .

Проведем $S_1B \perp S_2N_1$.

Так как отрезок S_1S_2 очень мал по сравнению с CA_0 , то можно принять, что $CN_1 \parallel S_2N_1$.

Тогда $CN_1 \perp S_1B$, и следовательно, $\angle S_2S_1B = \angle N_1CA_0$;

$$\Delta S_2S_1B \sim \Delta N_1CA_0.$$

Из подобия этих треугольников следует:

$$\frac{S_2B}{S_1S_2} = \frac{N_1A_0}{CN_1}.$$

Так как отрезок A_0N_1 очень мал по сравнению с CA_0 , то без большой погрешности можно считать, что

$$CN_1 = CA_0.$$

Тогда:

$$\frac{S_2 B}{S_1 S_2} = \frac{N_1 A_0}{CA_0}.$$

Введем следующие обозначения: расстояние между серединами двух щелей $S_1 S_2 = d$; ширина интерференционной полосы, равная расстоянию между серединами двух соседних темных полос, $N_1 N_1' = \delta$ и расстояние от двойной щели до экрана $CA_0 = L$.

Тогда

$$\frac{\frac{\lambda}{2}}{d} = \frac{\frac{\delta}{2}}{L},$$

или окончательно:

$$\lambda = \frac{d \cdot \delta}{L}. \quad (1)$$

Таким образом, для определения длины световой волны нужно знать расстояние d между серединами двух щелей и в процессе работы измерить расстояние L от них до экрана и соответствующую этому расстоянию ширину δ интерференционной полосы.

Второй вариант

Демонстрация картины интерференции на экране

Оборудование. Проекционный фонарь с 100-ваттной лампой, колпак со щелью на тубусе конденсора, светосильная двойная щель на штативе и два экрана размером 20×40 см и 40×80 см.

Для опыта пригодны двойные щели, с помощью которых можно получить широкие и достаточно яркие интерференционные полосы, чтобы их можно было рассмотреть с расстояния в несколько метров.

Обозначим ширину перегородки между щелями через a , а ширину каждой щели—через b . Тогда расстояние между серединами щелей $d = a + b$. Из формулы (1)

следует, что $\frac{\lambda \cdot L}{d}$, следовательно, ширина δ интерференционной полосы тем больше, чем меньше d . Вычисление и опыт показывают, что при $d \leq 0,08$ мм полосы получаются достаточно широкие.

Освещенность интерференционных полос зависит от ширины щелей. Чем шире щель, тем больше освещенность, но тем уже область интерференции. Неплохие результаты получаются при

$$0,025 \text{ мм} \geq b \geq 0,013 \text{ мм}.$$

Число полос интерференции зависит от величины отношения $\frac{a}{b}$. Чем больше это отношение, тем больше полос, но тем уже должны быть щели при неизменном d и, следовательно, тем меньше освещенность светлых интерференционных полос. Поэтому для демонстрации приходится использовать двойные щели, дающие сравнительно немного полос, например, пять при $\frac{a}{b} = 2$ или семь при $\frac{a}{b} = 3$.

Для постановки опыта нужно также изготовить из плотной бумаги или картона колпак на тубус конденсора проекционного фонаря и в нем прорезать щель длиной 2,5 см и шириной 3 мм.

Ход работы. Из проекционного фонаря необходимо удалить объектив с его держателем, из конденсора вынуть переднюю линзу и надеть на тубус конденсора изготовленный колпак так, чтобы щель была горизонтальна. Затем патрон с лампой надо передвинуть к задней стенке проекционного фонаря, чтобы с помощью одной линзы конденсора получить слабо сходящийся пучок света, и повернуть патрон, чтобы хорда, стягивающая концы дугообразной нити накала лампы, была перпендикулярна к оптической оси конденсора и параллельна щели в колпаке.

К последней надо вплотную приставить двойную щель Юнга, укрепленную на штативе, расположив ее горизонтально (рис. 15).

На расстоянии 2,0—2,5 м от проекционного фонаря устанавливается малый экран (20×40 см), а на расстоя-

нии 4—5 м — большой экран (40×80 см). Экраны должны быть расположены так, чтобы половина интерференционной картины была на одном экране, а вторая половина — на другом.

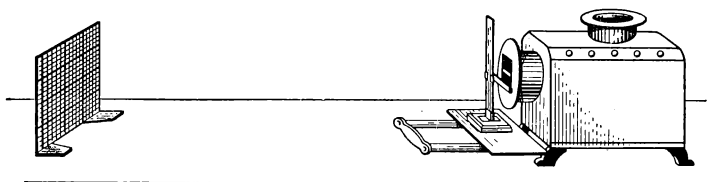


Рис. 15. Установка для демонстрации явления интерференции при помощи двойной щели

При очень хорошем затемнении (лучше всего в вечернее время) и устранении рассеянного света от фонаря получается неплохая видимость интерференционных полос (см. вклейку, рис. 1). Так, например, при этих условиях, используя двойную щель, у которой $d=0,07$ мм и $\frac{a}{b}=2$, можно с расстояния в 5 м отчетливо видеть на большом экране пять светлых полос шириной каждая около 4 см, а на малом экране — то же количество полос шириной примерно 2 см.

Было бы весьма целесообразно организовать выпуск для школ фабричных светосильных двойных щелей (только изготовленных не фотографическим способом). Кроме того, надо было бы наладить производство для проекционных фонарей 100- или 50-ваттных однопольных ламп с вертикальной нитью накала, расположенной по оси цилиндрического стеклянного баллона.

4. ЦВЕТ И ДЛИНА ВОЛНЫ

Оборудование. Двойная щель Юнга, трапециевидная стеклянная пластинка, лампочка от карманного фонарика и штативы к ним.

Ход работы. Лампочку 1, трапециевидную стеклянную пластинку 2 и двойную щель 3 устанавливают согласно рис. 16. Еще до установки двойной щели глаз располагается на пути лучей, выходящих из призмы. На-

блюдатель видит сплошной спектр, протянувшийся в горизонтальном направлении. Здесь сплошной спектр получается без щели потому, что используется точечный источник света. Спектр представляет собой совокупность множества прилегающих друг к другу изображений источ-

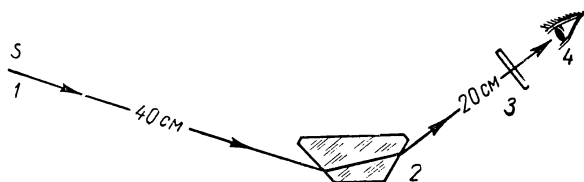


Рис. 16. Схема опыта для наблюдения сплошного спектра через двойную щель:

1—точечный источник света; 2—трапецевидная пластинка; 3—двойная щель Юнга; 4—глаз

ников света разных цветов, начиная с фиолетового у левого конца спектра и кончая красным — у правого.

Можно сравнить интерференционные картины, полученные от различных одноцветных источников. С этой целью, не меняя установки, надо смотреть на спектр через двойную щель Юнга (рис. 17), установленную параллельно длине спектра. Картина представляет собой

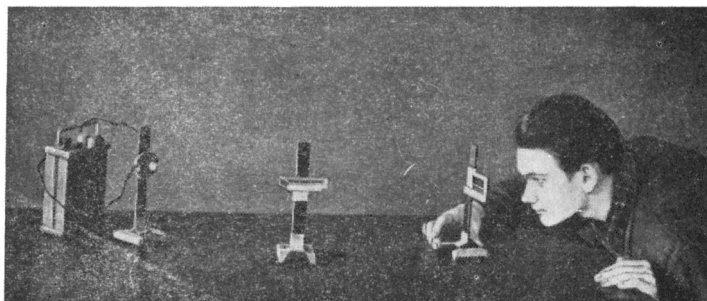


Рис. 17. Визуальное наблюдение сплошного спектра через двойную щель

чередующиеся светлые (радужные) и темные полосы интерференции, расположенные вроде веера (рис. 18). Каждая светлая полоса и есть сплошной спектр, посте-

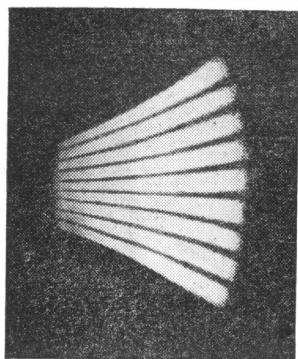


Рис. 18. Интерференционная картина, наблюдаемая в опыте согласно рис. 17

пенно расширяющийся от фиолетового конца спектра к красному. Таким образом, при одинаковых условиях опыта полосы интерференции разных цветов имеют неодинаковую ширину. Наибольшая ширина у красного цвета, наименьшая — у фиолетового.

Согласно формуле $\delta = \frac{\lambda L}{d}$ при одних и тех же значениях d и L неодинаковая ширина δ интерференционной по-

лосы зависит исключительно от длины волны. Точно так же, согласно формуле (1), и наблюдаемое в опыте расширение интерференционных полос от фиолетового конца спектра к красному свидетельствует о том, что длина световой волны в спектре непрерывно возрастает, приближаясь к красному его концу.

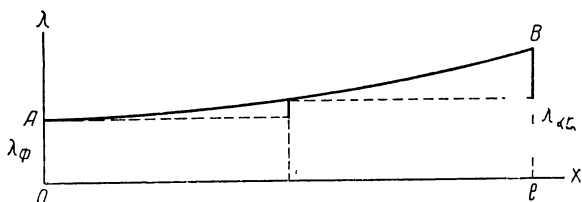


Рис. 19. График изменения длины световой волны по длине призматического спектра

Как возрастает длина волны от фиолетового конца спектра к красному, — равномерно или неравномерно? Пусть ось абсцисс на рис. 19 есть средняя линия центральной радужной полосы (рис. 18); ось ординат — перпендикуляр к этой средней линии у фиолетового конца спектра, а линия AB — средняя линия радужной поло-

сы 1-го порядка. Эту линию можно рассматривать как график изменения δ на протяжении всего спектра. Линия AB есть кривая, своей выпуклостью обращенная к оси абсцисс. Так как δ пропорциональна λ , то и график изменения λ по длине спектра имеет такой же вид.

На основании этого графика можно заключить, что длина волны по спектру увеличивается неравномерно — все больше и больше возрастает по мере приближения к красному его концу. По этой причине красная область спектра сжата по сравнению с фиолетово-синей. В этом заключается особенность призматического спектра, отличающая его от нормального спектра, в котором длина волны от фиолетового конца к красному возрастает равномерно. Нормальный спектр, как известно, получают с помощью вогнутой дифракционной решетки.

Одновременное изменение длины световой волны и цвета на протяжении спектра неизбежно приводит к заключению о зависимости цвета от длины волны.

Следовательно, цвет определяется длиной соответствующей волны в видимой области спектра. Однако, так как длина световой волны при переходе света из одной среды в другую меняется, а частота нет (см. стр. 35), то точнее можно сказать, что цвет определяется частотой колебания. Последняя, как известно, меняется лишь в том случае, если происходит относительное перемещение по лучу зрения источника света и наблюдателя (принцип Доплера).

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ В ВОЗДУХЕ

1-й способ

Оборудование. Проекционный фонарь, двойная щель Юнга на штативе, экран с листом миллиметровой бумаги.

Для работ по определению длины световой волны нужно измерить расстояние между серединами двух щелей; это можно сделать следующим образом:

1) если имеется объект-микрометр и окулярный микрометр, то, пользуясь объективом с $8\times$ и окуляром с $7\times$ увеличением, нужно определить цену деления шкалы окулярного микрометра в переводе на линейный размер объекта. Затем, положив на предметный столик ми-

кроскопа двойную щель Юнга (тушью вверх) вместо объект-микрометра, следует измерить по шкале окулярного микрометра увеличенное микроскопом расстояние между серединами двух щелей. Умножением найденной выше цены деления шкалы окулярного микрометра на измеренное по его шкале (увеличенное) расстояние между серединами двух щелей получается действительное расстояние между серединами этих щелей;

2) требуемое измерение можно произвести при помощи только одной измерительной лупы. Пользуясь ею и объект-микрометром, мы определили, какое увеличение дает объектив $8\times$ различных школьных микроскопов, если его установить так, чтобы изображение объекта при вынудом окуляре получилось в плоскости, проходящей через верхний край тубуса микроскопа. Микроскопы марки «МУ» и «ШМ-1» дают увеличение в 8,7 раз. Это было проверено на нескольких микроскопах каждой из указанных выше марок. Зная указанное увеличение ($8,7\times$), можно определить расстояние между щелями, пользуясь только измерительной лупой и не имея объект-микрометра.

На предметный столик микроскопа надо положить двойную щель Юнга (тушью вверх) и затем тубус микроскопа с объективом $8\times$ и окуляром $7\times$ установить на такой высоте, чтобы было отчетливо видно изображение двойной щели. Затем надо вынуть окуляр и на верхний край тубуса осторожно установить измерительную лупу. При этом шкала лупы окажется в плоскости, проходящей через верхний край тубуса микроскопа. Чтобы поднять до этой плоскости изображение, даваемое объективом, придется последний немного опустить (вместе с тубусом). Лупу нужно повернуть так, чтобы какое-нибудь деление шкалы пришлось как раз на середину одной щели. Затем следует сделать промер между серединами двух щелей и полученный результат разделить на 8,7. На рис. 20 показано, как производится измерение расстояния между серединами двух щелей с помощью микроскопа и измерительной лупы.

Для работ по определению длины световой волны описываемым ниже способом расстояние между серединами двух щелей должно быть не больше 0,08 мм. Хорошо иметь набор двойных щелей с d , равным 0,08, 0,07 и 0,06 мм.

Ход работы. В начале надо установить проекционный фонарь и двойную щель точно так, как в демонстрационном опыте Юнга (рис. 15). Экран с листом миллиметровой бумаги устанавливается на расстоянии 1 м от двойной щели. После получения картины интерференции определяется ширина одной ее полосы. Лучше определить ширину сразу трех или пяти полос и полученное число разделить на их количество.

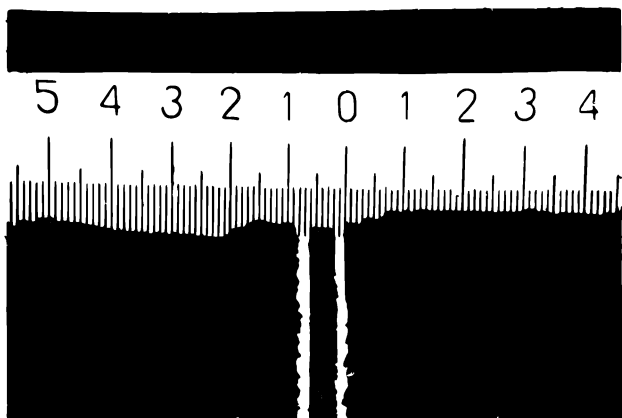


Рис. 20. Картина, видимая в микроскопе, при измерении расстояния между двумя щелями

На фотографии видны в увеличенном виде шкала измерительной лупы (цена деления 0,1 мм) и двойная щель

В одном из проведенных нами опытов был получен следующий результат.

Расстояние между серединами щелей $d = 0,07 \text{ мм} = 70 \text{ мк}$. Расстояние от двойной щели до экрана $L = 1 \text{ м} = 10^6 \text{ мк}$. Ширина интерференционной полосы $\delta = 8,2 \text{ мм} = 82 \cdot 10^2 \text{ мк}$.

Отсюда

$$\lambda = \frac{d \delta}{L};$$

$$\lambda = \frac{70 \cdot 82 \cdot 10^2}{10^6} \text{ мк} \approx 0,57 \text{ мк}.$$

На уроке можно произвести расчет. На вклейке в конце книги (рис. 1) представлена фотография (в натуральную величину) интерференционной картины, полу-

ченной с установкой рис. 15, только при фотографировании из фонаря была удалена и вторая линза конденсора. Фотопленка, служившая экраном, укреплялась на расстоянии 1 м от двойной щели Юнга, у которой расстояние между серединами щелей равно 0,06 мм. По этим данным и измеренной ширине интерференционной полосы определить длину световой волны.

2-й способ

Оборудование. Лампочка от карманного фонарика, двойная щель (с измеренным расстоянием между щелями), масштабная линейка, линза *l* и четыре штатива к ним.

