

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 53

АПРЕЛЬ 2010

№ 4

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ НАУЧНЫХ РАБОТ НА ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ СПбГУ ИТМО

Под редакцией

доктора технических наук, профессора Г. Н. Лукьянова

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	
Серебряков В. А. Взаимодействие лазерного ИК-излучения с биологическими тканями. Лазерная диагностика заболеваний.....	7
Кузнецов К. Ю., Нагибин Ю. Т., Трофимов В. А. Математическое моделирование напряженного состояния роговой оболочки глаза человека.....	15
Воронин А. А., Дмитриев И. А., Лукьянов Г. Н., Рыбина Л. А. Измерительный комплекс для исследования колебательных процессов в человеческом организме.....	18
Никущенко Е. М. Волоконно-оптический осветитель для системы обеззараживания воды.....	22
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ИЗМЕРЕНИЙ	
Артемьев В. В., Белов Н. П., Смирнов А. В., Яськов А. Д. Помехоустойчивый оптико-электронный измеритель скорости перемещения протяженного объекта..	27
Котов И. Р., Майорова О. В., Прокопенко В. Т. Измерение локальных наклонов диффузно отражающих объектов с использованием метода голографической интерферометрии.....	32
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРОВ И МАТЕРИАЛОВ	
Кораблев В. А., Нагибин Ю. Т., Шарков А. В. Исследование режимов работы лампы накачки лазера при различных способах охлаждения.....	35

Бубнов Ю. З., Бирюлин Г. В., Егоров В. И., Постернаков С. В. Анализ тепловых режимов полупроводниковых сенсоров	38
Данилов Д. А., Егоров В. И., Фадеева С. В., Шарков А. В. Моделирование тепловых режимов электронных систем с естественной вентиляцией	41
Костенко К. С., Лукьянов Г. Н., Петров Д. С. Экспериментальное исследование динамики теплообмена через ограждающую конструкцию	45
Волков Д. П., Успенская М. В. Теплопроводность наполненных полимеров	49
ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАТЕРИАЛЫ	
Беликов А. В., Пушкарёва А. Е., Скрипник А. В., Струнина Т. В., Шатилова К. В. Лазерное текстурирование поверхностей материалов	52
Яковлев Е. Б., Свирина В. В., Сергаева О. Н. Особенности плавления металлов при действии ультракоротких лазерных импульсов	57
РАЗНОЕ	
Соловьев В. С., Успенская М. В., Сиротинкин Н. В. Полимерные водопоглощающие композиции с повышенной прочностью	63
Тогатов В. В., Гнатюк П. А., Терновский Д. С. Теория сверхбыстрого выключения МОП-транзистора	66
SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)	71

SPECIAL ISSUE

MAIN LINES OF SCIENTIFIC INVESTIGATIONS CARRIED OUT AT DEPARTMENT OF PHYSICAL ENGINEERING, ST. PETERSBURG STATE UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES, MECHANICS AND OPTICS

Edited by G. N. Lukyanov, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE	5
STUDY OF BIOLOGICAL OBJECTS	
Serebryakov V. A. Interaction of IR-Laser Radiation with Biological Tissues. Laser Diagnostics of Diseases	7
Kuznetsov K. Yu., Nagibin Yu. T., Trofimov V. A. Mathematical Modeling of Human Cornea Stress	15
Voronin A. A., Dmitriev I. A., Lukyanov G. N., Rybina L. A. Measuring System for Investigation of Oscillation Processes in Human Organism	18
Nikuschenko E. M. Fiber Optic Illuminator for Water Disinfection System	22
THEORY AND PRACTICE OF MEASUREMENTS	
Artemiev V. V., Belov N. P., Smirnov A. V., Yaskov A. D. Noise-Immune Opto-Electronic Instrument for Measurement of Lengthy Object Velocity	27
Kotov I. R., Maiorova O. V., Prokopenko V. T. Measurement of Local Slopes of Diffusely Reflecting Objects with the Use of Holographic Interferometry	32
STUDY OF THERMAL CHARACTERISTICS OF INSTRUMENTS AND MATERIALS	
Korablev V. A., Nagibin Yu. T., Sharkov A. V. Study of Operation Conditions of Laser Pump Lamp at Different Cooling Techniques	35
Bubnov Yu. Z., Birylin G. V., Egorov V. I., Posternakov S. V. Analysis of Thermal Regimes of Semiconductor Sensors	38
Danilov D. A., Egorov V. I., Fadeeva S. V., Sharkov A. V. Modeling of Thermal Regimes of Electronic Systems with Natural Ventilation	41
Kostenko K. S., Lukyanov G. N., Petrov D. S. Experimental Study of Dynamics of Heat Exchange Through Enclosure	45
Volkov D. P., Uspenskaya M. V. Thermal Conductivity of Filled Polymers	49

EFFECTS OF LASER RADIATION ON MATERIALS

Belikov A. V., Pushkareva A. E., Skripnik A. V., Strunina T. V., Shatilova K. V. Laser Texturing of Material Surface.....	52
Yakovlev E. B., Svirina V. V., Sergaeva O. N. Peculiarities in Melting of Metal under Exposure to Ultra Short Laser.....	57
MISCELLANEA	
Soloviev V. S., Uspenskaya M. V., Sirotinkin N. V. Polymer Water-Absorbing High-Strength Composites	63
Togatov V. V., Gnatyuk P. A., Ternovsky D. S. Theory of Ultraspeed Switchdown of MOP-Transistors.....	66
SUMMARY	71

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий выпуск посвящен основным направлениям исследований на инженерно-физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО, ранее ЛИТМО).

Инженерно-физический факультет (ИФФ) был организован в 1946 г. для подготовки специалистов в области физической оптики, электроники, рентгенографии и ядерной физики. В 1955 г. ИФФ был закрыт в связи с реорганизацией структуры ЛИТМО, а кафедры переведены на существовавшие в то время оптический и радиотехнический факультеты.

В 1975 г. на базе факультета оптико-электронного приборостроения, созданного, в свою очередь, на базе радиотехнического факультета, был возрожден инженерно-физический факультет. Сегодня в состав факультета входят следующие кафедры:

- лазерных технологий и экологического приборостроения,
- лазерной техники и биомедицинской оптики,
- компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга,
- физики и техники оптической связи,
- электроники,
- твердотельной оптоэлектроники.

На протяжении всех лет существования факультета его деятельность направлена на повышение качества образования инженеров и обеспечение фундаментальной подготовки по физической оптике, квантовой механике, статистической физике, лазерной технике и др.

На кафедрах факультета проводится исследовательская работа в области фундаментальных и прикладных наук, что позволяет готовить кадры высшей квалификации и привлекать аспирантов и студентов для участия в научном творчестве.

К основным научным направлениям, развивающимся на ИФФ, относятся: оптика и физика лазеров, лазерные технологии различного назначения, лазерная спектроскопия, спектроскопия твердого тела, тепломассообмен, сберегающие тепловые технологии, нанотехнологии элементов волоконной и интегральной оптики, электронные системы питания лазеров специального назначения, неразрушающий контроль элементов и устройств оптоэлектроники и др.

Статьи, включенные в настоящий выпуск, освещают актуальные вопросы современных исследований и дают достаточно полное представление об уровне и направлениях научных работ, проводимых на инженерно-физическом факультете СПбГУ ИТМО.

*Декан инженерно-физического факультета
Санкт-Петербургского государственного университета
информационных технологий, механики и оптики
доктор технических наук, профессор Г. Н. ЛУКЪЯНОВ*

PREFACE

This issue is devoted to the main lines of investigations carried out at Department of Physical Engineering of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics (SPBSU ITMO, former LITMO).

Department of Physical Engineering (DPE) was founded in 1946 to train specialists in physical optics, electronics, radiology, and nuclear physics. In 1955 DPE was closed in connection with reorganization of LITMO structure, and the chairs were moved to the then Optical and Radio-Technical Departments.

In 1975 Department of Physical Engineering was re-established on the base of Department of Opto-Electronic Instruments, which in its turn had branched off Radio-Technical Department. Nowadays DPE incorporates the following departments:

- Laser Technologies and Applied Ecology,
- Laser Technique and Biomedicine Optics,
- Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring,
- Optical Communications Physics and Technology,
- Electronics,
- Solid-State Optoelectronics.

During all the years, DPE activity has been aimed at high-quality training of engineers and assurance of fundamental education in physical optics, quantum mechanics, statistical physics, laser technique, etc.

Fundamental and applied scientific investigations carried out at DPE departments make it possible to graduate specialists of highest qualification and to get students involved in scientific activities.

The main areas of scientific exploration developed at DPE include: optics and physics of lasers, laser technologies of different purposes, laser spectroscopy, solid state spectroscopy, heat and mass exchange, heat-effective technologies, nanotechnologies in fiber and integral optics, electronic power supply systems for qualified lasers, nondestructive check of optoelectronic elements and devices, etc.

Articles included in this issue concern actual problems of current inquiries, and provide a full enough insight into scientific standards and the lines of investigations carried out at Department of Physical Engineering of SPBSU ITMO.

G. N. LUKYANOV,
Doctor of Technical Science, Professor,
Head of Department of Physical Engineering,
St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics

В. А. СЕРЕБРЯКОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ТКАНЯМИ. ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ЗАБОЛЕВАНИЙ

Рассматриваются вопросы взаимодействия лазерного излучения с биотканями. Обсуждаются перспективы использования диагностических лазеров: газоанализаторов на основе перестраиваемых в среднем ИК-диапазоне спектра диодных лазеров, когерентных томографов с ультравысоким разрешением на базе широкополосных источников света и терагерцовых томографов.

Ключевые слова: газоанализатор, когерентная томография, фемтосекундный лазер, фоновно-кристаллические волокна, терагерцовый диапазон.

Введение. Квантовая электроника в последние десятилетия стала одним из ведущих направлений науки и техники. Для лазерного излучения характерны: монохроматичность, острая направленность, когерентность и поляризация. Уникальное сочетание этих свойств позволяет реализовать различные механизмы взаимодействия — как тепловые (плазмообразование, абляция, испарение, плавление, нагрев), так и не тепловые (спектрально-резонансные) воздействия на вещество, оказывающие влияние на сложные атомные и молекулярные системы.

Естественно, что одной из первых возникла идея о применении лазерного излучения в медицине. Вместе с тем сложилось понимание того, что каждый вид лазерной операции и каждая лазерная методика требуют специфического сочетания основных параметров лазерного излучения и знания механизмов его взаимодействия с различными тканями [1].

Сегодня достаточно условно можно выделить три основные области применения лазеров в медицине:

— низкоинтенсивная лазеротерапия — облучение низкоинтенсивными лазерами крови человека или плохо заживающих ран, а в сочетании с фотосенсибилизаторами (фотодинамическая терапия) избирательное разрушение клеток раковой опухоли, лечение дегенерации макулы (желтое пятно на сетчатке глаза);

— лазерная термотерапия и хирургия — использование мощных (высокоэнергетических) лазеров в качестве хирургического инструмента в офтальмологии, косметологии, оториноларингологии, урологии: световой скальпель вызывает необратимые изменения в тканях — коагуляцию, испарение или абляцию ткани;

— методы неинвазивной диагностики — лазерный спектральный анализ молекул-биомаркеров в выдыхаемом воздухе при заболеваниях желудочно-кишечного тракта; оптическая томография, в том числе в терагерцовом (ТГц) диапазоне, — перспективный метод диагностики офтальмологических и раковых заболеваний.

Именно в диагностиках используются такие уникальные свойства лазерного излучения, как высокая *когерентность и поляризация*, отличающие его от обычного, пусть даже монохроматического света.

В настоящее время сектор продаж диагностических лазеров и, в первую очередь, оптических когерентных томографов показывает (по данным “Laser Focus World”, 2008 г.) ежегодный прирост в 25 % (более 15 % от полной суммы продаж медицинских лазеров).

Лазерный газоанализатор. Мысль о том, что некоторые заболевания можно обнаружить по запаху изо рта, высказал еще Гиппократ. Сегодня проведение тестов выдыхаемого воздуха на алкоголь или наличие специфических продуктов расщепления питательных веществ, свидетельствующих о присутствии в организме тех или иных бактерий (например, отвечающих за развитие язвенной болезни), получило широкое распространение [2].

Состав выдыхаемого воздуха, в котором содержатся следы около 600 летучих соединений, образуемых в организме, напрямую связан с биохимическими и физиологическими процессами, что позволяет использовать некоторые молекулы, имеющие высокую специфичность образования, в качестве биомаркеров (см. таблицу).

Молекула-биомаркер	Заболевание или стрессорная нагрузка
Оксид азота (NO)	Хронические инфекционные воспаления (гастрит, колит, язвенная болезнь)
Аммиак (NH ₃)	Острая и хроническая лучевая болезнь
Ацетон	Сахарный диабет
Метанол, этанол	Алкоголизм
Оксид углерода (CO)	Инфекция дыхательных путей, астма

Газоаналитический метод является альтернативой методам диагностики, основанным на анализе крови, или изотопной масс-спектрометрии в гастроэнтерологии. Реализация газоаналитического метода осуществляется в реальном масштабе времени, что в перспективе позволит диагностировать развитие заболеваний (таких, как диабет, рак внутренних органов, цирроз печени и др.) на более ранних стадиях.

В дальнем и среднем ИК-диапазонах излучения (2—40 мкм) расположены колебательно-вращательные (КВ) спектры поглощения большого числа молекул. КВ-спектры определяются симметрией и химическим составом молекул, что позволяет с высокой точностью относить отдельные спектральные линии к поглощающему химическому соединению [3].

Детектирование следов молекул в выдыхаемом воздухе — одна из наиболее сложных задач газового анализа, что связано, с одной стороны, с очень низкими концентрациями исследуемых соединений (1—100 млн⁻¹), а с другой — с высоким содержанием CO₂ и H₂O, на несколько порядков превышающим концентрации исследуемых молекул. Это заставляет выбирать для анализа наиболее интенсивные линии поглощения молекул, располагающиеся в „окнах прозрачности“ в спектрах пропускания H₂O и CO₂.

В начале 80-х гг. прошлого века создание лазерного ИК-газоанализатора базировалось на достаточно сложной схеме с использованием нелинейных преобразований частоты излучения твердотельных лазеров. Сегодня наиболее эффективным методом газового анализа является диодная лазерная ИК-спектроскопия, что обусловлено сочетанием узкой линии спектра ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-7}$) и широкодиапазонной перестройки частоты генерации узкозонных полупроводников (тройные и четверные соединения PbS_nTe, PbSSe, PbE_nS_eTe) в диапазоне 2—40 мкм.

Низкий уровень амплитудных и частотных шумов полупроводниковых диодных лазеров позволяет регистрировать резонансное поглощение в отдельных линиях КВ-спектров исследуемых молекул с чувствительностью к изменению оптической плотности вплоть до 10⁻⁷ и спектральным разрешением примерно 3·10⁻⁴ см⁻¹. Метод вычисления концентрации эндогенного газа основан на сравнении контуров линий поглощения в аналитическом и реперном ка-

налах, с учетом столкновительного и доплеровского уширения, и близок по своей сути к критерию Рэлея, который применяется для оценки разрешающей способности спектральных приборов.

Газоанализатор (рис. 1) функционально включает в себя диодный лазер 1 в качестве источника излучения с системой стабилизации температуры; две оптические кюветы: одна 7 — многопроходная с перестраиваемой длиной оптического пути (от 1 до 100 м), другая 6 — реперная, короткая — длиной 5 см; два приемника излучения 2 соответственно в аналитическом и реперном каналах и оптическую систему 3—5 [4].

Например, величина резонансного поглощения аммиака $^{14}\text{NH}_3$ даже для самых интенсивных линий основной изотопической модификации NH_3 на порядки меньше, чем для линий H_2O или CO_2 . Обнаружение следов аммиака в выдыхаемом воздухе ($^{14}\text{NH}_3$ — 10^{-7}) требует чувствительности анализа, превышающей 10^{-7} . Такую чувствительность можно реализовать при использовании КВ-полосы поглощения $\nu_2(0100a$ — $0000s$), линии которой расположены в диапазоне 9—11 мкм. Снижение общего давления анализируемой газовой смеси является высокоэффективным в целях улучшения условий детектирования слабого резонансного поглощения при интерференции спектров поглощения. При прямом детектировании переход от атмосферного давления к давлению около 50 мм рт.ст. обеспечивает обнаружение $^{14}\text{NH}_3$ с концентрацией на три порядка меньшей.

Однако ни методика диагностики, ни лабораторная установка по количественному определению ацетона в выдохе диабетиков пока не разработаны.

Лазерная томография как метод диагностики заболеваний. Томография — метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта посредством многократного его просвечивания в различных пересекающихся направлениях (так называемое сканирующее просвечивание). Различают методы томографии *с облучением* пациентов (обычная рентгеновская, появившаяся в конце 1960-х гг., или так называемая классическая; компьютерная рентгеновская 1963 г.; радионуклидная, или эмиссионная), и *не связанные с облучением* (ультразвуковая и магнитно-резонансная).

В настоящее время внутренние органы диагностируют, в первую очередь, рентгеновским и ультразвуковым методами. Эти методы обладают высоким пространственным разрешением, давая точную структурную информацию. Однако они имеют один общий недостаток: не всегда позволяют определить, является ли исследуемое пятно опухолью, и если является, то доброкачественная она или злокачественная.