Ход работы. Приборы устанавливают по прямой линии в следующем порядке: лампочка, на расстоянии 40—50 см от нее двойная щель, в 20—30 см от последней масштабная линейка и, наконец, линза *l* на расстоянии от линейки, равном фокусному (рис. 21). Лампочка используется как точечный или линейный источник света.

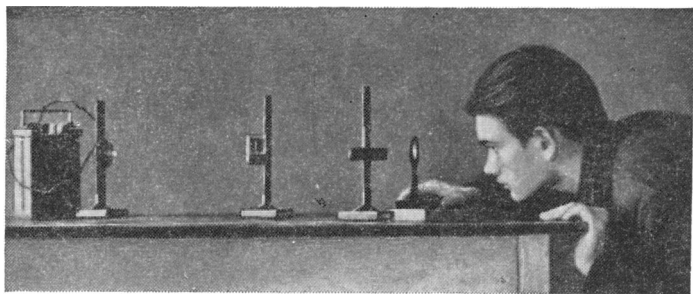


Рис. 21. Измерение ширины интерференционной полосы

В первом случае нить накала должна быть обращена к наблюдателю одним своим концом; во втором — ее нужно установить вертикально. Двойная щель тоже устанавливается вертикально. Когда в поле зрения линзы будет видна картина интерференции, линзу передвигают взад или вперед до того момента, пока шкала линейки станет отчетливо видимой. Линейку устанавливают на такой высоте, чтобы ее верхний край совпадал с горизонтальным диаметром круглого поля зрения. Над шкалой видны

вертикальные полосы интерференции. Тогда и определяют ширину интерференционной полосы, а затем и расстояние от двойной щели до масштабной линейки. Расстояние между серединами щелей известно (оно записано на окантовке). По этим величинам определяется λ .

Ниже приводятся результаты одной работы.

Расстояние от двойной щели до шкалы $L = 20 \text{ см} = 2 \cdot 10^5 \text{ мк}$.

Расстояние между серединами двух щелей $d = 0,07 \text{ мм} = 70 \text{ мк}$.

Ширина интерференционной полосы $\delta = 1,6 \text{ мм} = 16 \cdot 10^2 \text{ мк}$.

Отсюда

$$\lambda = \frac{d \delta}{L};$$

$$\lambda = \frac{70 \cdot 16 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^5} \text{ мк} = 0,56 \text{ мк}.$$

3-й способ

Оборудование. Двойная щель (на штативе), экран со щелью и шкалой (на штативе), метровая линейка.

Из картона вырезается экран высотой 12 см и шириной 15 см и в его середине проделывается окошко высотой 4 см и шириной $2,5 \text{ см}$. На листке миллиметровой бумаги размером $6 \times 4,5 \text{ см}$ в верхней его половине вычерчиваются тушью четыре полосы на расстоянии 3 мм друг от друга шириной каждая 2 мм (рис. 22 а). В нижней половине листка лезвием безопасной бритвы прорезается щель шириной 1 мм . Она должна находиться как раз посередине между двумя средними черными полосками. Затем нижнюю половину листка покрывают тушью. Когда она высохнет и бумага расправится под прессом, этот листок приклеивают к краям окошка в картонном экране. В результате получится экран, у которого имеется щель и просвечивающаяся шкала с четырьмя штрихами. Расстояние между серединами двух соседних штрихов равно 5 мм . Можно приготовить экран и с другой ценой деления шкалы.

Двойная щель для этой работы делается несколько иначе, чем было описано выше. Тушью покрывают не всю поверхность стеклянной пластинки; непокрытой

оставляют полосу шириной 1 см, примыкающую к длинному ее краю. Затем на пластинку кладут металлическую линейку близко к краю туши и лезвием от безопасной бритвы соскабливают неровности этого края, выступающие из-под линейки. Далее сложенными вместе двумя лезвиями безопасной бритвы прорезают на пластинке несколько двойных щелей; из них испытанием отбирают

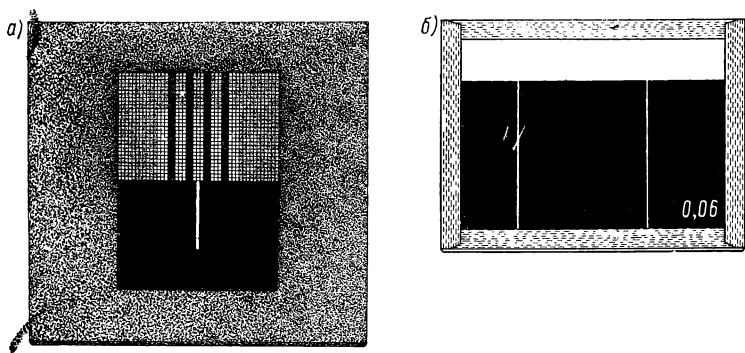


Рис. 22. Экран со щелью и шкалой и двойная щель Юнга для определения длины световой волны

пригодные, измеряют расстояние d между их серединами около не покрытой тушью полосы стекла, прикрывают пластинку со щелями другой стеклянной пластинкой, окантовывают и на окантовке (или на туши) надписывают значение d (рис. 22 б).

Ход работы. Учащийся садится у конца лабораторного стола против окна, через которое в кабинет поступает свет от небосвода. Можно воспользоваться светом от матовой лампы, но тогда работу придется проводить в затемненном кабинете.

В штативах на одной высоте устанавливают двойную щель и щель в экране. Двойную щель помещают прямо перед собой, а экран — на расстоянии около 50 см.

Если посмотреть на щель в экране через верхний конец двойной щели, над которым находится не покрытая тушью полоска стекла, то будут видны одна над другой две системы темных полос: вверху — штрихи шкалы, а внизу темные полосы интерференции. Штрихи видны через не покрытую тушью часть стекла, а интерференцион-

ные полосы — через двойную щель. Если смотреть на щель в экране через двойную щель, сделанную в слое туши, на 1 см ниже ее верхнего конца, то увидим только полосы интерференции.

Снова надо посмотреть на щель в экране через верхний конец двойной щели и сравнить расстояние между соседними темными полосами интерференции с расстоянием между делениями (штрихами) шкалы. Если эти полосы окажутся ближе друг к другу, чем деления шкалы, то надо медленно удалять экран от наблюдателя, пока полосы интерференции, раздвигаясь, не совпадут с делениями шкалы. Если же, наоборот, темные полосы интерференции дальше друг от друга, чем штрихи шкалы, то экран следует приближать к наблюдателю. При совпадении полос и штрихов ширина δ интерференционной полосы равна цене деления шкалы (в нашем опыте 5 мм).

Затем измеряют расстояние L от двойной щели Юнга до экрана.

Расстояние d между серединами двух щелей записано на окантовке пластинки, ширина δ интерференционной полосы равна цене деления шкалы, наконец, расстояние L от двойной щели Юнга до экрана измеряется. Остается вычислить длину световой волны.

Ниже приводятся результаты одной работы:

$$\begin{aligned}d &= 0,09 \text{ мм} = 9 \cdot 10 \text{ мк}, \\ \delta &= 4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^3 \text{ мк}, \\ L &= 66 \text{ см} = 66 \cdot 10^4 \text{ мк}.\end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{d \cdot \delta}{L};$$

$$\lambda = \frac{9 \cdot 10 \cdot 4 \cdot 10^3}{66 \cdot 10^4} \text{ мк} \approx 0,55 \text{ мк}.$$

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ В СТЕКЛЕ И В ВОДЕ

Оборудование. Лампочка на штативе, трапециевидная стеклянная пластинка, измерительная лупа, держатели для пластинки и лупы, двойная щель.

Ход работы. Лампочку следует опустить вниз на штативе до отказа (рис. 23), держатель для трапеце-

видной пластинки надеть на стойку и расположить на расстоянии примерно 8 см ниже верхнего конца штатива. На площадку держателя помещается двойная щель так, чтобы она находилась над волоском лампочки.

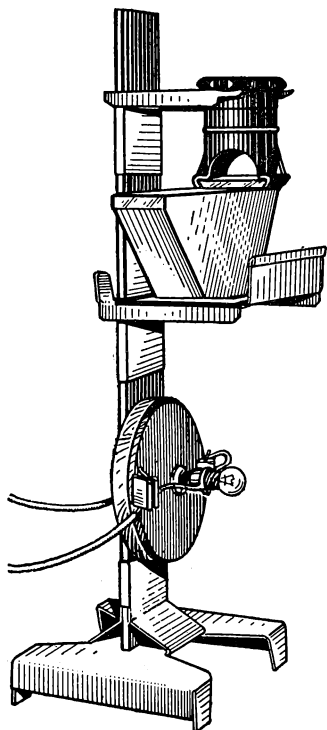


Рис. 23. Установка для определения длины световой волны в стекле

На верхний конец штатива надевается держатель измерительной лупы. Ее надо установить на таком расстоянии от своей шкалы, чтобы последняя была отчетливо видна. Тогда шкала находится в фокальной плоскости лупы. После этого лупу следует подвесить на ее держателе.

Затем включают лампочку и устанавливают ее нить накала вертикально.

Перемещением лупы к стойке штатива или от нее и перемещением двойной щели добиваются, чтобы была отчетливо видна система интерференционных полос.

На двойную щель помещают трапециевидную пластинку таким образом, чтобы она была обращена вниз малой гранью и перпендикулярна к двойной щели (рис. 23). Держатель двойной щели и трапециевидной

пластинки надо поднять до соприкосновения верхней грани пластинки со шкалой измерительной лупы. При этом лупа не должна быть приподнята над своим держателем. Теперь в фокальной плоскости лупы находится не только ее шкала, но и верхняя грань трапециевидной пластинки.

Лупу следует повернуть, чтобы штрихи шкалы были параллельны двойной щели, и затем передвинуть так, чтобы над верхней гранью трапециевидной пластинки была только половина шкалы, а другая половина сво-

бодно свешивалась с края пластинки. В конце концов в фокальной плоскости лупы будут видны две системы интерференционных полос (рис. 24). Одна из них, которая видна над трапецевидной пластинкой, уже другой.

Свет от лампочки, прошедший через двойную щель, дальше распространяется до фокальной плоскости лупы по двум различным средам — через стекло и по воздуху.

В работе измеряется ширина сразу трех или пяти полос сначала в одной системе, а затем — в другой. Пусть $5\delta_{\text{возд.}} = l_1$ и $5\delta_{\text{ст.}} = l_2$.

Тогда

$$\frac{\delta_{\text{возд.}}}{\delta_{\text{ст.}}} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (2)$$

Как же объяснить, почему ширина полос интерференции в стекле уже, чем в воздухе? В нашем опыте длина (L) пути света в воздухе и в стекле (от двойной щели до шкалы лупы), а также расстояние d между серединами двух щелей одинаковы. Из формулы (1) следует, что при неизменных L и d различная ширина интерференционных полос обусловлена только неодинаковой длиной световой волны в воздухе и стекле. В этих условиях, как видно из 1-й формулы, ширина интерференционной полосы пропорциональна длине световой волны. На этом основании можно записать:

$$\frac{\delta_{\text{возд.}}}{\delta_{\text{ст.}}} = \frac{\lambda_{\text{возд.}}}{\lambda_{\text{ст.}}} \quad (3)$$

Сопоставив (2) и (3), получим:

$$\frac{\lambda_{\text{возд.}}}{\lambda_{\text{ст.}}} = \frac{l_1}{l_2}$$

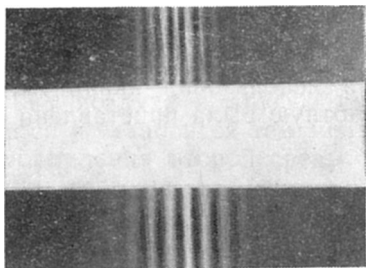


Рис. 24 Картина интерференции, видимая в измерительную лупу, от света, прошедшего через стекло (вверху) и воздух (внизу)

Сравнив найденное числовое значение отношения $\frac{\lambda_{\text{возд.}}}{\lambda_{\text{ст.}}}$ с величиной показателя преломления стекла, можно сделать вывод, что

$$\frac{\lambda_{\text{возд.}}}{\lambda_{\text{ст.}}} \approx n_{\text{ст.}} \quad (4)$$

Аналогичный опыт был проделан с водой. Для этого был использован аквариум, к одной стенке которого вплотную была приставлена двойная щель, а к противо-

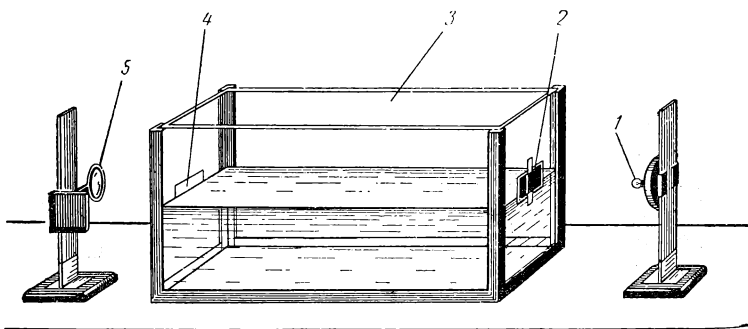


Рис. 25. Расположение приборов в установке для определения длины световой волны в воде:

1 — лампочка от карманного фонарика на штативе; 2 — двойная щель; 3 — аквариум с водой; 4 — полоска миллиметровой бумаги, 5 — линза (в качестве лупы)

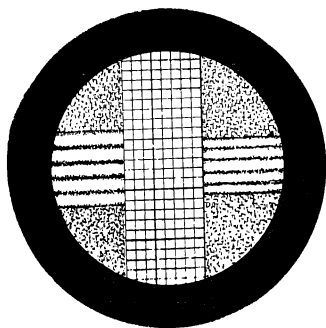


Рис. 26. Две системы интерференционных полос, видимые в лупу на установке, изображенной на рис. 25. Посередине поля зрения видна полоска миллиметровой бумаги. Вверху — система интерференционных полос в воздухе, внизу — в воде

положной — приклеена полоска миллиметровой бумаги (шириной 8 мм), служившая шкалой при измерении ши-

рины интерференционных полос в воздухе (над шкалой) и в воде (под ней). Лампочка от карманного фонарика устанавливается на расстоянии около 10 см от двойной щели (рис. 25 и 26). В качестве лупы используется линза 1 ($F=7$ см). В результате опыта было получено:

$$\frac{\lambda_{\text{возд.}}}{\lambda_{\text{воды}}} \approx n_{\text{воды}}.$$

Из проведенной работы можно сделать два вывода:

1) при переходе света из воздуха в другую среду длина его волны уменьшается и становится тем меньше, чем больше показатель преломления второй среды;

2) для вычисления длины световой волны в данной среде нужно длину волны в воздухе разделить на показатель преломления данной среды относительно воздуха.

7. ОПЫТ ФРЕНЕЛЯ (С ЗЕРКАЛАМИ)

Схема опыта Френеля приведена на рис. 27, где S — точечный или линейный источник света (перпендикулярный к плоскости чертежа), AB и AC — зеркала Френеля (они также перпендикулярны к плоскости чертежа), S_1 и S_2 — мнимые изображения источника света (эти изображения в данном опыте и являются когерентными источниками света), SAB — пучок света, падающий на зеркало AB , а $ABKL$ — пучок света, отраженный тем же зеркалом (этот пучок кажется исходящим из точки S_1), SAC и $ACKL$ — соответственно падающий на зеркало AC и отраженный им пучок света (отраженный пучок кажется исходящим из точки S_2), AKL — перекрывающиеся части обоих отраженных пуч-

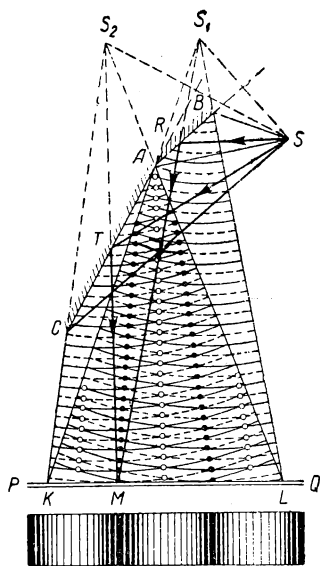


Рис. 27. Схема опыта с зеркалами Френеля:

светлыми кружками отмечены места максимумов освещенности, а темными кружками — минимумы освещенности

ков (именно здесь два отраженных пучка света, будучи когерентными, при наложении друг на друга интерферируют), PQ — экран наблюдения, перпендикулярный к плоскости чертежа.