Лазерная томография и, прежде всего, оптическая когерентная томография (ОКТ) позволяет в реальном времени создавать изображение поперечных сечений ткани, полученных при лазерном облучении с различных направлений, с разрешением в несколько микрометров на глубине до нескольких миллиметров. Метод ОКТ используется при изучении патологии глаза, перфузии крови, оксигенации тканей, неоваскуляризации в мозгу и груди.

Оптическая когерентная томография позволяет получить изображение в сильно рассеивающих средах. Принцип действия когерентного томографа (КТ) представлен на рис. 2 [5]. Рассеянный объектом пучок в интерферометре Майкельсона (одно зеркало интерферометра заменяется биотканью, а второе плечо имеет прецизионно перемещаемое зеркало) интерферирует с опорным. Изменяя задержку между ними, можно получить интерференционный сигнал с разной глубины (z) биоткани. Задержка непрерывно изменяется, благодаря чему

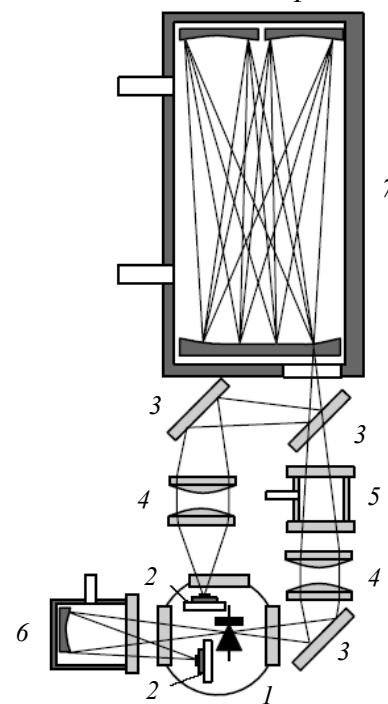


Рис. 1

частота света в одном из пучков смещается вследствие эффекта Доплера. Это позволяет выделить сигнал интерференции на сильном фоне, обусловленном рассеянием. С помощью сканирования и обработки сигналов строятся изображения разных исследуемых слоев биологической ткани в реальном масштабе времени.

Пространственное (аксиальное) разрешение по глубине $\Delta z = l_k/2 = 0,44\lambda^2/\Delta\lambda$ определяется временной когерентностью светового источника (l_k — длина когерентности): чем меньше когерентность, тем меньше минимальная толщина среза изображения исследуемого объекта.

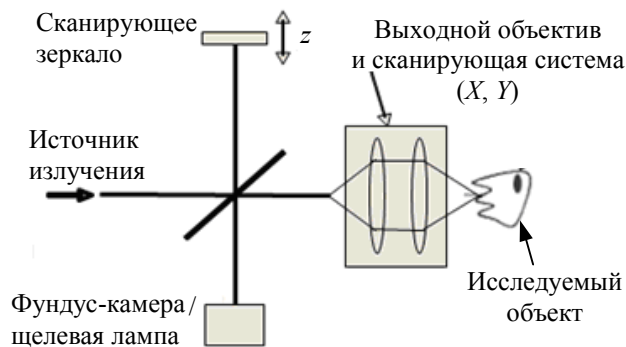


Рис. 2

Оптические когерентные томографы на основе суперлюминесцентных диодов (СЛД) имеют аксиальное разрешение $\Delta z = 10 \dots 15$ мкм (ограничено шириной полосы излучения диодов $\Delta\lambda \approx 32$ нм) и обеспечивают более детальную структурную информацию по сравнению с другими неинвазивными методами формирования изображения (правда, сильное рассеяние света в биотканях не позволяет получать изображение при $z > 2 \dots 3$ мм). Так как когерентный

томограф основан на волоконной оптике, то, в частности, офтальмологический КТ легко встраивается в щелевую лампу или фундус-камеру (предназначена для исследования глазного дна).

Когерентная ИК-томография с ультравысоким осевым разрешением. Разработка нового поколения оптических КТ осуществляется как путем повышения аксиального разрешения Δz посредством расширения спектральной полосы излучения $\Delta\lambda$ (рис. 3), так и путем увеличения глубины проникновения излучения в ткань. На основе широкополосного Ti:Al₂O₃-лазера ($\lambda = 800$ нм, длительность импульса $\tau = 5,4$ фс, $\Delta\lambda = 350$ нм) был разработан когерентный томограф с ультравысоким (около 1 мкм) осевым разрешением, на порядок превосходящим уровень разрешения стандартного КТ, использующего суперлюминесцентные диоды. В результате удалось получить *in vivo** с глубины сильно рассеивающей ткани изображение биологических клеток с пространственным разрешением, близким к дифракционному пределу оптической микроскопии, что позволяет проводить биопсию ткани непосредственно во время операции.

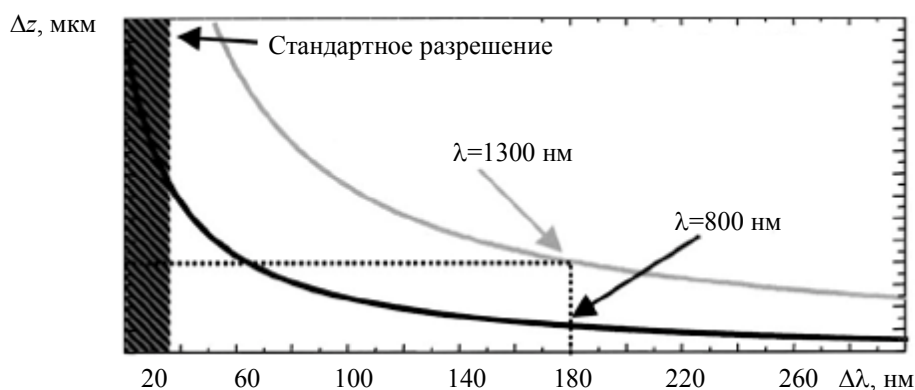


Рис. 3

Так как рассеяние сильно зависит от длины волны, уменьшаясь с ее увеличением, то большая глубина проникновения в непрозрачную ткань может быть достигнута при значении $\lambda > 0,8$ мкм. Для получения изображения структуры непрозрачных биотканей оптимальное значение $\lambda = 1,3 \dots 1,5$ мкм. Широкополосный фемтосекундный Cr:форстеритовый лазер ($\lambda = 1250$ нм) позволяет получить ОКТ-изображение с аксиальным разрешением $\Delta z \approx 6$ мкм при $z \leq 2 \dots 3$ мм.

* *in vivo* — букв.: на живом организме.

Фононно-кристаллические волокна (ФКВ) с высокой нелинейностью используются для генерации в еще более широком спектре. Фемтосекундные $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазеры с ФКВ генерируют на выходе низкокогерентные импульсы с ультраширокой полосой ($\lambda=500\dots1600$ нм). При использовании безаберрационного объектива аксиальное разрешение КТ достигает 1,1—3 мкм.

Графики зависимости $S(\lambda)$ спектральной плотности излучения широкополосных лазеров представлены на рис. 4.

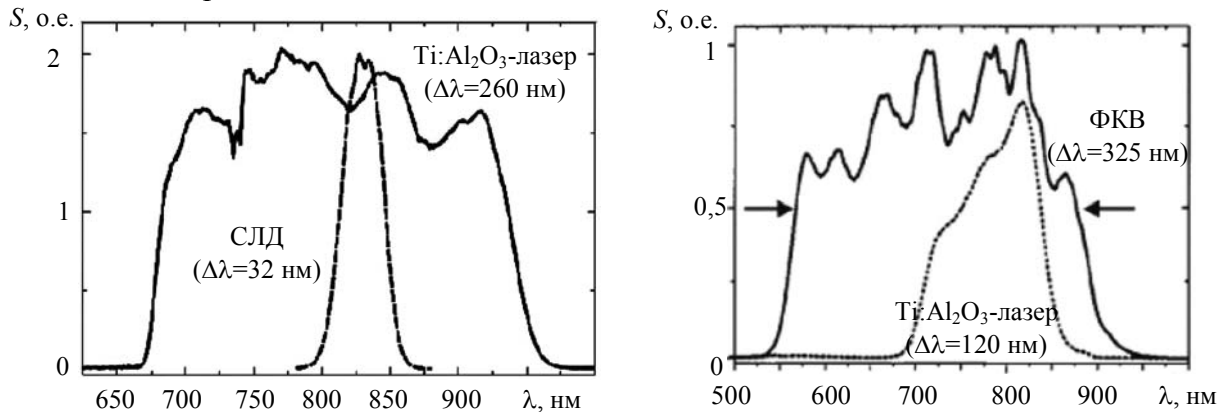


Рис. 4

Следует отметить, что при ультраширокой полосе излучения возникают новые проблемы, такие как хроматическая aberrация оптики и дисперсия групповой скорости света.

Аксиальная разрешающая способность ОКТ на 2 порядка величины превышает разрешающую способность УЗИ-томографии при неинвазивном исследовании внутренней структуры ткани. Максимальная глубина формируемого изображения в большинстве тканей (кроме глаза) ограничена оптическим поглощением и рассеянием ($z_{\max} \approx 1\dots2$ мм). Однако благодаря субклеточному внутритканевому разрешению *in vivo*, значение которого стремится к предельному разрешению *in vitro** конфокального микроскопа, эта методика расширяет возможности диагностики заболеваний: в частности, ранней диагностики рака, а также обнаружения различных глазных патологий, ведущих к слепоте.

Маловероятно, что ОКТ заменит инвазивную биопсию или гистологию, однако она позволит существенно расширить понимание патогенеза и терапии ряда тяжелых заболеваний [6].

Спектроскопическая оптическая когерентная томография. Спектроскопическая ОКТ — новая диагностическая методика, использующая фемтосекундные $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ -лазеры с широкой полосой спектра при $\lambda=800$ нм, не только обладает субклеточным разрешением ОКТ, которое недоступно для источников непрерывного излучения, но и обеспечивает также получение спектроскопической информации по всей ширине спектральной полосы излучения, перекрывающей спектр поглощения ряда биологических хромофоров. А использование внешних контрастных компандов, меняющих специфические параметры молекул, таких как время люминесценции или эмиссионный спектр, делает ОКТ потенциальной альтернативой *in vivo* диагностическим методам — позитронно-эмиссионной и магнитно-резонансной томографии.

Концептуально получение спектроскопической информации заключается в использовании нескольких широкополосных источников света с различными центральными длинами волн. Томограммы одной и той же пространственной области, но формируемые разными световыми источниками, сравниваются для извлечения спектроскопической информации. Спектр излучения фемтосекундных лазеров или широкополосных источников для увеличения осевой разрешающей способности томограмм разбивается на ряд поддиапазонов, каждый из которых детектируется как отдельный канал.

* *in vitro* — букв.: вне живого организма.

В стандартном ОКТ-изображении детектируется только огибающая интерференционного сигнала. Спектральная информация может быть получена путем измерения полного интерференционного ОКТ-сигнала с использованием числовой постобработки, например солитоноподобного (вейвлет) преобразования Морле.

Разделение спектральной полосы излучения на ряд каналов реализуется на выходе интерферометра после облучения образца полным спектром.

Например, болезнь Альцгеймера характеризуется образованием в мозгу бляшек размером 10—100 мкм. В сильно рассеивающей ткани мозга стандартная томографическая техника не позволяет получить разрешение, превышающее 0,5—1 мм. Экспериментально показано, что бляшки могут быть обнаружены люминесцентной ОКТ *in vivo*, без предварительного просвечивания мозга другими методами, и измерены с прецизионным пространственным разрешением [7—9].

Терагерцовая томография. Попытка увеличить глубину регистрации изображения в ткани была предпринята с помощью ТГц-лазеров. Область электромагнитного спектра от 0,1 до 10 ТГц ($\lambda=3$ мм...30 мкм) — пограничная область для исследования в физике, химии, биологии и медицине. В ТГц-диапазоне находятся биологически важные коллективные колебания белков.

Метод терагерцовой времяпролетной спектроскопии позволяет получить информацию при $z \leq 1...2$ см (в зависимости от содержания в ткани воды) и высокое разрешение (около 100 мкм) изображения биологических объектов. Этот метод получил быстрое развитие в основном вследствие коммерциализации ИК-лазеров с длительностью импульса $\tau \approx 100$ фс и мощностью, достаточной для возбуждения ТГц-излучения [10—11].

Компьютерная ТГц-томография позволяет реконструировать трехмерный профиль показателя преломления слабо рассеивающих объектов (типичное изображение размером 100×100 пикселей, измеренное под 18 проекционными углами может быть получено в течение 1 ч).

Светоделитель разделяет 100 фс-импульсы излучения ($\lambda = 800$ нм) на два пучка: пучок накачки, используемый для ТГц-генерации (0,1—2,7 ТГц, 1 мВт) на GaAs-широкоапертурной антенне (напряжение смещения более 1 кВ), и пробный пучок для детектирования. Излучаемые ТГц-импульсы коллимируются серией параболических внеосевых зеркал и фокусируются на образец с одновременным растровым сканированием в плоскости x, y для получения изображения. Отраженные от ткани ТГц-импульсы повторно коллимируются другой серией параболических зеркал и фокусируются на ZnTe-детектор.

Детектирование достигается за счет линейного электрооптического эффекта Поппельса. ТГц-излучение вызывает в кристалле ZnTe двойное лучепреломление. Оно фиксируется пробным лучом, поляризация которого меняется от круговой до эллиптической. Изменения, пропорциональные терагерцовому электрическому полю, детектируются балансными фотодиодами, создавая ТГц-изображение образца.

Вследствие ограниченной глубины проникновения ТГц-излучения в ткань основными областями применения этого метода являются дерматология и стоматология. Один из примеров применения ТГц-излучения — возможность определения размеров и глубины злокачественной опухоли: см., например, рис. 5, где представлено изображение меланомы, изменяющееся в зависимости от длины волны ТГц-излучения.

Другим примером может служить возможность обнаружения зубного кариеса, который не детектируется рентгеновским изображением (рис. 6).

Наряду с проблемой получения изображения при $z > 1...2$ мм в гидратированных тканях, другой фундаментальной проблемой ТГц-измерений является низкая разрешающая способность изображений. Решением этой проблемы может стать известный метод „сканирующей ближнепольной микроскопии“. Это решение сопровождается новой проблемой, а именно,

длительной записью изображения. Другой недостаток метода — трудность реализации *in vivo*, однако он может быть использован *in vitro* для получения изображения с высоким разрешением на препарированных образцах [12].

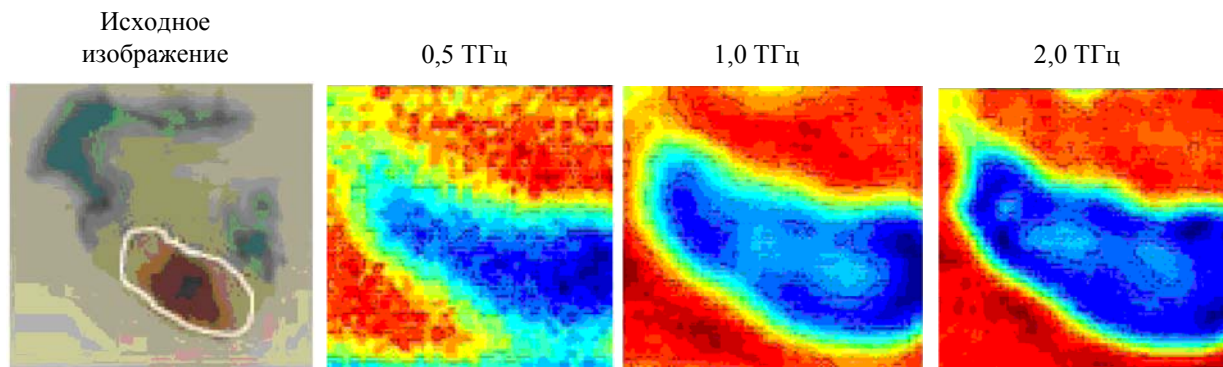


Рис. 5

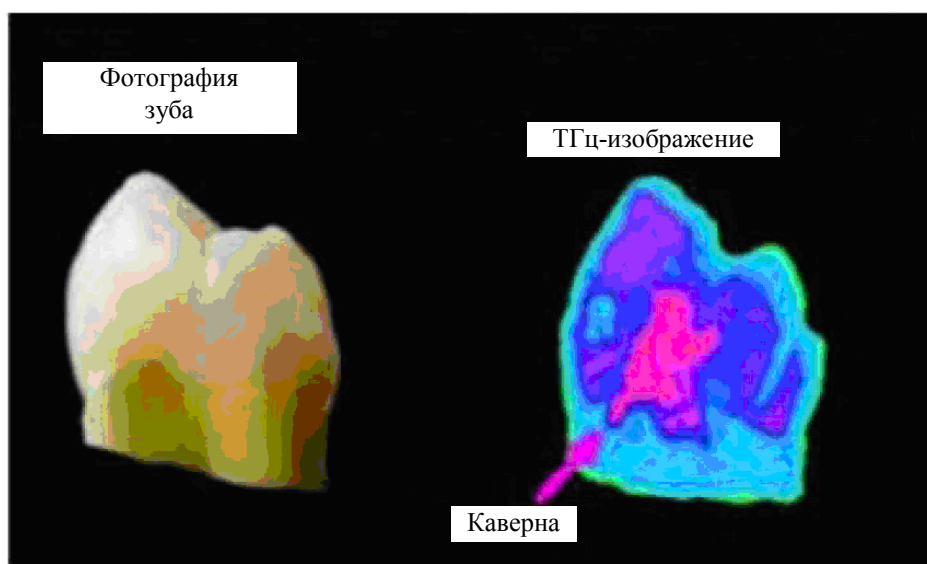


Рис. 6

Просвечивающая импульсная ТГц-спектроскопия также позволяет изучать изменение структуры (эффекты ион-ионной свертки белков) и гидратацию ферментных белков в водной среде, поскольку колебания молекул белков изменяются не только в зависимости от ее температуры, но также и в ответ на близость молекул воды. Низкочастотные коллективные моды колебаний молекул белков связаны, по-видимому, с колебаниями окружающих их молекул воды. Однако прямое измерение этих низкочастотных движений затруднено стандартными методиками типа нейтронного рассеивания [13].