Изготовление зеркал Френеля

Доступным и пригодным материалом для изготовления зеркал Френеля являются матовые стекла, которые можно купить в магазине фототоваров. Пригодными для данной цели их делают две особенности: во-первых, в противоположность обыкновенному стеклу, дающему два изображения, матовое стекло дает лишь одно изображение источника света; во-вторых, оно не бывает волнистым, его поверхность почти всегда ровная и почти плоская.

Из пластинки матового стекла размером 10×15 см можно изготовить две пары зеркал. На матовой стороне

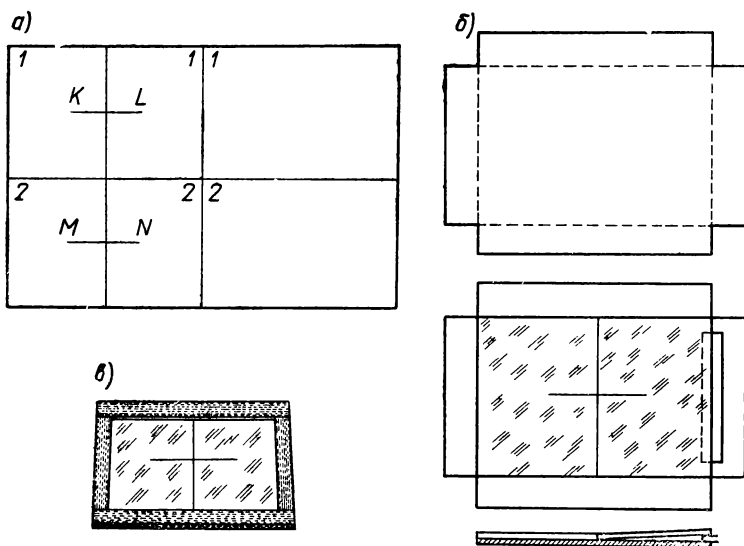


Рис. 28. Зеркала Френеля для фронтального проведения лабораторной работы по интерференции света: а — разметка матового стекла для получения зеркал (одинаковыми цифрами обозначены пластинки для изготовления одной пары зеркал Френеля) KL и MN — пометки для правильной установки зеркал; б — вырезка из бумаги и подготовка к окантовке пластинок; в — внешний вид зеркал Френеля

такой пластинки тонко очиненным карандашом делается разметка (рис. 28, а). По линиям этой разметки стекло разрезается алмазом на шесть пластинок. Но предварительно, чтобы не перепутать их, особенно при массовом изготовлении зеркал для фронтального проведения работы, нужно одним номером отмечать каждые три пластинки (две малых и одну большую). Две малые пластинки будут собственно зеркалами Френеля, а большая пластинка — опорой. По линейке надо провести прямые KL и MN , пересекающие линию, по которой разрезается стекло. По отрезкам прямой KL и MN на том и другом зеркале легко правильно установить соприкасающиеся края обоих зеркал.

Матовое стекло повертывается отражающей поверхностью вверх и разрезается алмазом вдоль просвечивающих линий разметки.

Для окантовки зеркал из бумаги (пригодны обложки от ученических тетрадей) вырезают фигуру, как показано на рис. 28, б. Затем от листка из тетради надо отрезать узкую полоску шириной около 5 мм и длиной на 1 см меньше ширины опорной пластинки. Бумагу для окантовки с внутренней стороны от пунктирных линий намазывают клейстером. На эту бумагу накладывают опорную пластинку матовой поверхностью вниз и помещают на нее какой-нибудь пресс. Через несколько минут, когда клейстер засохнет, пресс удаляют и на опорную пластинку кладут два зеркала отражающей поверхностью вверх, обратив друг к другу их края с пометками (отрезки прямой KL). Зеркала передвигаются одно относительно другого вдоль линии их соприкосновения вплоть до совмещения пометок. Чтобы сделать угол между зеркалами немного меньше 180° , надо поместить заготовленную узкую полоску бумаги между одним зеркалом и коротким краем опорной пластинки так, чтобы бумага вошла внутрь на половину своей ширины (рис. 28, б). Следует пальцем провести по зеркалам около их общего ребра с целью узнать, не чувствуется ли порог при переходе с одного зеркала на другое. Если порог ощущается, нужно поднять зеркала и удалить то, что мешает правильной установке зеркал.

Выдающиеся из-под опорной пластинки длинные края окантовки намазывают клейстером, не доводя его на 3—4 мм до краев этой пластинки, чтобы потом клей-

стер не попал между пластинкой и зеркалом. Намазанные длинные края окантовки перегибают, прижимают их к зеркалам и движениями пальцев стараются их сблизить, чтобы зеркала были плотно прижаты к опоре. Если пометки у линии соприкосновения зеркал сдвинутся, то снова надо совместить их и возможно теснее сблизить по линии соприкосновения. Затем приклеивают к зеркалу короткий край окантовки, противоположный тому, где подведена узкая полоска бумаги.

Прежде чем приклеить к зеркалу четвертый край окантовки, нужно испытанием определить, образуют ли зеркала нужный двугранный угол. Лучшим источником света для такого испытания является пропускающая свет от небосвода узкая вертикальная щель (шириной около 0,5 мм и высотой 20 см) в большом экране, помещенном против окна. Другие источники света, более яркие, из-за иррадиации мешают определению расстояния между двумя изображениями источника света в зеркалах.

Наблюдатель должен удалиться от экрана на расстояние около 3 м и обратиться лицом к нему. Лево́й рукой надо держать зеркала Френеля, поместив их между большим пальцем (у нижнего конца общего ребра обоих зеркал), и указательным и средним пальцами (у верхнего конца того же ребра). Зеркала должны быть обращены вправо. Они помещаются на расстоянии около 30 см от правого глаза (левый прищурить) и устанавливаются сперва по лучу зрения на щель в экране. Если глаз и щель находятся примерно на одном уровне, ребро двугранного угла между зеркалами устанавливается вертикально. Медленно поворачивают зеркала влево, пока не будет видна в дальнем от наблюдателя зеркале узкая светлая полоса (изображение щели в дальнем зеркале). Продолжая поворачивать руку влево, можно заметить, что светлая полоса при этом перемещается по направлению к общему ребру обоих зеркал. Когда она приблизится к ребру, внезапно вместо одной будут видны почти рядом две светлых узких полосы (изображения щели в обоих зеркалах).

Если расстояние между двумя изображениями щели (узкими светлыми полосами) равно ширине каждого из них или примерно в два раза больше, то зеркала пригодны для опыта. Остается только закончить окантовку

(рис. 28, в). Если же два изображения щели почти сливаются, угол между зеркалами хотя и меньше 180° , но для опыта велик. Его нужно уменьшить. С этой целью надо вынуть узкую полоску бумаги и вместо нее между зеркалом и опорной пластинкой на 1—2 мм вдвинуть острый край лезвия от безопасной бритвы, чтобы немного приподнять зеркало. Затем, вынув лезвие, вместо него следует поместить полоску более толстой бумаги, чем первоначальная, и снова произвести испытание.

Наконец, если расстояние между двумя изображениями щели значительно больше двойной ширины каждого из них, то угол между зеркалами меньше требуемого. Его нужно увеличить. В таком случае надо вынуть узкую полоску бумаги и вместо нее поместить другую, более тонкую. Случается, что без всякой полоски бумаги образуется нужный угол между зеркалами.

Картина интерференции света, наблюдаемая в опыте с зеркалами Френеля, тем отчетливее и правильнее, чем ровнее соприкасающиеся края зеркал, чем теснее они прижаты друг к другу и точнее восстановлено первоначальное относительное положение зеркал путем совмещения пометок у их общего ребра.

Проведение опыта

Оборудование. Зеркала Френеля, линза *1*, лампочка от карманного фонарика с источником питания и штативы для приборов.

Ход работы. Лампочка устанавливается на самом верху штатива, зеркала — на отдельном штативе, на 7—8 см ниже, а линза — чуть ниже лампочки. Приборы размещаются по прямой линии на таких расстояниях: от лампочки до зеркал Френеля около 1 м, а от зеркал до линзы примерно 30 см (рис. 29).

Лампочку надо повертывать в патроне до тех пор, пока нить накала установится горизонтально и в то же время перпендикулярно к линии расположения приборов.

Зеркала Френеля устанавливаются горизонтально или с небольшим наклоном в сторону лампочки; общее ребро обоих зеркал должно быть перпендикулярно линии расположения приборов и параллельно волоску лампочки.

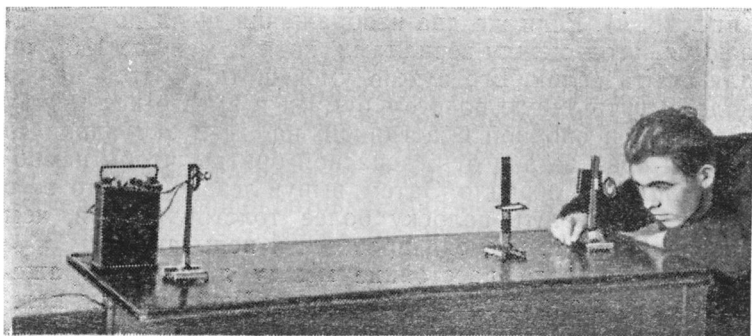


Рис. 29. Визуальное наблюдение явления интерференции при помощи зеркал Френеля

Наблюдатель садится у конца лабораторного стола против линзы и смотрит через нее на лампочку. Линзу надо установить на таком расстоянии от глаза, чтобы поле зрения охватывало всю линзу и было ярко и равномерно освещенным. После этого штатив с линзой следует отодвинуть влево.

Наклоняя или поднимая голову, надо постараться увидеть изображение волоска лампочки в зеркалах около их общего ребра. Не упуская из поля своего зрения изображения волоска, медленно возвращают на прежнее место штатив с линзой, двигают его до тех пор, пока не будет виден рядом с изображением волоска лампы край оправы линзы. Линзу следует установить на штативе на такой высоте, чтобы изображение волоска было на продолжении горизонтального диаметра линзы, т. е. чтобы центр линзы и изображение волоска казались на одной высоте. После этого линзу отодвигают вправо. Сначала изображение волоска скроется за оправой линзы, а потом будет видна картина, которую и надо пронаблюдать.

Наблюдатель увидит довольно широкую светлую полосу, протянувшуюся в горизонтальном направлении, а посередине ее вдоль горизонтального диаметра линзы— систему чередующихся ярких светлых и резких черных полос (см. вклейку, рис. 2).

Наблюдаемая светлая горизонтальная полоса представляет собой картину сечения фокальной плоскостью

лупы двух пучков света, отраженных от зеркал Френеля: вверху—сечения пучка, отраженного от дальнего зеркала, внизу—от ближнего, а середина светлой полосы, где видна система чередующихся светлых и темных полос, есть сечение фокальной плоскостью лупы тех частей обоих отраженных от зеркал пучков, которые налагаются друг на друга и интерферируют. Эта система полос и представляет собой картину интерференции света.

Сопоставив наблюдаемые картины интерференции в опыте Юнга и в опыте с зеркалами Френеля, можно заметить следующие общие черты: в центре (или в середине) системы светлая полоса; темных полос четное число, а светлых—нечетное (правда, это не всегда легко разобрать); все полосы примерно одинаковой ширины; яркость светлых полос наибольшая у средней полосы; в ту и другую сторону от нее яркость полос убывает медленно и постепенно. Но есть и отличие между ними. В опыте Френеля по мере удаления лупы от зеркал число интерференционных полос увеличивается; в опыте же Юнга при удалении лупы от двойной щели это число остается неизменным. Это можно проверить на опыте.

Чем ближе угол между зеркалами к 180° , тем ближе друг к другу изображения волоска лампочки в обоих зеркалах, и наоборот. Учащимся предлагается проверить это на опыте сперва с одной парой зеркал, а затем с другой, но при одном и том же расстоянии от линзы до них. Рекомендуются сделать заключение о влиянии расстояния между мнимыми изображениями источника света на ширину интерференционных полос. Предлагается также ответить, можно ли на основании проделанных опытов сделать вывод, что ширина интерференционных полос обратно пропорциональна расстоянию между дву-

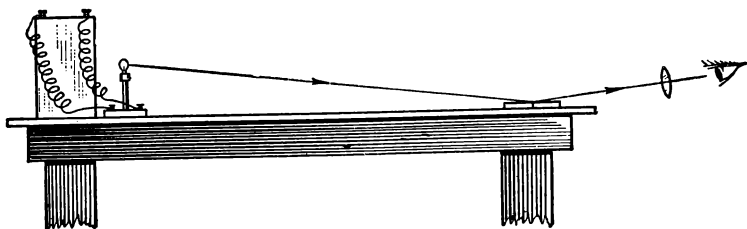


Рис. 30. Схема опыта с зеркалами Френеля (один из вариантов)

мя когерентными источниками света и прямо пропорциональна расстоянию от зеркал Френеля до экрана наблюдения (в нашей постановке опыта — до фокальной плоскости луны).

Предлагаемую работу с зеркалами Френеля можно провести также без штативов (рис. 30).

8. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКОМ ВОЗДУШНОМ КЛИНЕ

Оборудование. Источник света (осветитель для теневой проекции, проекционный фонарь со 100-ваттной лампой или осветитель ФОС), обратная призма, подставка для нее, малая призма из набора оптики бинокля, трапециевидная стеклянная пластинка, красный светофильтр из школьного набора, лабораторный подъемный столик, столик на стержне и рейтер для него от оптической скамьи ФОС, две струбчинки, штатив физический и держатель с лапками, экран, чистая мягкая плотная тряпочка.

В этом демонстрационном опыте учащиеся наблюдают интерференцию света в тонком воздушном клине

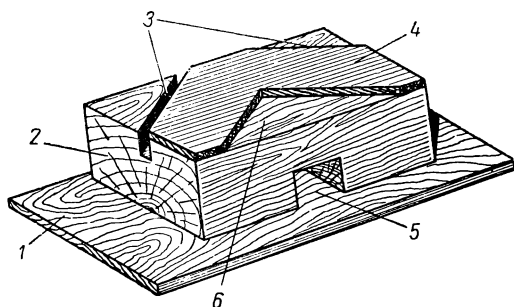


Рис. 31. Подставка для обратной призмы:
1 — опора; 2 — деревянный брусок; 3 — пропилы для светофильтров; 4 — картон; 5 — паз для струбчинки;
6 — место для призмы

между обратной призмой и призмой от бинокля или трапециевидной стеклянной пластинкой.

Для обратной призмы нужно изготовить подставку (рис. 31). Она состоит из следующих частей: внизу опорная пластинка из фанеры, над ней — деревянный брусок, у которого внизу имеется паз для конца струб-

цинки, а сверху — два пропила, куда может вставляться светофильтр. Наконец, над бруском имеется картон с вырезом, сделанным с таким расчетом, чтобы обратная призма, упираясь в края этого выреза, примерно на 1 мм выдавалась над бруском. На рис. 32 изображена та же

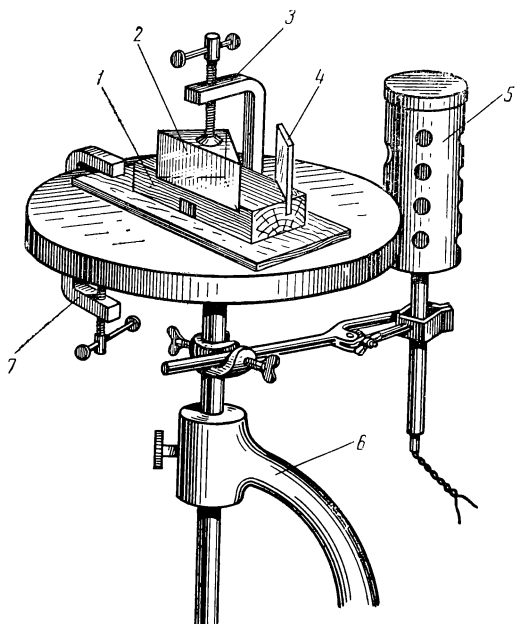


Рис. 32 Установка обратной призмы и осветителя для теневой проекции на подъемном столике:

- 1 — подставка для призмы; 2 — призма; 3, 7 — струбцинки; 4 — светофильтр; 5 — осветитель; 6 — подъемный столик

подставка с обратной призмой и светофильтром. Струбцинками призма прижата к подставке, а последняя — к подъемному столику, если в качестве источника света используется осветитель для теневой проекции. Если же применяется проекционный фонарь или осветитель ФОС, то подставка обратной призмы укрепляется на столике со стержнем (рис. 33). Между призмой и винтом прокладывается дощечка, из-под которой верхний край большой грани призмы должен немного выступать.