Заключение. Лазеры заняли уже весьма заметную нишу в диагностике заболеваний. Это касается, в первую очередь, оптической когерентной томографии, без использования которой сегодня нельзя представить лечение ретинопатии, глаукомы и других серьезных глазных болезней. Однако поглощение и сильное рассеяние ткани и относительно небольшое поле зрения КТ ограничивает применение этого метода при исследовании патологий в плотных тканях. В настоящее время разрабатывается новый перспективный метод спектроскопической ОКТ, который может быть применен не только в офтальмологии, но и при томографии мозга или маммографии.

Терагерцовая томография, похоже, ограничена применением только *in vitro* вследствие сильного поглощения воды в ТГц-диапазоне. Тем не менее, уже разрабатываются предложения

по использованию ТГц-излучения в фармацевтической промышленности для прецизионного контроля качества (состава) лекарств, которые выпускаются в виде таблеток [14].

Продолжаются работы над лазерным газоанализатором (здесь очевидны проблемы повышения чувствительности и контраста детектируемых линий молекул-биомаркеров, т.е. проблемы приемного тракта), а также по лазерной диагностике вирусов и живых клеток при изучении патологических состояний тканей, кинетики роста и рецидива опухолей и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная лазерная медицина: Сб. М.—Берлин: Центр лазерной и медицинской технологии, 1997.
2. Бритов А. Д. и др. Медицинский газоанализатор на лазерах и фотоприемниках ближнего ИК-диапазона // Прикладная физика. 1999. № 2.
3. Степанов Е. В., Миляев В. А. Применение перестраиваемых диодных лазеров для высокочувствительного анализа газообразных биомаркеров в выдыхаемом воздухе // Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 11.
4. Wallace J. Analysis of human breath holds key to disease // Proc. of CDT. 2008.
5. Drexler W. Ultrahigh-resolution and functional OCT // Light Source Technology & Applications / Med. Univ. Vienna, 2005.
6. Drexler W. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography // J. of Biomedical Optics. 2004. N 9(1).
7. Wolbarst A. B., Hendee W. R. Evolving and experimental technologies in medical imaging // Radiology. 2006. Vol. 238(1).
8. Zawadzki R. J., Cense B. et al. Medical OCT: Ultrahigh-resolution optical coherence tomography gets adaptive-optic 'glasses' // Proc. of CST. 2008. Dec.
9. Kumar A. T. N. et al. Time Domain Fluorescence Diffuse Optical Tomography: Application to Non-Invasive Diagnosis of Alzheimer's Pathologies in Mice Brain. MA: Harvard Medical School, 2006.
10. Woodward R. M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue // Phys. Med. Biol. 2002. N 47. P. 3853—3863.
11. Wang S. T-ray imaging and tomography // Biol. Phys. 2003. N 29. P. 247—256.
12. Opportunities in THz science // DOE-NSF-NIH Workshop. Arlington, VA, 2004.
13. Xu J., Galan J., Savvidis P. et al. Terahertz circular dichroism spectroscopy of biomolecules // SPIE. 2004. Vol. 5268. P. 19—26.
14. Назаров М. М., Манькова А. М., Черкасова О. П. и др. Применение терагерцовой спектроскопии для исследования биологических молекул // Тр. VI Междунар. конф. молодых ученых и специалистов „Оптика — 2009“. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 136—138.

Сведения об авторе

Виктор Анатольевич Серебряков — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;
E-mail: serebryakov@hotmail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий
и экологического приборостроения

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

К. Ю. КУЗНЕЦОВ, Ю. Т. НАГИБИН, В. А. ТРОФИМОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РОГОВОЙ ОБОЛОЧКИ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Рассматривается возможность использования информации о напряженно-деформированном состоянии глаза человека для диагностики офтальмологических заболеваний. Описывается математическая модель напряженно-деформированного состояния глаза. Приведены результаты математического моделирования картины интерференции поляризованного света.

Ключевые слова: офтальмология, диагностика, напряженно-деформированное состояние глаза.

Лечение широко распространенного заболевания глаз — глаукомы — остается актуальной проблемой и в настоящее время. Глаукома опасна тем, что проявляется на ранних стадиях заболевания лишь повышением внутриглазного давления.

Для диагностики глаукомы используются „бесконтактные“ оптико-электронные тонометры [1], в основе действия которых лежит пневматическая аппланация (от англ. *applanation* — уплощение) роговицы глаза, что позволяет установить значение внутриглазного давления. Данный метод можно назвать бесконтактным лишь условно, так как на глаз действует пневматический импульс, а вследствие инерционности воздействия происходит нежелательная избыточная деформация роговицы глаза.

Известны также проводимые с помощью офтальмологического поляриметра [2] исследования картины интерференции поляризованного света, представляющей собой результат двойного прохождения лучей через роговицу глаза при их отражении от радужной оболочки. Наблюдаемая картина интерференции, отображающая напряженно-деформированное состояние роговицы глаза, позволяет выявить различного рода патологии и, следовательно, обеспечить возможность их диагностики [3].

Картина интерференции формируется в результате одновременного интегрального действия различных факторов, определяющих напряженное состояние тканей роговицы. Раздельное действие каждого из этих факторов невозможно определить экспериментально. Эта проблема может быть решена численными исследованиями на основе математической модели процессов взаимодействия поляризованного излучения с тканями роговицы глаза.

Математическое моделирование целесообразно осуществлять, поэтапно исследуя влияние силовых факторов на напряженно-деформированное состояние роговицы и уточняя геометрию оболочек глаза [4].

Распределения по полю роговицы нормальных усилий, вызванных действием глазодвигательных мышц и внутриглазным давлением, зависят от обеих сферических координат θ и φ (рис. 1, здесь a и b — усилия, действующие вдоль меридианов и вдоль параллелей соответственно):

$$T_1(\theta, \varphi) = T_1^* + T_1^k + T_1^c = T_1^* + \left(\frac{Sat_0 \sin \theta}{2} + Sat_1 \cos 4\varphi \cdot \sin \theta \right);$$

$$T_2(\theta, \varphi) = T_2^* + T_2^k + T_2^c = T_2^* + T_2^k - \left(\frac{Sat_0 \sin \theta}{2} + Sat_1 \cos 4\varphi \cdot \sin \theta \right),$$

где

$$at_0 = \frac{3}{S \sin^2 \theta}, \quad at_1 = \frac{5}{S \sin^2 \theta}, \quad S = \frac{-E h}{R(1+\nu)}.$$

В приведенных формулах: E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, R — радиус роговицы, h — толщина роговицы; символом „*“ обозначены величины, характеризующие основное напряженное состояние, „ k “ — напряжения при краевом эффекте, „ c “ — тангенциальные напряжения [5].

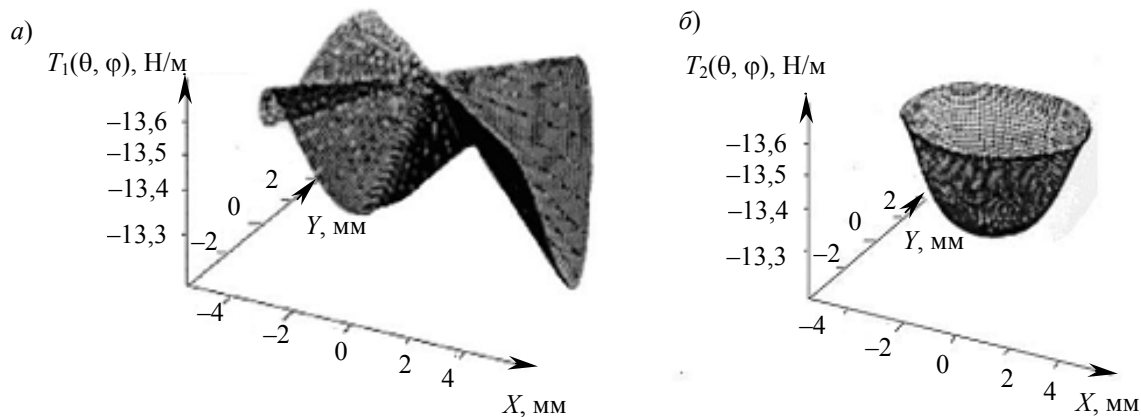


Рис. 1

При фурье-разложении функции силового воздействия глазодвигательных мышц можно допустить, что силовое воздействие определено зависимостью:

$$f(\varphi) = (1 + \cos 4\varphi)t,$$

где t — постоянная, принимаемая в расчетах равной примерно 0,0667.

Распределение по полю роговицы уровней относительной интенсивности расчетной картины интерференции, наблюдаемой при настройке кругового поляризатора в скрещенном состоянии, содержит полосы в виде концентрических окружностей (рис. 2). При возрастании внутриглазного давления у лимба роговицы возникают новые полосы, которые смещаются к центру и сгущаются по краям поля; максимум интенсивности отображается белым фоном, минимум — черным.

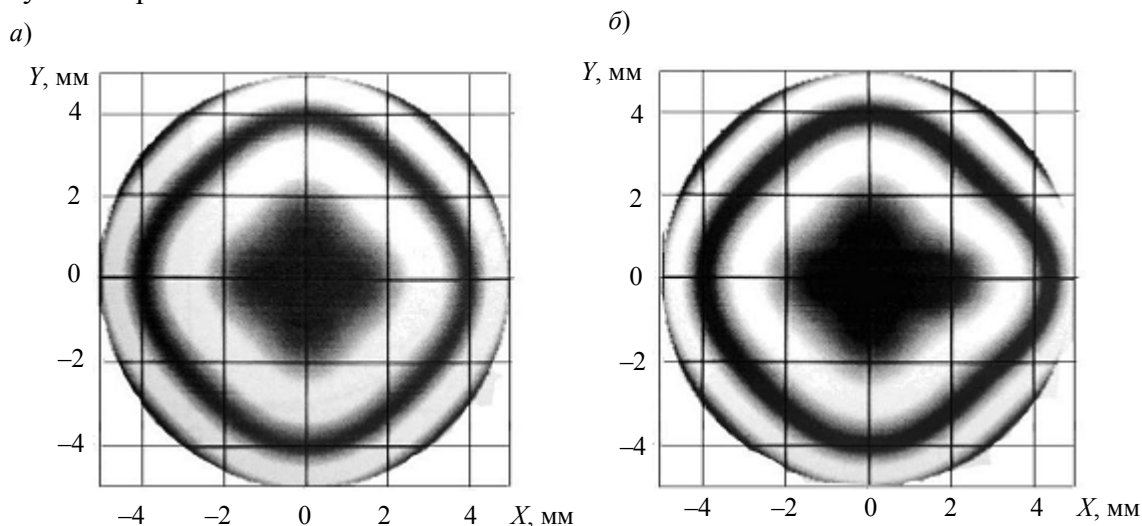


Рис. 2

При исследовании влияния глазодвигательных мышц наблюдаются различия при их симметричном и несимметричном действиях. В первом случае (рис. 2, а) интерференционная картина роговицы содержит полосы ромбовидного очертания, во втором случае (рис. 2, б) наблюдается симметрия относительно медиальной мышцы.

Результаты математического моделирования напряженного состояния роговицы могут быть использованы для определения значения внутриглазного давления или получения информации о других частных причинах патологии. Создание библиотеки расчетных картин интерференции позволит офтальмологам более точно установить диагноз заболеваний пациента.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук О. А. Шеломовой за помощь в проведении расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forbes M., Piko G., Grolman B. A noncontact applanation tonometer// Arch. Ophthalmol. 1974. Vol. 91, N 2. P. 134—140.
2. Журавлев А. И., Малышев Л. К. Офтальмологический поляриметр // Оптич. журн. 1994. № 12. С. 71—75.
3. Тамарова Р. М. Оптические приборы для исследования глаза. М.: Медицина, 1982.
4. Галилеева П. С., Трофимов В. А., Шеломова О. А. Математическое моделирование наведенного двулучепреломления фиброзной оболочки глаза человека // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 6. С. 9—14.
5. Бегун П. И., Шукейло Ю. А. Биомеханика: Учеб. пособие. СПб: СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 1996.

Сведения об авторах

- Константин Юрьевич Кузнецов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: ckyznetsov@gmail.com
- Юрий Тихонович Нагибин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: nagibin77@mail.ru
- Владимир Анатольевич Трофимов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: troftu@mail.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

А. А. ВОРОНИН, И. А. ДМИТРИЕВ, Г. Н. ЛУКЬЯНОВ, Л. А. РЫБИНА

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧЕЛОВЕЧЕСКОМ ОРГАНИЗМЕ

Представлен приборный комплекс для совместного исследования процессов дыхания и сердечной деятельности человека. Комплекс состоит из прибора для измерения характеристик дыхания и кардиоритмоанализатора „Эксперт — 01“, объединенных в единую систему. Проведены результаты исследования взаимодействия дыхательной и сердечно-сосудистой систем организма.

Ключевые слова: измерительный комплекс, ринологический прибор, датчики температуры, анализ процессов.

Применение измерительных приборов и систем для комплексных исследований организма человека дает возможность получить новые данные о характере взаимодействия его органов.

Система для совместного исследования сердечной деятельности и дыхательных процессов создана на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики [1]. Система представляет собой измерительный комплекс, в состав которого входят многоканальный ринологический прибор, позволяющий регистрировать температуру воздуха непосредственно в носовой полости человека, не искажая при этом естественных характеристик выдыхаемого воздуха, а также кардиоритмоанализатор (далее — кардиограф) „Эксперт — 01“ производства НПО „Маркиз“ (Санкт-Петербург), представляющий собой портативный прибор, подключаемый к компьютеру через последовательный порт.

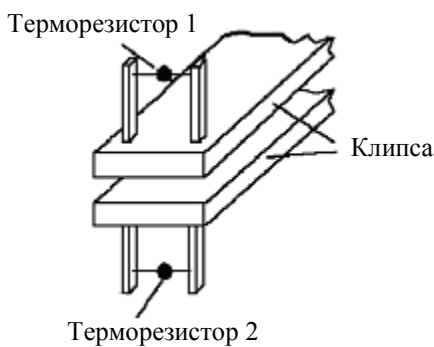


Рис. 1

Сенсорный элемент ринологического прибора — клипса миниатюрных размеров — располагается на перегородке носа, внутри его полостей (рис. 1). На внешней поверхности обеих половин клипсы находятся датчики (терморезисторы СТ1-18, отградуированные в диапазоне от 20 до 40 °С), регистрирующие температуру на входе в носовую полость. Миниатюрные размеры клипсы и датчиков (толщина каждой из половин клипсы составляет 4 мм, датчика — 0,5 мм) позволяют измерять пульсации температуры в носовых ходах при естественном дыхании [1]. Температура воздуха окружающей среды в течение времени вдоха и выдоха изменяется до температуры тела человека.

При проведении экспериментов для получения сигнала электрокардиограммы и последующего его представления на мониторе компьютера использовался кардиограф „Эксперт — 01“ с двумя датчиками, устанавливаемыми на руки пациента. Этот прибор обеспечивает частоту дискретизации 3000 Гц при диапазоне входных напряжений от 0,03 до 5 мВ в диапазоне частоты сокращений сердечной мышцы от 36 до 180 ударов/мин.

Измерительный комплекс создан для выявления общих закономерностей взаимодействия дыхательной и сердечно-сосудистой систем организма. Для функционирования комплекса разработано программное обеспечение, синхронизирующее работу приборов и приводящее результаты их измерений к одному моменту времени (рис.2).

Для проведения экспериментов по исследованию взаимосвязи процессов дыхания и сердечных сокращений были привлечены как здоровые люди, так и больные с различными ды-

хательными и сердечными патологиями. На рис. 3 графически представлены синхронизированные результаты измерения температуры (T) воздуха в носовой полости (кривая 1) и показаний электрокардиограммы (U) здорового человека (кривая 2) в зависимости от времени. График демонстрирует характерную синхронизацию процессов на частоте дыхания.