Источники света необходимо диафрагмировать. В осветителе для теневой проекции нужно использовать второе по величине отверстие, считая от самого малого. В проекционном фанаре со 100-ваттной лампой нужно удалить линзы конденсора и в самую глубину оправы конденсора вставить круг из картона (или из жести) с вырезанной в центре вертикальной щелью высотой 12 мм и шириной 5 мм. Лампу следует придвинуть к оправе конденсора. В осветителе ФОС в самую глубину ниши, куда вдвигается конденсор (последний для опыта не ну-

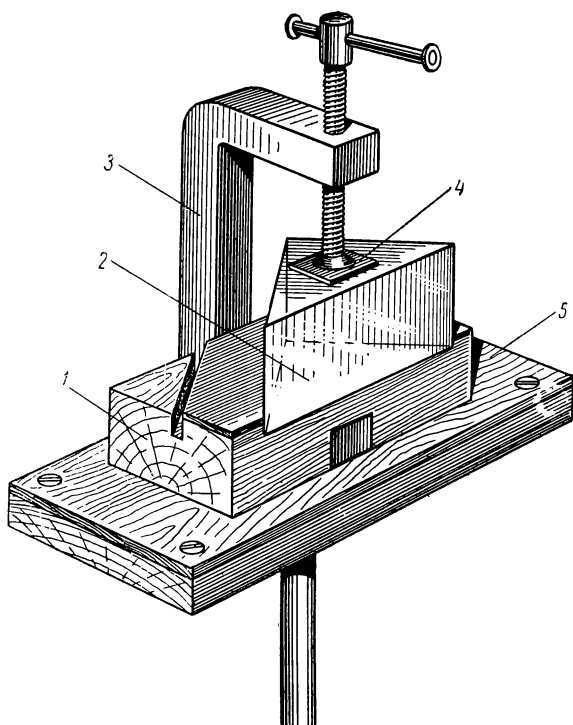


Рис. 33. Крепление оборотной призмы к подъемному столику со стержнем от скамьи ФОС (один из вариантов):

- 1 — подставка для призмы; 2 — призма; 3 — струбцинка;
- 4 — подкладка между призмой и винтом струбцинки;
- 5 — столик к скамье ФОС

жен), рекомендуется вставить круг из жести с вырезанным в центре круглым отверстием диаметром в 5 мм. Этот круг снабжается одной или двумя лапками, чтобы легче было его устанавливать и вынимать.

Расстояние до экрана от источников света примерно следующее: от осветителя для теневой проекции около 2 м, от проекционного фонаря — 2,5 м и от осветителя ФОС — 3—4 м.

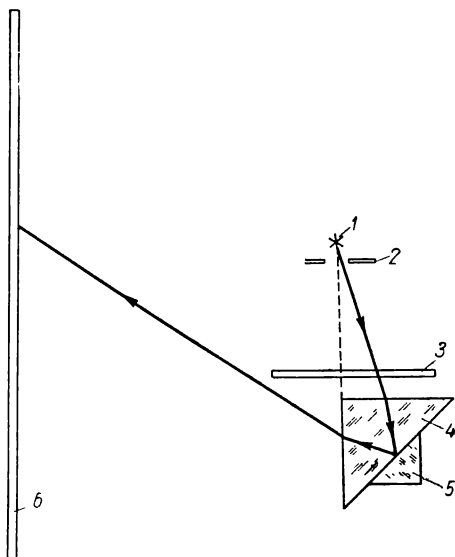


Рис. 34. Взаимное расположение приборов в установке для наблюдения интерференции в тонком воздушном слое:

1 — источник света; 2 — диафрагма; 3 — светофильтр; 4 — оборотная призма; 5 — малая призма из набора оптики бинокля.

6 — экран

Оборотную призму рекомендуется установить возможно ближе к источнику света и притом так, чтобы одна ее малая преломляющая грань была параллельна экрану и своим продолжением пересекала середину отверстия диафрагмы у источника света, а другая малая преломляющая грань была против него (рис. 34).

Перед опытом нужно очень тщательно протереть преломляющие грани обеих призм чистой мягкой полотняной тряпочкой и положить их на лист бумаги матовыми гранями вниз. В ходе опыта призму следует держать, прикасаясь пальцами только к ее ребрам или к матовым, но не к преломляющим граням, и время от времени снова протирать те грани, которые приводятся в соприкосновение.

Опыт. При включении света на экране на фоне тени виден квадрат, разделенный на две полосы — широкую и узкую. Широкая полоса, расположенная со стороны источника света, чуть светлее окружающей тени, а узкая — очень яркая. Обе они освещаются светом, отраженным от большой грани призмы, но на узкую полосу попадает свет после полного отражения от этой грани, а на широкую — после неполного (здесь угол падения меньше предельного).

Между источником света и оборотной призмой в пропил ее подставки вставляется красный светофильтр.

К большой грани оборотной призмы надо приставить малую преломляющую грань призмы от бинокля, обратив ее острый двугранный угол к источнику света. Если надавить на ребро прямого двугранного угла призмы, то на экране в широкой, до этого слабо освещенной полосе описанного выше квадрата будет видна целая система темных интерференционных полос, разделенных сравнительно широкими светлыми полосами, более яркими, чем окружающий слабо освещенный фон. Теперь область экрана, занятая интерференционной картиной, освещается светом, отраженным не только от большой грани оборотной призмы, но и от малой грани призмы бинокля, т. е. на экран падает свет, отраженный от передней и задней поверхности тонкого слоя воздуха, находящегося между обеими призмами. Пучки света, отраженные от той и другой поверхности, налагаются друг на друга и, будучи когерентными, интерferируют.

При одинаковом давлении вверху и внизу на ребро прямого двугранного угла призмы можно добиться, чтобы интерференционные полосы были прямолинейны и вертикальны. Дальше, продолжая производить неизменное давление на ребро прямого двугранного угла призмы от бинокля, следует пробовать то отрывать, то нажимать на конец этой призмы, ближайший к источнику

света. При попытке оторвать — угол воздушного клина между призмами увеличивается, и при этом интерференционные полосы, суживаясь, смещаются к ребру клина (оно под ребром прямого двугранного угла призмы). Наоборот, при надавливании на конец призмы, ближайший к источнику света, угол воздушного клина уменьшается, а полосы, расширяясь, отходят от ребра клина. (Причина этого явления будет выяснена позднее.)

Теперь следует приставить к оборотной призме большую грань призмы от бинокля, установив длинные стороны этой грани вертикально. В этом случае видна система более длинных интерференционных полос, которые соответствующим изменением угла воздушного клина тоже можно сделать и более узкими и более широкими.

Если в школе нет призмы от бинокля, описанный опыт рекомендуется провести при помощи трапециевидной стеклянной пластинки. В соприкосновение с оборотной призмой приводится преломляющая грань этой пластинки, имеющая форму трапеции. Параллельные ребра этой пластинки располагаются сначала горизонтально, а затем вертикально. Следует заранее отобрать пластинку, которая дает прямолинейные полосы (см. вклейку, рис. 3).

Получаемая на экране картина интерференции хорошо и отчетливо видна с любого места физического кабинета. Если оборотная призма расположена непосредственно около осветителя для теневой проекции, то на экране, отстоящем от призмы на 2 м, наблюдаются отчетливые интерференционные полосы длиной около 1 м и шириной от 1 до 10 см. С красным светофильтром наблюдается более 10 полос.

Интерференция света в тонком воздушном клине используется в технике точных измерений, в частности при проверке микрометров и концевых мер (плиток Иогансона). Последние представляют собой стальные плитки в виде прямоугольных параллелепипедов, две противоположные грани которых зеркально отполированы и строго параллельны друг к другу. Расстояние между этими гранями и называется длиной концевой меры. Изготавливаются концевые меры с большой степенью точности. Так, для концевой меры длиной в 10 мм максимально допустимая ошибка не должна превышать 0,1 мк. По-

этому для поверки таких мер необходимо применять метод, который давал бы возможность сравнивать их длину с точностью, по крайней мере, до 0,1 мк. Для этой цели используется явление интерференции.

Пользуясь особым стеклом, создают тонкий воздушный клин между рабочей строго плоской поверхностью этого стекла и торцом микрометра или поверхностью концевой меры. По наблюдаемой картине интерференции определяют толщину воздушного клина в известном месте (при поверке микрометров) или сравнивают толщину воздушного клина в двух разных местах (при сравнении концевых мер, а также в процессе их изготовления).

Пусть на тонкий воздушный клин, образованный двумя плоскими поверхностями, свет падает перпендикулярно. Можно принять, что геометрическая разность хода между лучами, отраженными от передней и задней поверхности клина, равна удвоенной толщине клина в данном месте. Оптическая же разность хода в том же месте будет на полволны больше геометрической, так как луч при падении на заднюю поверхность клина отражается от оптически более плотного тела и при этом теряет полволны.

Нулевой темной полосе, лежащей над ребром воздушного клина, где его толщина ничтожно мала, соответствует оптическая разность хода в одну полуволну, первой темной полосе — $3 \cdot \frac{\lambda}{2}$, второй полосе — $5 \cdot \frac{\lambda}{2}$, третьей — $7 \cdot \frac{\lambda}{2}$, или $(2 \cdot 3 + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$, и т. д. Следовательно, темной полосе (k) соответствует оптическая разность хода в $(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$. Поэтому можно записать, что:

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

откуда
$$d = k \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Из этой формулы можно сделать следующие выводы:

1) номер данной темной полосы (k) указывает число полуволн в толщине клина в точках, соответствующих этой полосе;

2) по ходу темной полосы клин имеет одинаковую толщину. Отсюда название — полосы равной толщины;

3) при переходе от одной темной полосы к соседней толщина клина изменяется на полволны, увеличиваясь при удалении от ребра клина и уменьшаясь при движении в обратном направлении;

4) при увеличении угла клина прирост его толщины на полволны происходит быстрее, чем при меньшем угле, и поэтому полосы сгущаются, становясь уже. Наоборот, при уменьшении угла воздушного клина прирост его толщины на полволны происходит медленнее, и поэтому полосы расширяются.

Если при использовании интерференции света для измерений в технике не применяется монохроматический свет, то длину световой волны принимают равной $0,6 \text{ мк}$ (и, следовательно, $\frac{\lambda}{2} = 0,3 \text{ мк}$). Это примерно длина той световой волны, к которой особенно чувствителен наш глаз¹. ($\lambda = 0,556 \text{ мк}$).

Теперь можно рассмотреть задачи, подобные тем, которые приходится разрешать при проверке микрометров (1-я задача) и сравнении концевых мер (2-я задача).

1. Определить толщину клина в точках, соответствующих 4-й темной полосе.

Пользуясь формулой $d = k \cdot \frac{\lambda}{2}$, можно написать: $d = 4 \cdot 0,3 \text{ мк}$, или окончательно $d = 1,2 \text{ мк}$.

2. Сравнить толщину клина в двух точках, из которых одна лежит на первой темной полосе, а другая делит расстояние между второй и третьей темными полосами в отношении 3:2, считая от ребра (рис. 35).

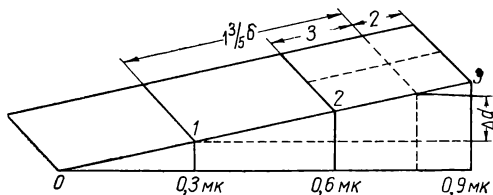


Рис. 35. Воздушный клин, образованный двумя плоскими поверхностями

¹ К. А. Путилов, Курс физики, т 1, М—Л., Гостехиздат, 1945, стр. 367.

Разность толщины клина в двух заданных точках

$$\Delta d = \left(2 \frac{3}{5} - 1\right) \cdot 0,3 \text{ мк},$$

поэтому $\Delta d = 0,48 \text{ мк}$.

9. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ОТРАЖЕННОМ И ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ

Оборудование. Установка, что и в предыдущем опыте, и плоское зеркало (для лабораторных работ) на подставке.

Подставка для плоского зеркала изготавливается такой же высоты, как и для оборотной призмы. Зеркало устанавливается параллельно большой грани оборотной призмы (рис. 36 а).

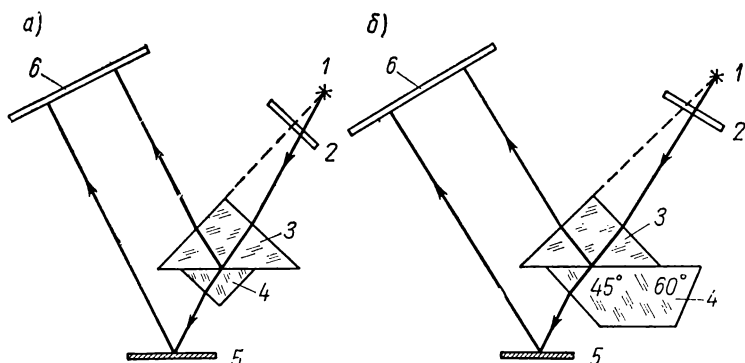


Рис. 36. Два варианта демонстрационного опыта для сравнения картины интерференции в отраженном и проходящем свете; а — с призмой от бинокля; б — с трапециевидной стеклянной пластинкой:

1 — источник света; 2 — светофильтр; 3 — оборотная призма; 4 — призма от бинокля или трапециевидная пластинка; 5 — плоское зеркало; 6 — экран

Опыт. К большой грани оборотной призмы приставляют большую грань призмы от бинокля, расположив ее матовые грани горизонтально, и производят давление на призму. На экране появится картина интерференции в отраженном свете.

Затем следует немного приподнять передний край подставки зеркала и несколько повернуть его, чтобы

картина интерференции в проходящем свете разместилась как раз над интерференционными полосами в отраженном свете. Следует добиться, чтобы полосы были прямолинейны.

Светлые полосы в отраженном свете соответствуют темным полосам в проходящем и, наоборот, темные полосы—светлым. Получается такое впечатление, как будто картина интерференции в проходящем свете является негативом по отношению к картине интерференции в отраженном свете.

Перед учащимися ставится задача объяснить, почему там, где в отраженном свете имеет место гашение света, в проходящем, наоборот, происходит усиление света, а там, где в отраженном усиление,— в проходящем гашение.

Без светофильтра на экране видны цветные интерференционные полосы. Соответственные интерференционные полосы в отраженном и проходящем свете окрашены в дополнительные цвета.

Если нет призмы от бинокля, то можно использовать трапецевидную стеклянную пластинку (рис. 36, б).

10. КОЛЬЦА НЬЮТОНА

Оборудование. Прибор для демонстрации колец Ньютона, источник света (осветитель для теневой проекции или ФОС), лабораторная линза 2 ($F \approx 14$ см), красный светофильтр, плоское зеркало, лабораторный подъемный столик, физический штатив с разными принадлежностями, струбцинка, чистая мягкая тряпочка.

Предлагаемый нами прибор дает возможность поставить более эффектную демонстрацию колец Ньютона, чем удастся с имеющимся оборудованием. Для него необходимы две плоско-выпуклые линзы. Особенно хороши для этой цели линзы конденсора проекционного фонаря со 100-ваттной лампой или малого конденсора от оптической скамьи ФОС и линзы фотоувеличителя. Все они — плоско-выпуклые. Если пару из указанных линз тщательно вытереть и приложить друг к другу плоскими поверхностями, то почти всегда получаются прекрасные кольца Ньютона.

Для линз нужна оправа, которая с известной силой сжимала бы их. Из фанеры можно вырезать два одинаковых квадрата и в каждом из них — круглое отверстие. Сторона квадрата на 5—6 см больше, а диаметр круглого отверстия на 1,5 см меньше диаметра линз. Между квадратами помещают две линзы, сложенные плоскими сторонами, квадраты сжимают и определяют, какой толщины планки нужно положить между ними около их наружных краев, чтобы квадраты, будучи прибиты к планкам, производили на линзы давление, достаточное для получения интерференции. Из четырех планок изготавливается четырехугольная рамка, к ней с двух сторон прибивают квадраты и полученную таким образом оправу распиливают пополам. Наконец, в оправе нужно сделать два замка, которые соединяли бы обе ее половины, и к одной из них прибить подставку (рис. 37). В половину оправы с подставкой помещают две линзы,

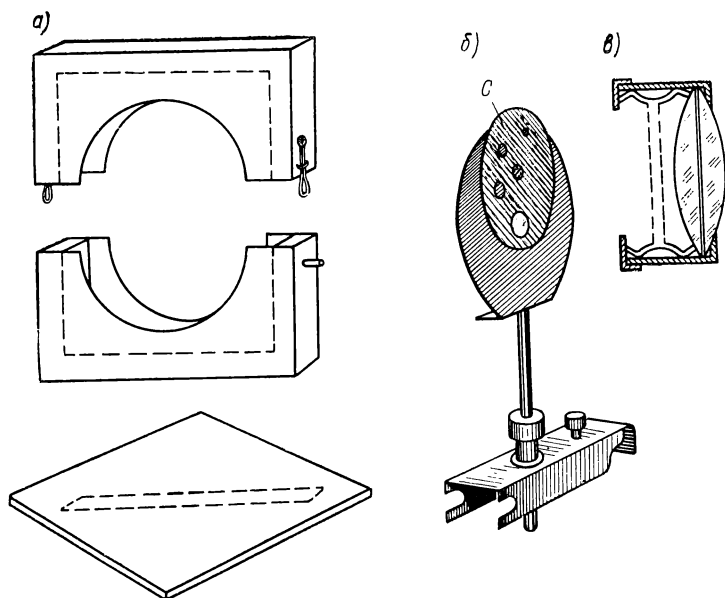


Рис. 37. Оправа для линз, при помощи которых образуются кольца Ньютона (а), и установка линз в оправу от конденсора (в), которая вешается на диск с отверстиями от скамьи ФОС (б)

сложенные плоскими сторонами, накрывают их второй половиной оправы и закрывают замком, для чего требуется некоторое усилие.

Для конденсорных линз от проекционного фонаря можно использовать оправу самого конденсора. Для этого нужно его разобрать, сложить линзы плоскими сторонами и вставить их в оправу. Туда же надо поместить распорку, которая обычно отделяет линзы друг от друга, надеть запирающее кольцо на оправу и замкнуть ее. (рис. 37 в).

Опыт. На вертикальном стержне подъемного столика закрепляют держатель с лапками от физического штатива. В них зажимают нижнюю трубочку осветителя для теневой проекции. На подъемный столик устанавливается самодельный прибор. Осветитель и прибор из двух линз находятся на расстоянии 15—20 см друг от друга, а экран от них — на 2—3 м. Угол падения света на прибор надо увеличивать от 15 до 45°. При малом угле падения картина интерференции не очень яркая и кольца небольшие, но более или менее правильной формы. При увеличении этого угла кольца увеличиваются и картина становится ярче и красочнее. При установке осветителя на расстоянии 4—5 см от прибора «кольца Ньютона», а лабораторной линзы 2 на расстоянии 1—2 см от него (рис. 38), на экране на расстоянии 2,5—3 м от установки будет видна ярко освещенная система правильных колец, из которых у наружного кольца диаметр превышает 1 м. Если линзу 2 удалять от прибора к экрану, то по площади картина интерференции уменьшится, но станет ярче. При уменьшении расстояния между прибором и экраном до 1,5 м и установке на пути лучей от линзы 2 красного светофильтра на экране видно на цветном фоне около десятка темных колец (см. вклейку, рис. 4).

Затем убирают светофильтр и линзу 2, поворачивают подъемный столик, чтобы свет, прошедший через прибор («кольца Ньютона»), упал на экран. На пути этого пучка света на расстоянии 5 см от прибора помещают ту же линзу, а затем удаляют ее по направлению к экрану. При этом видимая на экране система колец Ньютона в проходящем свете уменьшается, но становится ярче и отчетливее, чем первоначально.

Если в качестве источника света использовать

осветитель ФОС, то, установив прибор на расстоянии 15—20 см от него, при угле падения около 45° , на экране на расстоянии 2—3 м можно получить яркую систему больших колец и без применения линзы 2. Только в этом случае в нишу конденсора нужно вставить круг из жести с отверстием диаметром 10 мм (рис. 39).

Во время демонстрации колец Ньютона в отраженном свете нужно обратить внимание учащихся на темное пятно в центре всей системы колец. Оно соответствует

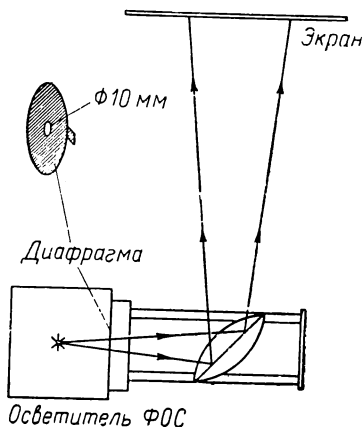
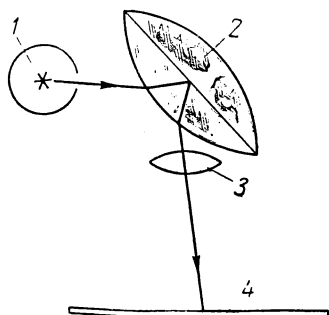


Рис. 38. Взаимное расположение приборов при демонстрации колец Ньютона в отраженном свете:

1 — осветитель для теневой проекции; 2 — две линзы конденсора; 3 — лабораторная линза ($F = 14$ см); 4 — экран

Рис. 39. Демонстрация колец Ньютона в отраженном свете с использованием осветителя ФОС (схема)

месту соприкосновения двух поверхностей. Здесь толщина воздушного слоя так ничтожна, что оптическая разность хода практически обусловлена лишь потерей волны при отражении.

В проходящем свете в этом месте видно светлое пятно: здесь свет проходит через линзы без потерь вследствие отражения.

В связи с изучением этого явления следует рассказать учащимся о «просветлении» оптики, т. е. об умень-

шении потерь света на отражение в оптических приборах. В перископе, где много оптических деталей, вследствие отражения теряется три четверти всего падающего на объектив света, в бинокле — около половины. Один из методов «просветления», разработанный советскими учеными, заключается в следующем: на поверхности линз создают тонкую прозрачную пленку, которая для полного пропускания света избранной длины (например, $\lambda = 0,556 \text{ мк}$) должна удовлетворять следующим требованиям:

показатель преломления пленки $n_{\text{пл.}} = \sqrt{n_{\text{ст.}}}$,

толщина пленки $d = \frac{\lambda_{\text{пл.}}}{4}$.

Луч света, проходя через такую просветленную линзу, претерпевает четырехкратное отражение — два отражения от двух границ передней пленки и два — от задней пленки. Оба луча, отраженные от обеих границ передней пленки, при отражении теряют каждый полволны, так как $n_{\text{возд.}} < n_{\text{пл.}} < n_{\text{ст.}}$. Наоборот, ни у одного из двух лучей, отраженных от обеих границ задней пленки, не происходит потери полуволны вследствие того, что $n_{\text{ст.}} > n_{\text{пл.}} > n_{\text{возд.}}$. Поэтому и у первой, и у второй пары отраженных лучей оптическая разность хода (Δ) зависит только от толщины пленки, а так как последняя равна $\frac{\lambda_{\text{пл.}}}{4}$, то разность хода, равная удвоенной толщине пленки, в свою очередь равна полуволне. Таким образом, оба отраженных луча интерферируют в противоположных фазах. Тот факт, что $n_{\text{пл.}} = \sqrt{n_{\text{ст.}}}$, обеспечивает равенство интенсивностей обоих отраженных лучей. Поэтому в результате интерференции происходит не ослабление, а полное гашение отраженных лучей и, следовательно, имеет место полное пропускание света избранной длины волны. Надо, однако, заметить, что такая пленка обладает лишь избирательным пропусканием. Часть же падающих на нее лучей (для которых удвоенная толщина пленки ближе к целой волне, чем к полуволне) пленка отражает; отраженный ею свет имеет дополнительный цвет по отношению к пропускаемому. Так, например, у фотоаппаратов с «просветленным» объективом отраженный пленкой свет имеет фиолетовый оттенок.

11. ПОЛОСЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В СПЕКТРЕ

Свет от точечного или линейного источника белого света падает на тонкую прозрачную пластинку и отражается от передней и задней ее поверхности. Между отраженными пучками света образуется разность хода. При перпендикулярном падении лучей на пластинку эта разность хода равна удвоенной толщине пластинки, если не учитывать потери полуволны при отражении от передней поверхности. Отраженные пучки имеют одинаковый и полный набор всех спектральных цветов. Волны того и другого пучка, имеющие одинаковую длину, при наложении друг на друга должны интерферировать, так как они когерентны. Волны обоих отраженных от пластинки пучков, для которых разность хода равна четному числу полуволн, усиливают друг друга, так как они имеют одинаковые фазы. Те же волны обоих пучков, у которых разность хода равна нечетному числу полуволн, погасят друг друга, так как у них противоположные фазы. В результате в свете, отраженном от тонкой прозрачной пластинки, из полного набора упавших на нее волн всех спектральных цветов будет недоставать волн многих цветов. Невооруженным глазом это нельзя обнаружить. Если свет, отраженный от тонкой пластинки, принять на экран, то на последнем виден белый зайчик. И это понятно. Лучи, у которых разность хода была равна четному числу полуволн, не погашенные, а наоборот, усилившие друг друга, будучи перемешаны друг с другом, производят впечатление белого света. Чтобы узнать истинный спектральный состав отраженного света, нужно его исследовать тем или другим спектральным аппаратом. Тогда вместо обычного непрерывного спектра взору наблюдателя представится своеобразный спектр, в котором яркие цветные полосы чередуются с темными.

1-й вариант

Оборудование. Тонкие пластинки (листочки слюды, светофильтры из школьного набора), призма прямого зрения, экран с узкой щелью и матовая электрическая лампа.

Из картона и бумаги надо вырезать прямоугольники размером $4,5 \times 6$ см и в них сделать круглые или квад-

ратные отверстия такого размера, чтобы листочек слюды их полностью закрывал. Листочек слюды помещают между полученными рамками, из которых бумажную приклеивают клеестером к краям листочка слюды и к картонной рамке.

В качестве еще более тонкой пластинки можно использовать слой воздуха в светофилтре, который находится между стеклянной пластинкой и цветной пленкой на другой пластинке. Во время опыта свет должен падать на стекло без пленки. Чтобы его узнать, следует поместить светофилтр рядом с лампочкой в 25 или 40 вт и посмотреть на изображение нити накала в светофилтре, как в зеркале. Если обратить к лампе одну поверхность светофильтра, то видно одно белое и два цветных (например, красных) изображения нити накала, а если другую сторону, — то два белых и одно цветное изображение. Именно эта поверхность и есть искомая. Ее следует отметить значком на окантовке.

Для изготовления экрана с узкой щелью из плотной непросвечивающей бумаги вырезается фигура по рис. 40.

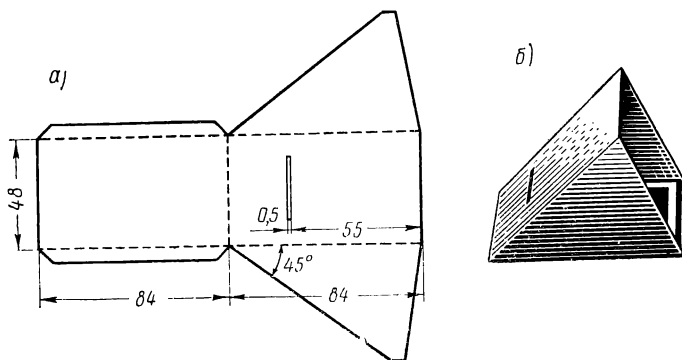


Рис. 40. Выкройка из плотной бумаги для изготовления поло-
го клина со щелью (а) и его внешний вид (б)

Ход работы. Против окна или матовой лампы устанавливается прибор (рис. 41). Внутрь клина против щели помещается светофилтр. В призму прямого зрения виден непрерывный спектр, изоборжденный поперечными темными, часто причудливо изогнутыми полосами интерференции (рис. 42). Темные полосы очень резки и от-

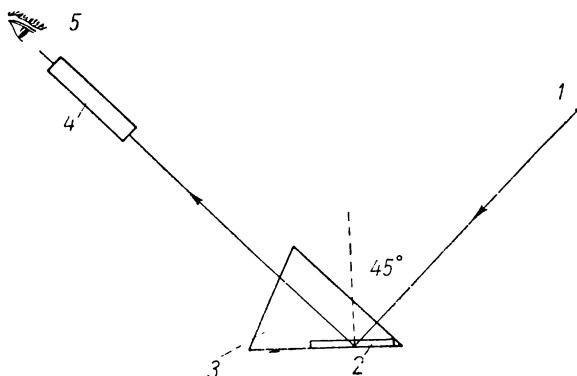


Рис. 41. Схема установки для наблюдения полос интерференции в спектре (1-й вариант):

1 — пучок света от небосвода или от матовой лампы,
 2 — светофильтр; 3 — бумажный клин со щелью,
 4 — призма прямого зрения; 5 — глаз

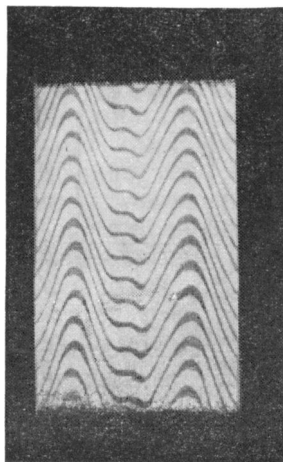


Рис. 42. Полосы интерференции в спектре, наблюдаемые в установке по рис. 41

четливы, а промежуточные цветные полосы особенно ярки при угле падения в 45° . Вместо светофильтра можно поместить листочек слюды. Картина интерференции отличается от предыдущей. Почти всегда одновременно можно видеть рядом друг с другом несколько систем темных полос. Они прямолинейны и параллельны друг другу. Число полос в каждой системе больше, чем наблюдается в светофильтре.

2-й вариант

Оборудование. Лампочка от карманного фонарика, светофильтры, листочки слюды, спектроскоп прямого зрения.

Ход работы. Лампочка, светофильтр и спектроскоп устанавливаются на одной высоте согласно рис. 43, примерно на следующих расстояниях друг от друга: от лампочки до светофильтра — 10 см, а от последнего до спектроскопа — 15—20 см.

В спектроскоп видны прямолинейные и часто параллельные полосы в спектре. Расстояние между темными полосами уменьшается в направлении от фиолетового конца спектра к красному. Это находится в полном соответствии с отмеченной раньше особенностью призматического спектра.

При уменьшении угла падения число полос в спектре растет, а при увеличении этого угла становится меньше.

При замене светофильтра листочком слюды интерференционная картина поражает своей правильностью и обилием интерференционных полос в спектре. В этом случае наблюдается только одна система темных полос.

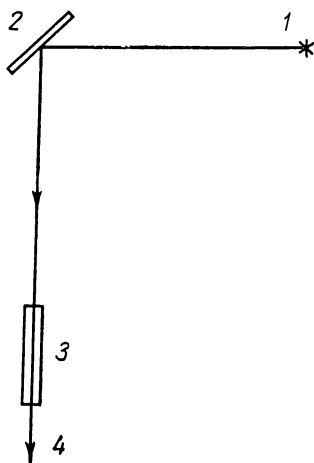


Рис. 43. Схема установки для наблюдения полос интерференции в спектре (2-й вариант):

1 — лампочка от карманного фонаря; 2 — светофильтр; 3 — спектроскоп прямого зрения; 4 — пучок света к глазу

ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

12. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА ОТ ПРЯМОГО КРАЯ ШИРОКОГО ЭКРАНА

Оборудование. Линза 1, лампочка от карманного фонарика и широкий экран (карандаш, ручка или масштабная линейка).