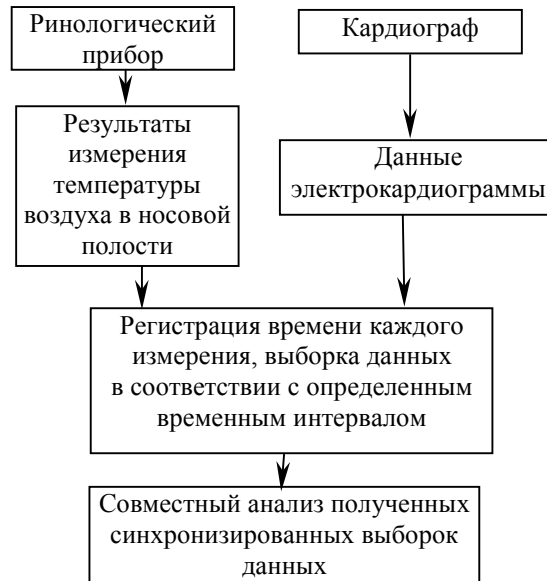


Рис. 2

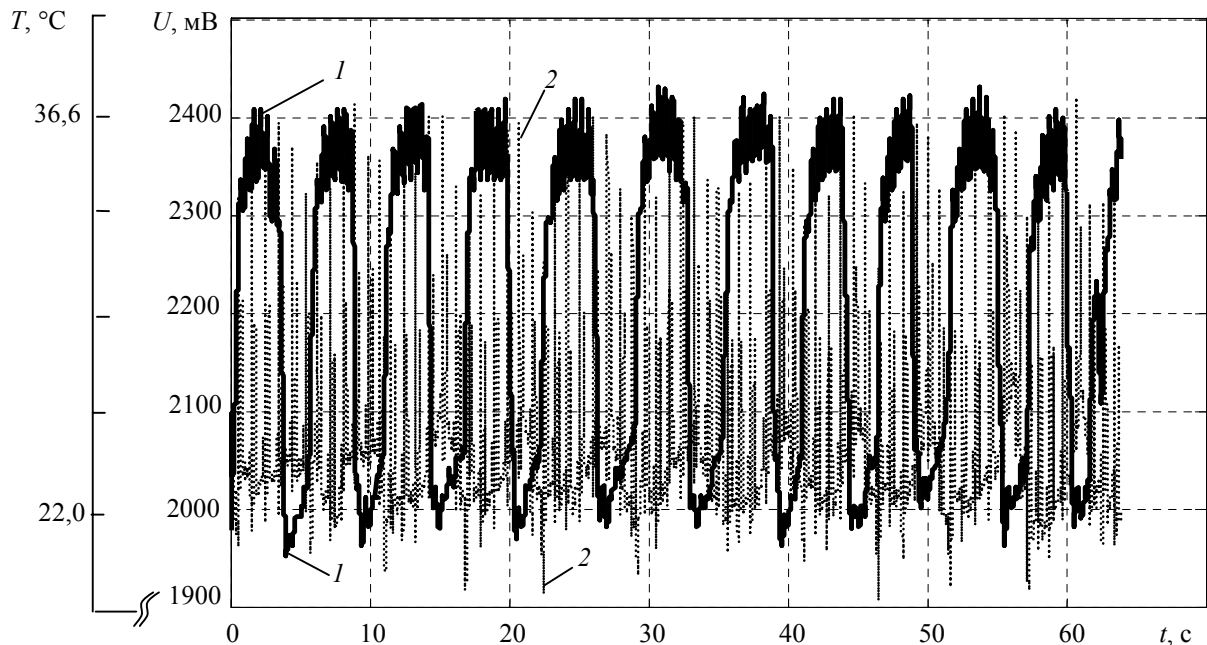


Рис. 3

Для выявления особенностей взаимодействия дыхательной и сердечно-сосудистой систем определялась взаимная спектральная плотность мощности (S) для полученных зависимостей (рис. 4). Характерные частоты, на которых происходит взаимодействие систем у здорового человека, наблюдаются при $f = 0,3 \dots 0,8$ Гц (см. рис 4, *a*), а у пациентов с заболеваниями сердца — на частоте $f \approx 1$ Гц (см. рис. 4, *b*).

Для исследуемого процесса по методу задержек производилось восстановление фазовой траектории (аттрактора) в пространстве $(x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x(t+n\tau))$, где n — размерность пространства вложения. На рис. 5 приведены фазовые траектории: *a* — процесса изменения

температуры воздуха при дыхании здорового человека; б — то же, для больного астмой; в — процесса изменения электрических потенциалов сердца здорового человека; г — то же, для человека с заболеванием сердечно-сосудистой системы.

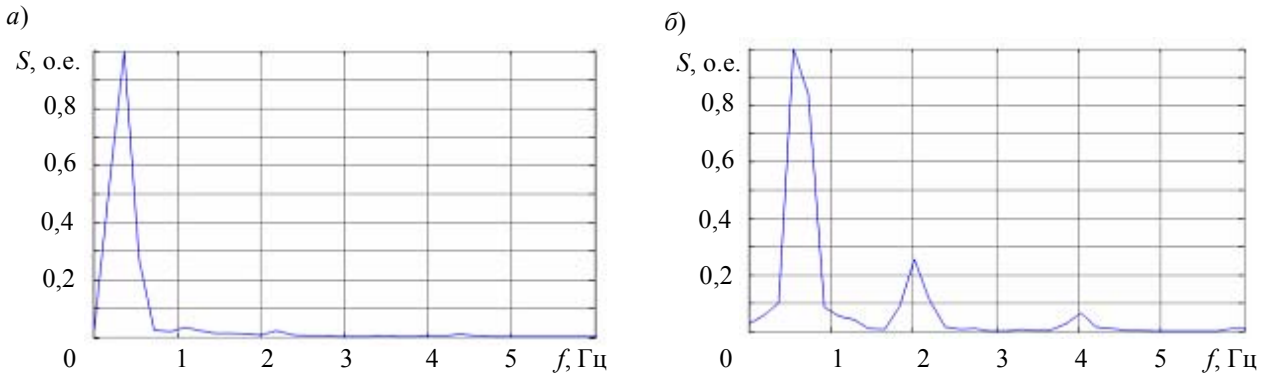


Рис. 4

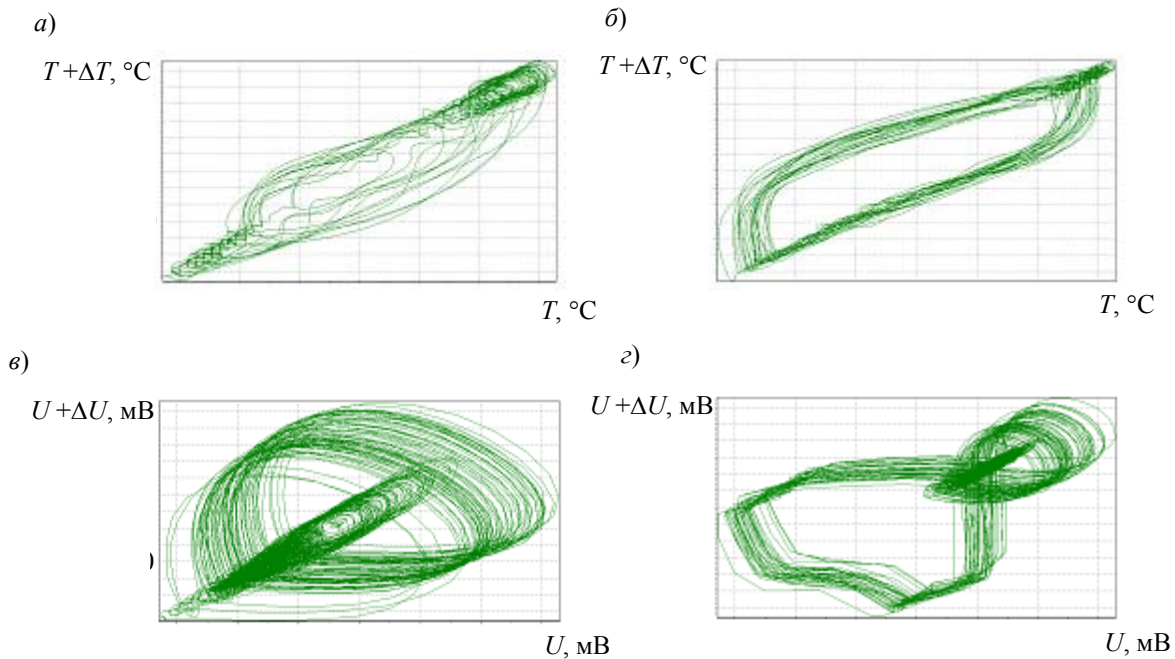


Рис. 5

Далее, по методу Грассбергера и Прокаччия [2] вычислялись корреляционный интеграл $C(\epsilon)$ и корреляционная размерность D_2 , а также корреляционная энтропия K_2 :

$$C(\epsilon) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m H(\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|),$$

где H — функция Хевисайда:

$$H = \begin{cases} 1, & (\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) \geq 0; \\ 0, & (\epsilon - \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|) < 0, \end{cases}$$

здесь ϵ — размер ячейки разбиения фазового пространства, \mathbf{x}_{ij} — параметры выборки;

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(\epsilon)}{\log \epsilon};$$

$$K_2 = \lim_{\tau \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{ED \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \log \left(\sum_{i_1 \dots i_N} \frac{C_{ED}(\varepsilon)}{C_{ED+1}(\varepsilon)} \right),$$

где $C_{ED}(\varepsilon)$ — корреляционный интеграл для размерности вложения ED (ED — embedded dimension) [3].

В результате вычислений были получены значения корреляционной размерности, а также корреляционной энтропии для процессов дыхания и сердечной деятельности.