Ход работы. Лампочку поворачивают в патроне так, чтобы установить нить накала вертикально. Затем в левую руку берут карандаш, а в правую — линзу, и наблюдатель садится на расстоянии 1,5—2 м от лампочки лицом к ней. Через линзу смотрят на лампочку и устанавливают линзу на таком расстоянии от глаза, чтобы поле зрения было ярким и равномерно освещенным. По другую сторону линзы в ее фокальной плоскости помещают карандаш. Его край должен быть параллелен нити накала лампочки. Тогда в поле зрения видна довольно широкая вертикальная черная полоса с резко очерченными краями.

Если удалять карандаш от линзы по направлению к лампочке, то можно заметить, что края тени становятся менее резкими и не такими темными. Свет проникает в область тени и заходит тем глубже, чем дальше от карандаша то сечение тени, которое рассматривается. Нужно помнить, что в лупу наблюдается та картина, которая получилась бы на экране, помещенном в фокальной плоскости линзы.

В области света на границе с тенью отчетливо видна система чередующихся светлых и темных полос (см. вклейку, рис. 5), параллельных прямому краю экрана. По мере удаления от тени ширина и яркость этих полос постепенно убывают.

Таким образом, свет заходит в область тени, смягчая ее край, но дифракционные полосы в области тени не образуются, а в области света образуются темные полосы, которые чередуются со светлыми.

13. ДИФРАКЦИЯ ОТ РАЗЛИЧНЫХ УЗКИХ ЭКРАНОВ

Оборудование. Лампочка от карманного фонарика, линза *l* и набор узких экранов.

Ход работы. В небольшую дощечку, например в отрезок масштабной линейки, следует воткнуть две иголки различной толщины и кольцо на ножке из проволоки диаметром примерно 0,5 мм (рис. 44).

Лампочка устанавливается так, чтобы к наблюдателю был обращен конец нити накала (точечный источник света).

Если удалиться от лампочки на 1,5—2 м и смотреть через линзу на узкие экраны (рис. 45), то сначала, когда они будут находиться в фокальной плоскости линзы, видны увеличенные темные силуэты этих экранов с резко очерченными краями.

При удалении экранов от линзы в области света на границе с тенью будут видны дифракционные полосы, подобные тем, что наблюдались в предыдущем опыте.

В области тени картина иная. Края тени становятся менее резкими, она бледнеет и переходит в полутень, на фоне которой отчетливо выступают черные полосы, чередующиеся с полосами полутени. В опыте с иглой и спицей эти полосы прямолинейны и параллельны, а в опыте с проволочным кольцом (черные и серые) имеют форму концентрических колец (см. вклейку, рис. 6).

Происхождение этих дифракционных полос было

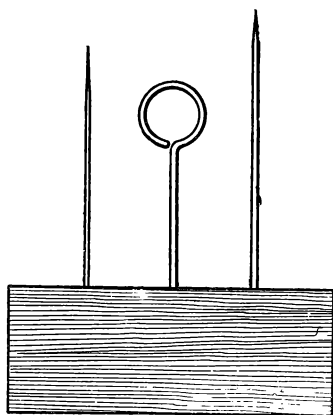


Рис. 44. Две иголки и проволочное кольцо, служащие в качестве узких экранов для получения дифракции света

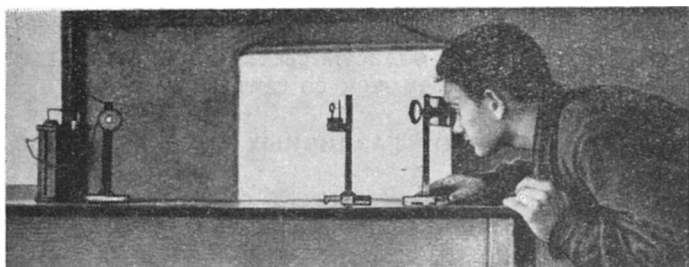


Рис. 45. Наблюдение дифракции света от узких экранов

объяснено Юнгом. Пучки света, проходящие с обеих сторон экрана, дифрагируют в область тени и налагаются друг на друга. Будучи когерентными, при взаимном наложении они интерферируют, в результате чего образуется дифракционная картина.

В справедливости этого объяснения можно убедиться, повторив опыт, проделанный самим Юнгом. Если приставить вплотную к иголке масштабную линейку, полосы пропадут. В этом случае остается лишь один пучок света, загибающийся в область тени, а другой пучок, необходимый для интерференции, устранен линейкой.

Учащимся предлагается выяснить зависимость числа внутренних дифракционных полос от ширины экрана и от его расстояния до линзы. С этой целью сравниваются картины дифракции от толстой и тонкой иголки и от одной и той же иголки при различных ее расстояниях от линзы.

14. ДИФРАКЦИЯ ОТ МАЛЫХ КРУГЛЫХ ЭКРАНОВ

Оборудование. Линза 1, лампочка от карманного фонарика и набор малых круглых экранов.

Из стекол от негативов после удаления с них фотопленки следует нарезать пластинки размером $4,5 \times 6$ см и пистчим пером № 86 или № 11 тушью нанести на одну сторону пластинки несколько параллельных рядов точек; ручку нужно держать перпендикулярно к ней. По мере уменьшения туши на пере величина точек убывает. Они представляют собой малые круглые экраны убывающей величины с поперечником примерно от 1,0 до 0,5 мм. Очень важно, чтобы среди них были точки пра-

вильной округлой формы. Дифракцию от таких кружков и нужно наблюдать. Когда тушь высохнет, пластинку с точками покрывают другой пластинкой такого же размера и прибор окантовывают бумагой.

Ход работы. Включенную лампочку надо установить концом нити накала к себе и, удалившись от нее на 1,5—2 м, посмотреть через линзу в направлении лампочки на пластинку с точками, помещенную в фокальной плоскости линзы. Наблюдатель увидит резко очерченные увеличенные линзой черные кружки.

При удалении малого круглого экрана от линзы в области света на границе с тенью появляется, становясь все более отчетливой, система внешних дифракционных колец, из которых внутреннее ярким светлым ореолом окружает область тени (см. вклейку, рис. 7).

В области же геометрической тени ее края перестают быть резкими, сама тень постепенно бледнеет, и в центре ее появляется светлое пятнышко. Почти в то же время можно заметить одно, два или большее число резких черных колец, вырисовывающихся на фоне полутени и окружающих центральное светлое пятно. Лучи конического пучка света, проходящего непосредственно около краев малого экрана, загибают в область тени; налагаясь друг на друга, они интерferируют и дают систему чередующихся черных и светло-серых концентрических колец. Яркость центрального пятна объясняется тем, что все волны, огибающие края круглого экрана и попадающие в центр тени, приходят туда в одинаковых фазах.

Учащимся дается задание выяснить зависимость числа внутренних дифракционных колец от величины диаметра малого круглого экрана и его расстояния от линзы.

15. ДИФРАКЦИЯ ОТ УЗКИХ ЩЕЛЕЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ КРАЯМИ

Оборудование. Большой экран с вертикальной щелью высотой около 20 см и шириной примерно 0,5 мм и малый экран с двумя узкими щелями разной ширины.

Для изготовления экрана с двумя узкими щелями из картона вырезают квадрат со стороной 6 см. В нем делают два параллельных окошка шириной 6 мм и высотой 26 мм на расстоянии 16 мм друг от друга. К пере-

городке между ними клейстером приклеивают лезвие от безопасной бритвы так, чтобы его края одинаково выдавались с обеих сторон перегородки (рис. 46).

Полоску бумаги длиной 6 см и шириной 14 мм намазывают клейстером и приклеивают серединой к лезвию,

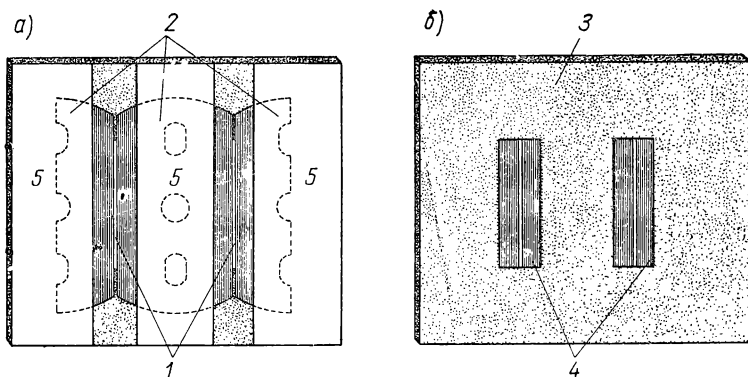


Рис. 46. Две узкие щели разной ширины, образованные лезвиями от безопасной бритвы:

а — вид спереди; *б* — вид сзади.

1 — узкие щели, 2 — лезвия; 3 — рамка из картона; 4 — два окошка;
5 — полоска бумаги

а концами — к картону. Другое лезвие продольно разламывают пополам и приклеивают так, чтобы лезвия образовали две узкие щели. Ширину их можно отрегулировать следующим образом: в одну щель надо просунуть два сложенных лезвия и прижать их половинкой лезвия к среднему лезвию, а когда клейстер высохнет, осторожно вынуть их. В другую щель помещают сложенные вместе 3 или 4 лезвия. Дальнейшие операции те же.

В качестве линейного источника света используется освещенная небосводом вертикальная щель в большом экране, повешенном против окна.

Ход работы. Наблюдатель становится против большого экрана на расстоянии 3—6 м и через одну из двух щелей малого экрана, например более узкую, смотрит на щель в большом экране. Посередине дифракционной картины видна вертикально расположенная довольно широкая яркая светлая полоса. Это — область света. По обе стороны от нее в области тени видны чередующиеся темные и светлые дифракционные полосы. Цент-

ральная светлая полоса ярче боковых и в два раза шире любой из них.

Учащимся предлагается исследовать, как влияет на картину дифракции изменение ширины щели в малом экране и расстояния от него до большого экрана.

16. ДИФРАКЦИЯ ОТ КЛИНОВИДНОЙ ЩЕЛИ

Оборудование. Линза 1, лампочка от карманного фонарика и экран с клиновидными щелями.

Из черной бумаги следует вырезать прямоугольник размером $2,5 \times 6$ см и в нем с одного края прорезать две или три клиновидные щели примерно одинаковой длины, но с разным острым углом (рис. 47).

Ход работы. Лампочку устанавливают как точечный источник света. Удалившись от него на расстояние 1,5—2 м (и больше), наблюдатель смотрит через линзу в направлении лампы на клиновидную щель, помещенную в фокальной плоскости линзы, и видит резкий увеличенный силуэт экрана и щель в виде светлого клина, острием обращенного вниз.

По мере удаления щели от линзы видимая щель (область света) расширяется у вершины клина, и на некотором расстоянии вместо светлого клина, широкого сверху и узкого внизу, будет видна светлая фигура, несколько напоминающая музыкальную духовую трубу, своим рас-
трубом обращенную книзу (см. вклейку, рис. 8).

В области тени по ту и другую сторону от центральной, расширяющейся книзу, светлой полосы видна система чередующихся черных и светло-серых дифракционных полос. Они криволинейны, книзу расширяются и все больше и больше удаляются кнаружи от средней линии центральной полосы.

17. ДИФРАКЦИЯ ОТ МАЛЫХ КРУГЛЫХ ОТВЕРСТИЙ

Оборудование. Лампочка от карманного фонарика, линза 1, бумажный экран с малыми круглыми отверстиями и экран из жести с круглыми отверстиями убывающего диаметра.

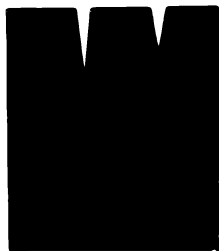


Рис. 47. Экран с двумя клиновидными щелями

На листочке черной бумаги размером 2×6 см по средней линии, параллельной длинному краю полоски, очень тонкой иглой надо сделать на равном расстоянии друг от друга пять проколов. Острые иглы должно выступать по другую сторону бумаги не больше, чем на 0,5 мм. При образовании прокола иголку не надо выдергивать, а, вращая, осторожно выводить из отверстия, чтобы не испортить его краев. В противном случае дифракционные полосы не будут иметь правильной кольцевидной формы.

Из тонкой жести (от консервной банки) надо сделать экран такого же размера, как только что описанный бумажный, и с таким же количеством отверстий, но только отверстия придется не прокалывать, а пробивать легкими постукиваниями молотка по тупому концу иголки, а уже затем отверстия постепенно рассверливать иголкой. Рассверливание ведется под контролем микроскопа (используя объектив $8\times$ и окуляр $7\times$).

Четыре отверстия должны иметь диаметр, последовательно увеличивающийся от $\frac{R}{5}$ до $\frac{R}{3}$, а диаметр пятого отверстия R , где R — радиус поля зрения при объективе $8\times$ и окуляре $7\times$. О соотношении между диаметром отверстия в жести и радиусом поля зрения легче всего судить, когда окружности отверстия и поля зрения являются касательными.

Ход работы. Лампочку устанавливают в качестве точечного источника света и, удалившись от нее на 2—5 м, наблюдатель смотрит невооруженным глазом на лампочку через отверстия в бумажном экране. В центре в области света виден яркий белый круг, а вокруг него в области тени — чередующиеся черные и светло-серые дифракционные кольца.

Если смотреть последовательно через все отверстия в экране из жести, начиная с самого большого и кончая самым малым, то можно заметить, что по мере уменьшения их диаметра в наблюдаемой картине происходят следующие изменения: центральный светлый круг расширяется, а яркость его уменьшается; у дифракционных колец диаметры увеличиваются, и сами они становятся шире; светлые кольца тускнеют.

Учащимся дается задание пронаблюдать картину дифракции в области света. С этой целью в штативах на одной высоте устанавливают лампочку, самое боль-

шое отверстие в экране из жести и оптический центр линзы. Лампочку надо поставить на расстоянии 1 м от линзы, а экран — в ее фокальной плоскости. Учащийся смотрит через линзу на отверстие в экране (в направлении лампочки). Он увидит увеличенное изображение отверстия с резко очерченными краями. Если медленно удалять экран от линзы, то сначала в светлом круге, края которого делаются расплывчатыми, можно различить несколько колец. По мере удаления экрана число видимых колец уменьшается, а кольца становятся более отчетливыми. В некоторый момент в центре появляется темное пятно, а вокруг него — два темных кольца. Продолжая удалять экран от линзы, учащийся последовательно увидит следующие картины дифракции: в центре — светлое пятно и вокруг него два темных кольца, темное пятно и вокруг него одно темное кольцо; светлое пятно и вокруг него одно темное кольцо; темное пятно и ни одного кольца; наконец в области света ни пятна, ни кольца, а в области геометрической тени — дифракционные кольца.

В этих картинах особенно примечательна взаимная смена черного и светлого пятен в центре. Объяснение происхождения этих пятен дано Френелем (с помощью его метода зон).

18. ДИФРАКЦИЯ ОТ КВАДРАТА И СЕТКИ

Оборудование. Линза 1, лампочка от карманного фонарика и пластинка с квадратом и сеткой, образованными пересекающимися узкими щелями.

Стеклянную пластинку размером примерно $4,5 \times 6$ см следует покрыть тушью и, когда она высохнет, прорезать в ней щели (лучше ножом, чем лезвием бритвы), чтобы получились квадрат и сетка (рис. 48). Сторона квадрата и расстояния между параллельными щелями в сетке должны быть примерно от 1 до 2 мм, но одинаковыми. Затем пластинку с квадратом и сеткой надо накрыть другой пластинкой и окантовать.

Ход работы. Учащийся при помощи линзы будет наблюдать дифракционную картину, которая представлена на рис. 48 (внизу).

Картина дифракции от сетки представляет собой своеобразный узор с многократно повторяющейся дифракционной картиной от квадрата.

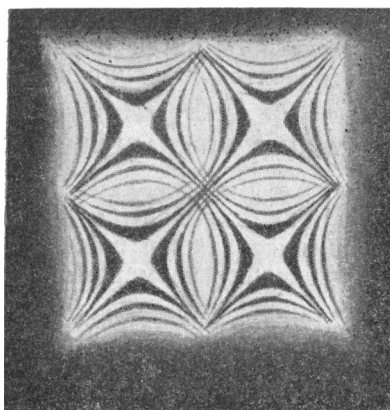
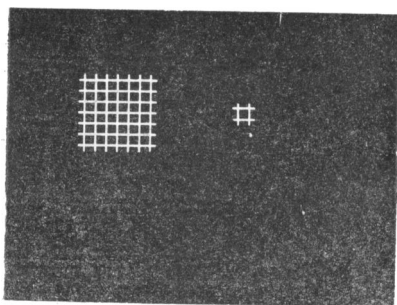


Рис. 48 Квадрат и сетка, прорезанные в слое туши, нанесенной на стеклянную пластинку, и дифракционная картина, наблюдаемая от квадрата

19. НАБЛЮДЕНИЕ СПЕКТРОВ С ПОМОЩЬЮ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ

Оборудование. Отражательные дифракционные решетки разного периода и источник света.

Решетки можно сделать из долгоиграющей и из обыкновенной грампластинки. Долгоиграющую пластинку следует выбрать самую маленькую. Ее легче разрезать, так как она тоньше. Пластинку делят на 16 равных секторов и затем у каждого сектора удаляют узкую часть, не покрытую штрихами.

В качестве источника света можно использовать одностороннюю или обыкновенную электрическую лампу, керосиновую лампу с плоским фитилем и, наконец, щель (высотой 40 см и шириной 1—1,5 см) в экране (высотой 70 см и шириной больше окна), помещенном против окна.

Ход работы. Удалившись от источника света на расстояние 3—6 м, наблюдателю следует приставить к глазу немного правее (или левее) его середины округлый край решетки (прежний край грампластинки). Решетка устанавливается так, чтобы ее плоскость проходила через нить накала односторонней лампы, через ребро пламени керосиновой лампы или щель в экране. Затем медленно около глаза поворачивают решетку по часовой стрелке вокруг оси, которой должен являться край решетки около глаза (если этот край был левее середины глаза, то решетку надо поворачивать против часовой стрелки). При этом можно заметить несколько дифракционных спектров. Дается задание сравнить дифракционные спектры 1, 2 и 3-го порядков; сопоставить спектры, полученные с помощью решетки из обыкновенной и долгоиграющей грампластинки; сравнить относительную протяженность красного и сине-фиолетового участков в дифракционном и в призматическом спектре.

Представляется целесообразным наблюдать дифракционных спектров организовать после демонстрации непрерывного спектра с помощью призмы.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

20. ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Оборудование. Источник света, стопа стеклянных пластинок, линза *1*, аквариум с водой, тушь, физический штатив с разными держателями, два подъемных столика.

В качестве источника света используется осветитель для теневой проекции с самой малой диафрагмой.

Для изготовления стопы надо разрезать продольно пополам восемь негативов размером 9×12 см, предварительно удалив с них фотопленку. Полученные пластинки можно скрепить колпачками из жести (рис. 49).

Аквариум устанавливается на двух подъемных столиках, в воду добавляется тушь (несколько капель, в зависимости от емкости аквариума). Благодаря рассеянию света взвешенными в воде частицами туши след проходящего через аквариум светового пучка хорошо виден. Воду можно замутить также несколькими каплями молока или раствора канфоли в спирте.

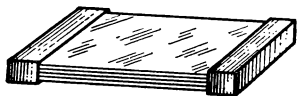


Рис. 49. Стопа стеклянных пластинок, зажатых между двумя жестяными скобами

Опыт. Приборы устанавливаются согласно рис. 50. Линзу помещают на таком расстоянии от осветителя, чтобы световой пучок в аквариуме немного суживался. Расстояние от аквариума до линзы должно быть немного больше длины стопы.

Надо обратить внимание учащихся на то, что яркость светового пучка со всех сторон одинакова. Между линзой и аквариумом помещают стопу так, чтобы свет на ее поверхность падал перпендикулярно, а длинное ребро стопы было расположено горизонтально. При этом яр-

кость светового пучка несколько уменьшится, но опять-таки со всех сторон будет одинакова. Если же вращать стопу вокруг вертикальной оси, проходящей через ее середину, то можно заметить, что по мере увеличения

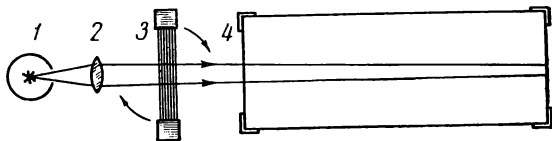


Рис. 50. Схема демонстрационного опыта по поляризации света:

1 — осветитель для теневой проекции; 2 — лабораторная линза 1 ($F_1 = 7$ см); 3 — стопка стеклянных пластинок, 4 — аквариум с водой

угла падения света на стопу яркость его с боков постепенно убывает, а сверху (и снизу) остается почти неизменной. Плоскость падения света на стопу в этом опыте горизонтальна и проходит через две противоположные стороны пучка с пониженной яркостью.

Теперь снова надо установить стопу так, чтобы свет падал на нее перпендикулярно, но длинное ребро ее расположить вертикально и вращать стопу вокруг горизонтальной оси. На этот раз при увеличении угла падения света яркость светового пучка в аквариуме убывает не с боков, а сверху и внизу; с боков же остается почти неизменной. В этом случае плоскость падения света расположена вертикально и тоже проходит через две стороны пучка с пониженной яркостью.

Из этого опыта можно сделать вывод, что световые колебания поперечны. В самом деле, ведь только поперечными колебаниями можно объяснить обнаруженную неодинаковую яркость светового пучка с разных сторон. Можно полагать, что уменьшение яркости обусловлено отсутствием колебаний некоторых определенных направлений, отсеянных стопой путем отражения. Считают, что это колебания, перпендикулярные плоскости падения и, следовательно, параллельные границе двух сред¹.

¹ Методически целесообразнее опыт по поляризации света ставить с поляроидами и речь вести не о плоскости падения света, а о плоскости колебаний. (Прим. ред.).

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

21. НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТР

Оборудование. Оптическая скамья ФОС, призма флинт и экран.

Установку приборов нужно произвести в соответствии с инструкцией, прилагаемой к оптической скамье. Только из объектива следует вывинтить заднюю линзу. От этого он станет более длиннофокусным и потому на экране образуется более широкий спектр. Так, например, при расстоянии от призмы до экрана в 5 м спектр получается шириной более 1 м.

22. ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ

Оборудование. Спектральные трубки с водородом, ртутью и азотом, высоковольтный индуктор, аккумулятор, призма прямого зрения, трапециевидная стеклянная пластинка.

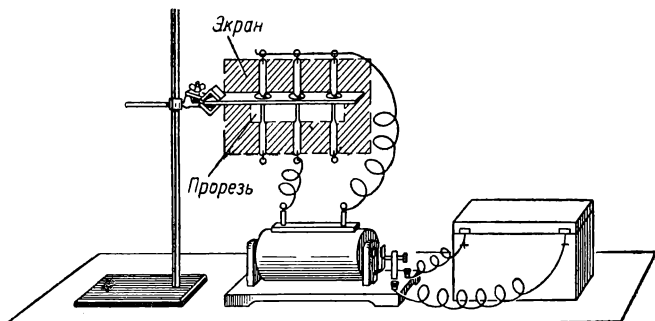


Рис. 51. Установка для фронтального наблюдения линейчатых и полосатых спектров различных газов

Спектральные трубки удерживаются в планке из фанеры, в которой сделаны три отверстия, при помощи картонных шайб с прорезями, одетых на капиллярную часть трубок. Планка крепится между лапками держателя физического штатива (рис. 51).

Через верхние колечки спектральных трубок пропущен провод, соединенный с одним борном индуктора. На нижние колечки во время опыта поочередно навешивается крючок для включения трубки в цепь вторичной обмотки индуктора.

На экспериментальном столе устанавливается штатив со спектральными трубками, высоковольтный индуктор и аккумулятор. Широкие части спектральных трубок загораживаются от класса картонным экраном с широким горизонтальным просветом, позволяющим видеть только капиллярные части спектральных трубок.

Ход работы. Ученики получают призмы прямого зрения, полученные из спектроскопов прямого зрения, и трапециевидные стеклянные пластинки со схемами хода лучей в них. Надо проинструктировать учащихся, как пользоваться спектральными аппаратами.

Ось тубуса с призмой прямого зрения направить на спектральную трубку, обратив к правому глазу тот конец тубуса, где находится призма; выступающее ребро призмы установить параллельно капиллярной части спектральной трубки.

На какую-нибудь подставку, примерно на одном уровне с капиллярной частью спектральной трубки, положить картон со схемой хода луча в трапециевидной пластинке; прямую, изображающую падающий на пластинку луч, направить на спектральную трубку (стрелка этой прямой, конечно, должна быть обращена острием к наблюдателю). Установив надлежащим образом схему, наложить на нее трапециевидную пластинку. Во время наблюдения спектра смотреть на пластинку по прямой, изображающей на схеме выходящий из пластинки луч.

Учитель затемняет класс и включает спектральную трубку в цепь вторичной обмотки высоковольтного индуктора. Сначала учащиеся наблюдают линейчатые спектры — ртути и водорода (спектр ртути раньше), а затем полосатый спектр — азота.

Учащиеся наблюдают спектры и с помощью призмы прямого зрения и при помощи трапециевидной пластинки. Благодаря большей линейной дисперсии и разрешающей способности призма прямого зрения дает более длинный спектр и с большим числом спектральных линий, но спектральные линии, наблюдаемые при помощи трапециевидной пластинки, более яркие.

Учащимся рекомендуется сопоставить наблюдаемые спектры с таблицами спектров, помещенными в учебнике физики.

23. СПЕКТР СОЛНЦА

1-й вариант

Оборудование. Спектроскопы прямого зрения.

Ход работы. Работу по наблюдению фраунгоферовых линий в солнечном спектре проще всего провести, используя спектроскопы прямого зрения. Предварительно нужно во всех спектроскопах отрегулировать щель. Чаще всего ее приходится суживать, но до известного предела, когда фраунгоферовы линии сравнительно хорошо видны, а дефекты краев щели, порождающие продольные линии и полосы, не очень дают себя знать.

Во время работы учащиеся должны сопоставить наблюдаемый спектр со спектром Солнца, изображенным в учебнике.

Следует обратить внимание учащихся на главные фраунгоферовы линии.

2-й вариант

Оборудование. Призмы прямого зрения, трапециевидные стеклянные пластинки и два-три больших экрана с вертикальной щелью высотой 20 см и шириной в 0,5 мм.

Ход работы. Экраны следует повесить против окон, через которые свет от небосвода может проникать в класс.

Призму прямого зрения надо держать перед глазом так, чтобы ось тубуса была направлена на щель в экране и преломляющие ребра призмы были параллельны щели.

Чтобы лучше рассмотреть отдельные фразунгоферовы линии, следует менять расстояние до щели. Так, например, если подойти ближе к экрану со щелью, то можно различить линию G , которую не удастся увидеть в спектроскоп прямого зрения. Наоборот, некоторые линии, например, в красном участке спектра, лучше различимы с большего расстояния.

Трапецевидную пластинку, которую приходится держать в руке, труднее наводить на щель, чем призму прямого зрения. Поэтому один ученик (наблюдатель) между большим и указательным пальцами правой руки держит пластинку и под ней — картон со схемой хода лучей через нее, а правым глазом смотрит на меньшую из двух непараллельных граней пластинки. Другой ученик (ассистент) наводит картон, а вместе с ним и пластинку на щель. Потом учащиеся меняются ролями.

Ученик, уже имеющий некоторое представление о спектре Солнца, сначала заметит линии b и F . Приблизившись к щели, он различит линии D и G , а удалившись от нее, он увидит линию E . Можно заметить также две-три линии в красном участке спектра и, кроме того, одну-две линии — в зеленом участке и между линиями F и G .

24. СПЕКТРЫ СОЛНЦА И НАТРИЯ

Оборудование. Большой экран с узкой вертикальной щелью, спиртовка, плоское зеркало, призма прямого зрения, подъемный столик, штативы.

Ход работы. На рис. 52 а показано в плане расположение приборов для данного опыта, а на рис. 52 б общий вид всей установки.

Смотря в призму прямого зрения, наблюдатель увидит посередине поля зрения довольно широкую горизонтальную черную полосу с узкой вертикальной желтой полоской. Это — спектр натрия. Над и под ним виден спектр Солнца. Желтая спектральная линия натрия вверху и внизу смыкается с линией D в спектре Солнца.

На основании обнаруженного в этом опыте совпадения темной линии поглощения в спектре Солнца и светлой линии в спектре натрия можно сделать заключение о присутствии раскаленных паров натрия в атмосфере Солнца.

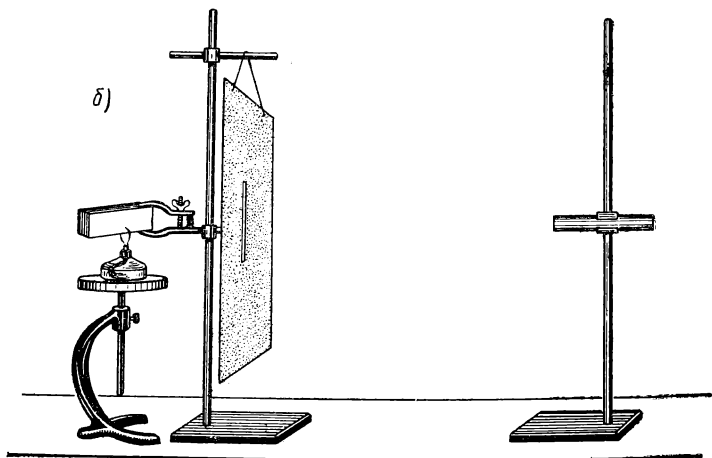
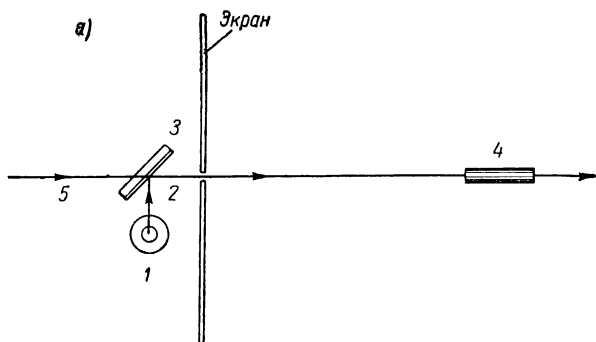


Рис 52. Установка для сопоставления спектров Солнца и паров натрия:

а — схема установки; *б* — общий вид установки:

1 — спиртовка на подъемном столике; 2 — узкий пучок света спиртовки, падающий на плоское зеркало 3 и после отражения проходящий через щель в экране и дальше через призму прямого зрения 4 к наблюдателю. Пучок света 5 от небосвода проходит над плоским зеркалом и под ним, а дальше через щель в экране к призме прямого зрения

П Р И Л О Ж Е Н И Е

ФОТОГРАФИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН

С фотографированием картин дифракции света обычно и не без основания связывается представление о целом ряде трудно осуществимых условий. Так, в классических, непревзойденных опытах проф. В. К. Аркадьева расстояние от источника света до фотопластинки доходило до 40 м, а в опыте Г. М. Городинского и Л. К. Левского (журн. «Физика в школе», 1954, № 1, стр. 65) — до 15 м. Кроме того, в этих опытах был необходим мощный источник света — электрическая дуга у Аркадьева, ртутная лампа сверхвысокого давления у Городинского и Левского. Наконец, из-за слабой яркости изображения на фотопластинке, обусловленной применением светофильтра и большим расстоянием от источника света, требовались весьма длительная выдержка и очень хорошее затемнение.

Для того чтобы эта интересная работа по фотографированию картин дифракции могла быть выполнена в школе, нужно было изыскать иной, легче осуществимый способ фотографирования. После ряда неудач нам удалось найти решение этой задачи, которое, на наш взгляд, доступно любой школе. Необходимые для этого условия таковы: в качестве точечного источника света используется лабораторная лампочка (от карманного фонарика) на стойке и с колпачком; светофильтр не применяется, так как и без него картина получается достаточно отчетливая; максимальное расстояние от лампочки до фотоаппарата не больше 6 м, а чаще — значительно меньше; применяется не диапозитивная, а негативная пленка, заряженная в фотоаппарат «Зенит»

(или другой аппарат с зеркальной наводкой на резкость)); очень хорошее затемнение не обязательно.

Как же нужно фотографировать?

Расположение приборов для фотографирования показано на рис. 53, где 1 — лампочка на стойке, 2 — объ-

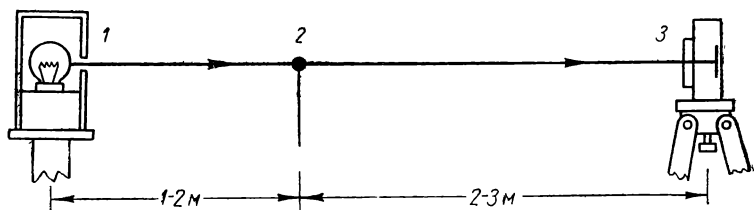


Рис. 53. Установка для фотографирования дифракционных картин

ект, дифракция от которого наблюдается и фотографируется, и 3 — фотоаппарат «Зенит».

Лампочка должна быть использована как точечный источник света. С этой целью на ее баллон надевается склеенная из черной бумаги трубочка с отверстием диаметром 1—1,5 мм. Оно должно приходиться против конца нити накала лампочки.

Объект (тот или другой экран) устанавливается на расстоянии 1—2 м от лампочки и помещается в самую яркую часть светового пучка, которая определяется с помощью белого экрана.

Фотоаппарат «Зенит» без объектива (последний совсем не нужен для фотографирования) помещается на расстоянии 2—3 м от объекта. С помощью зеркального видоискателя наблюдают картину дифракции. Фотоаппарат перемещают по отношению к объекту и устанавливают его на таком расстоянии, чтобы было видно достаточное количество деталей, и картина дифракции получилась резкая и отчетливая.

Затвор аппарата нужно приводить в действие при помощи тросика, что устраняет колебания аппарата при фотосъемке.

Фотосъемка производилась нами в затемненном помещении, но не очень плотные шторы пропускали немало света. Однако пленка не засвечивалась, так как она находилась в аппарате на большой глубине от отверстия, как бы в глубине ниши.

Была использована нормальная изопанхроматическая пленка. При чувствительности в 90 единиц по ГОСТ хорошие результаты получились при выдержке в 10—15 сек., а при чувствительности в 45 единиц — около 30 сек.

Пленка обрабатывалась обыкновенным пленочным проявителем или разбавленным проявителем для фотобумаги, при этом получались неплохие негативы.

Многие рисунки с картинами дифракции, встречающиеся в данной книжке, представляют собой фотоснимки, полученные описанным способом.

При фотографировании картины интерференции, наблюдаемой в опыте с зеркалами Френеля, расположение приборов (рис. 54) и расстояния между ними были иные, чем при фотосъемке дифракционных картин. Зеркала Френеля были установлены на расстоянии 0,8 м от лампочки и 0,6 м от фотоаппарата. Экран 4 необходим для устранения засвечивания пленки прямыми лучами от осветителя.

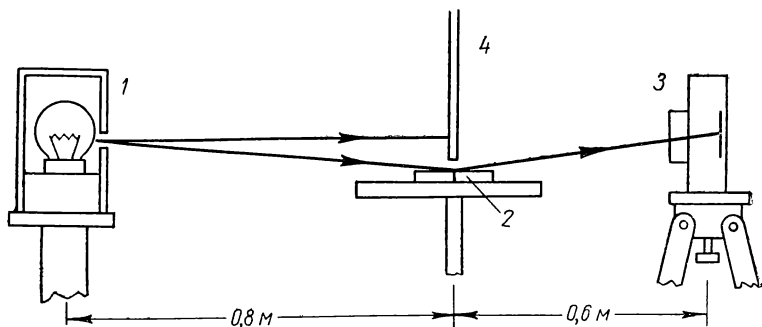


Рис. 54. Установка для фотографирования интерференционной картины, полученной при помощи зеркал Френеля

Нам думается, что описанная выше работа по фотографированию картин дифракции и интерференции может быть включена в программу занятий школьного фотокружка, а полученные фотоснимки могут быть с успехом использованы для инструкционных карточек к лабораторным работам по волновой оптике и выполненные в крупном плане могут применяться в виде таблиц при повторении темы «Волновые свойства света».

ЛИТЕРАТУРА

- В. Брэгг. Мир света. М., 1935.
С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1950.
Р. Вуд. Физическая оптика. ОНТИ. Л.—М., 1936.
Д. Д. Галанин и др. Физический эксперимент в школе. Т. VI. Учпедгиз, М., 1941.
Г. С. Горелик. Колебания и волны. Гостехиздат. М.—Л., 1950.
Х. Гюйгенс. Трактат о свете. ОНТИ. М.—Л., 1935.
П. А. Знаменский. Вопросы волновой теории света в курсе физики средней школы. Изд-во АПН РСФСР. М., 1954.
Г. С. Ландсберг. Оптика. Гостехиздат. М., 1947.
Г. С. Ландсберг (ред.). Элементарный учебник физики. Т. III. Гостехиздат. М., 1957.
А. Б. Млодзеевский. Лекционные демонстрации по физике. Вып. 4. Оптика. Гостехиздат. М.—Л., 1949.
И. Ньютон. Оптика. Гостехиздат. М., 1954.
Р. В. Поль. Введение в оптику. Гостехиздат. М.—Л., 1947.
О. Френель. Избранные труды по оптике. Гостехиздат. М., 1955.
О. Френель. О свете. Госиздат. М.—Л., 1928.

Михаил Николаевич Башкатов
и Юрий Филиппович Огородников
ШКОЛЬНЫЕ ОПЫТЫ ПО ВОЛНОВОЙ ОПТИКЕ

Редактор А. А. Шапошникова

Обложка М. А. Силкиной

Худож. редактор Л. В. Голубева. Техн. редактор В. Г. Лаут.

Корректор В. Д. Ковалёва

Сдано в набор 9/III 1960 г.	Подписано к печати 10/VI 1960 г.	
Формат $84 \times 108 \frac{1}{32}$	Бум. л. 1,25+вкл. 0,06	Печ. л. 5,0+вкл. 0,25
Усл. п. л. 4,10+вкл. 0,21		Уч.-изд. л. 4,02
А 03797	Тираж 12 300	Зак. 172

Изд-во АПН РСФСР, Москва, Погодинская ул., 8.
Типография изд-ва АПН РСФСР, Москва, Лобковский пер., 5/16.
Цена 1 р. 10 к.

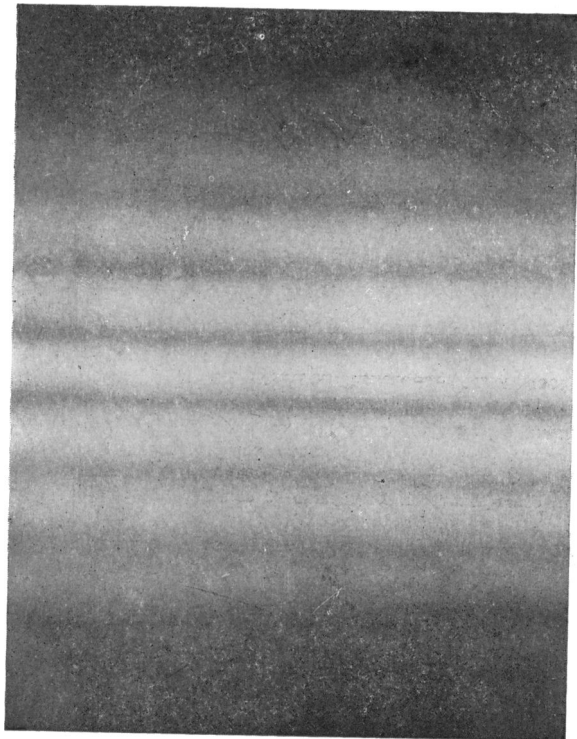


Рис. 1. Интерференционная картина в демонстрационном опыте Юнга

Условия съемки снимок получен на пленке изопанхром, чувствит. 90 ед ГОСТ без фотоаппарата; показывает натуральную величину картины интерференции при расстоянии 1 м экрана от двойной щели, у которой расстояние между серединами щелей равно 0,06 мм. Выдержка 20 сек.

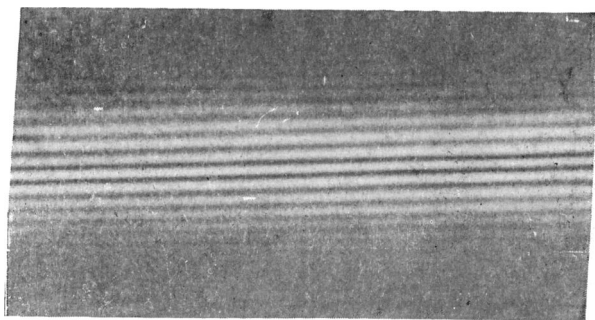


Рис. 2 Картина интерференции, видимая при помощи зеркал Френеля

Снимок сделан на пленке ФЭД, изопанхром, чувствит. 90 ед ГОСТ Фотоаппарат «Зенит» без объектива Расстояние от лампочки до зеркал — 0,8 м, от зеркал до аппарата — 0,6 м. Выдержка 8 сек.

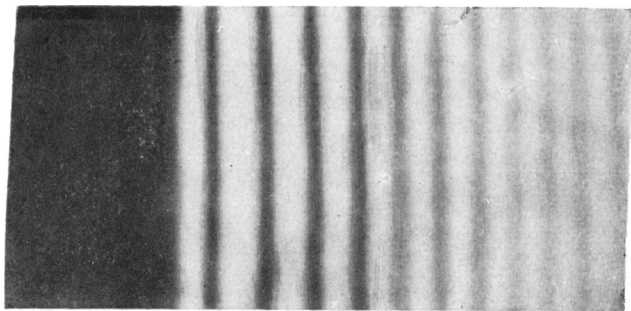


Рис. 3. Полосы интерференции, полученные от воздушного клина.

Условия съемки фотография получена на пленку ФЭД, изопанхром, чувствит 90 ед ГОСТ с экрана на расстоянии 1 м от фотоаппарата «Зенит» с нормальным объективом и красным светофильтром Выдержка 40 сек

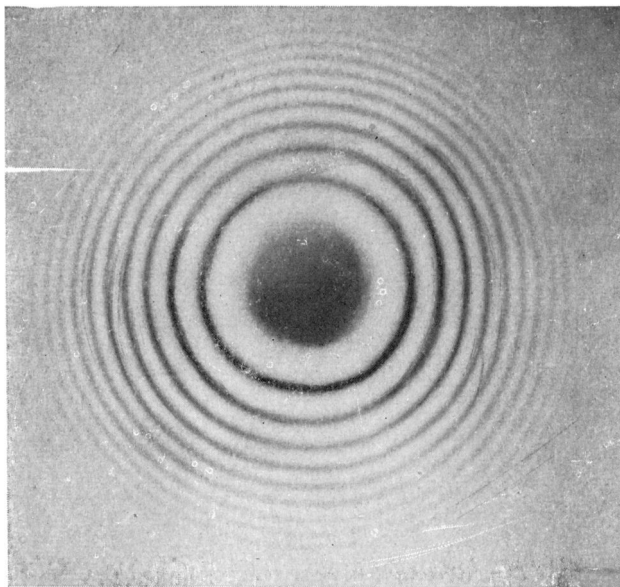
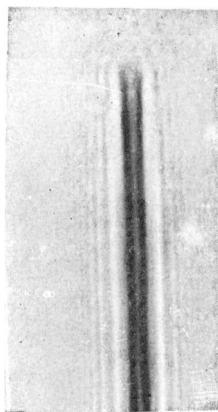
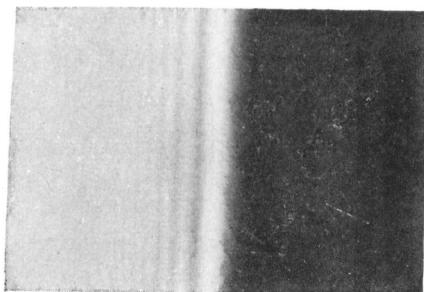


Рис. 4. Кольца Ньютона.

Условия съемки прибор освещался рассеянным светом от небосвода. Фотоаппарат «Зенит» с объективом Юпитер-8. Красный светофильтр Пленка изопанхром, чувствит. 90 ед. ГОСТ. Расстояние аппарата до установки — 20 см. Выдержка 1 сек Диафрагма — 8

Рис. 5. Дифракция от края широкого экрана
Условия съемки пленка ФЭД изопанхром, чувствит 90 ед ГОСТ Камера «Зенит» без объектива
Расстояние от лампочки карманного фонаря до экрана — 48 м, от экрана до аппарата — 12 м. Выдержка — 18 сек.



a

б

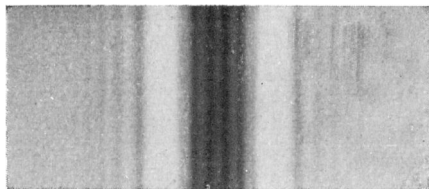
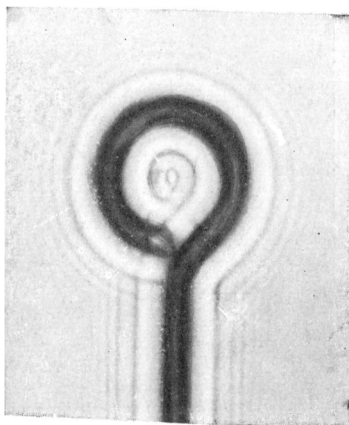


Рис. 6. Дифракционные картины, полученные от иглы (а), спицы (б) и проволочного кольца (в).

Условия съемки. пленка ФЭД, изопанхром, чувствит. 90 ед ГОСТ. Камера «Зенит» без объектива
Расстояние от лампочки карманного фонаря до экранов — 4,5 м, от экранов до аппарата — 1 м
Выдержка — 15 сек.



в

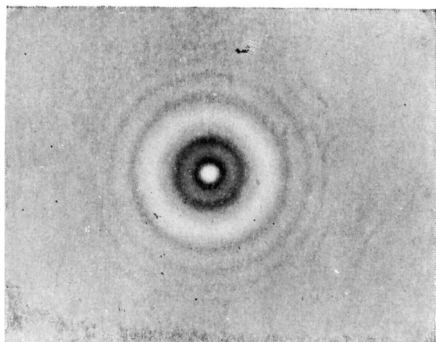


Рис. 7. Дифракционная картина, полученная от малого круглого экрана.
Условия съемки пленка ФЭД, изопанхром, чувствит 90 ед ГОСТ. Камера «Зенит» без объектива. Расстояние от лампочки до экрана — 4 м, от экрана до аппарата — 1 м.
Выдержка — 10 сек

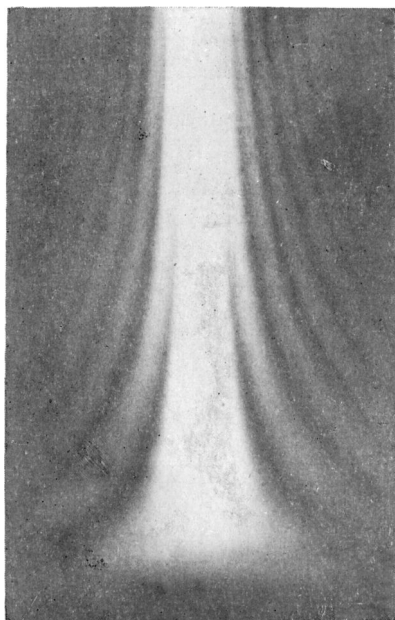


Рис. 8. Дифракционная картина, полученная от клиновидной щели.

Условия съемки пленка ФЭД, изопанхром, чувствит 90 ед. ГОСТ. Фотоаппарат «Зениг» без объектива. Расстояние от лампочки карманного фонаря до щели — 12 м, от щели до аппарата — 0,8 м. Выдержка — 20 сек.

1 р. 10 к.