Применение разработанного комплекса позволило осуществить динамические измерения параметров процессов дыхания и сердечной деятельности, что, в свою очередь, позволяет сделать следующие важные выводы:

— для практически здорового человека характерно динамическое взаимодействие дыхательной и сердечно-сосудистой систем в основном на частоте дыхания, а также слабое взаимодействие на более высоких частотах;

— для людей с заболеванием сердца характерно более сильное взаимодействие на частотах, превышающих частоту дыхания;

— наибольшая величина спектральной плотности мощности, соответствующей частоте дыхания, у пациента с патологиями сердца, как правило, меньше, чем у здорового человека: это, с учетом более высоких амплитуд пиков на частотах выше 1 Гц, свидетельствует о возрастании мощности взаимодействия, приходящейся на сердечно-сосудистую систему при наличии заболеваний;

— для всех пациентов, при положении тела стоя, характерно общее возрастание (но у здоровых людей в среднем ниже, чем у больных) корреляционных размерностей для процессов дыхания и деятельности сердца;

— у пациентов с патологическими изменениями сердечно-сосудистой системы при смене положения тела отмечено более резкое (в некоторых случаях скачкообразное) изменение размерностей исследуемых процессов, чем у здоровых людей;

— корреляционная энтропия процесса сокращений сердечной мышцы у всех пациентов превышает данный показатель при изменении температуры выдыхаемого воздуха, что свидетельствует о меньшей скорости потери информации применительно к процессу дыхания; таким образом, процесс дыхания в некотором узком временном интервале является более детерминированным;

— в результате смены положения тела в пространстве у большинства пациентов наблюдалось изменение корреляционной энтропии обоих исследуемых процессов, однако оно носит разнонаправленный характер и, учитывая возможное значение погрешности измерений, не может быть принято во внимание.

Разработанный измерительный комплекс, как подтверждают приведенные выводы, позволяет не только получать данные о процессах дыхания и сердцебиения, но и количественно оценивать взаимосвязь этих процессов в зависимости от состояния человека, в частности выявить процессы синхронизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов Г. Н., Рассадина А. А., Дранишникова О. А. и др. Исследование тепло- и массообменных характеристик дыхания // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 5. С. 68—73.
2. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of strange attractors // Phys. Rev. Lett. 1983. N 50. P. 346—349.
3. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. М.: Мир, 1991. 368 с.

Сведения об авторах

- Алексей Анатольевич Воронин* — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра теплофизики; E-mail: ale_vog@ Rambler.ru
- Игорь Алексеевич Дмитриев* — ФГУП „НИИ промышленной и морской медицины“, Санкт-Петербург, руководитель группы
- Геннадий Николаевич Лукьянов* — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; E-mail: gen-lukjanow@yandex.ru
- Лариса Александровна Рыбина* — канд. биол. наук; Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург

Рекомендована кафедрой
электроники СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

УДК 535.551

Е. М. НИКУЩЕНКО

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ОСВЕТИТЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ

Рассмотрены возможности применения волоконно-оптического осветителя с нарушенным полным внутренним отражением в устройствах обеззараживания воды. Представлены результаты экспериментального моделирования осветителя, выполненного в виде катушки многомодового оптоволокна. Обозначены практические проблемы создания волоконно-оптического осветителя.

Ключевые слова: *светоизлучающий диод, волоконный световод, обеззараживание воды.*

Введение. Проблема разработки компактных эффективных устройств обеззараживания питьевой воды, принцип действия которых основан на ее облучении ультрафиолетовым светом, приобрела в последние годы особую актуальность. Создание недорогих мощных лазерных и светоизлучающих диодов видимого и ультрафиолетового диапазонов волн обусловило возможность их практического использования в таких устройствах. Заслуживает внимания и применение в качестве осветителя волоконных световодов (ВС), в том числе многомодовых световодов с нарушенным полным внутренним отражением света. Это явление возникает вследствие изгиба или скручивания оптоволокна, выбор типа и размеров (геометрии) которого должен производиться в соответствии с наибольшей светоотдачей излучения из световода в окружающую среду (неочищенную воду).

В настоящей статье представлены результаты моделирования оптоволоконного осветителя, выполненного в виде катушки кварцевых волокон с различными диаметрами сердцевины. Полученные в ходе экспериментов данные позволяют сделать вывод о перспективности развития работ в данном направлении и возможности применения специализированных оптических волокон, снабженных эффективной системой ввода в него УФ-излучения.

Физические основы метода. Применительно к геометрической оптике изгибы либо скручивание волоконного световода приводят к нарушению условия полного внутреннего отражения света на границе сердцевины — оболочка ВС и, как следствие, к дополнительным

радиационным потерям — передаче световой энергии от направляемых мод ВС к оболочечным. Радиационные потери излучения в ВС (α) непосредственно зависят от радиуса R изгиба оптоволоконна:

$$\alpha = A \frac{\exp(-BR)}{\sqrt{R}},$$

где A, B — коэффициенты, зависящие от размеров сердцевины и оболочки ВС и их показателей преломления [1—3].

Критическое значение радиуса R , при котором дополнительные радиационные потери в ВС резко возрастают, зависит от соотношения радиусов R и a (где a — радиус сердцевины ВС), величины числовой апертуры N_A оптоволоконна и вида функции радиального распределения показателя преломления ВС — ступенчатой, треугольной или градиентной. Чем больше радиационные потери излучения в ВС, тем соответственно выше эффективность вывода излучения через боковую поверхность световода в окружающую среду.

При использовании многовитковой катушки оптоволоконна возможен практически полный вывод излучения из сердцевины ВС во внешнюю среду, при этом локальная интенсивность излучения такого волоконного осветителя (P) убывает по длине катушки в соответствии с законом Бугера — Ламберта — Бера:

$$P = P_0 \exp(-\beta z),$$

где β — интегральный коэффициент радиационных потерь в ВС, z — координата точки наблюдения вдоль оси катушки.

Коэффициент потерь β зависит от соотношения a/R , величины числовой апертуры ВС и длины волны излучения (λ), которая, в свою очередь, зависит от величин показателей преломления сердцевины (n_1) и оболочки (n_2) ВС, а следовательно, от величины числовой апертуры N_A световода, равной

$$N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Номенклатура современных волоконных световодов, как кварцевых, так и полимерных, весьма разнообразна. Выбор конкретного типа световодов, применяемых в осветителях установок для обеззараживания воды, должен производиться с учетом требуемых характеристик осветителя и является самостоятельной задачей.

Моделирование волоконно-оптического осветителя. Оптическая схема экспериментальной установки для моделирования волоконного осветителя показана на рис. 1. В качестве источников света 1 использовались гелий-неоновый лазер ($\lambda = 633$ нм), твердотельный лазер ($\lambda = 532$ нм) и светодиоды красного, оранжевого и ультрафиолетового диапазонов спектра. Излучение вводилось в оптоволоконно посредством микрообъектива 2 кратностью $20\times$, точная настройка ввода производилась с применением трехкоординатного микропозиционера 3. Визуальный контроль эффективности ввода излучения осуществлялся посредством отображения на экране 7, расположенном перед выходным концом 6 световода. Интенсивность излучения с боковой поверхности катушки оптоволоконна 4 фиксировалась с помощью универсального люксметра 5 марки ТКА. Перед фотоприемным окном люксметра располагалась щелевая диафрагма шириной 2 мм, щель находилась на расстоянии 3 мм от поверхности

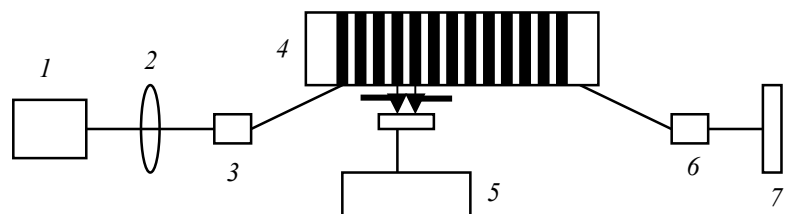


Рис. 1

катушки, сканирование рабочей поверхности осветителя производилось перемещением фотоприемника (люксметра) вдоль всей длины L катушки катушки.

Параметры исследованных световодов и размеры катушек (бобин) приведены в табл. 1, где r — диаметр катушки осветителя, $2a$ и $2b$ — диаметр сердцевины и оболочки ВС соответственно.

Таблица 1

Номер катушки осветителя	r , мм	$2a$, мкм	$2b$, мкм	L , мм
1	22	185	400	16
2	32	185	400	7
3	6,8	70	135	46
4	17	30	110	22
5	8	70	135	38
6	10,5	100	200	50
7	5	45	125	58

При больших диаметрах катушки ($r = 15 \dots 20$ мм) излучение вдоль поверхности осветителя было сравнительно равномерным. При изменении условий ввода излучения в ВС посредством микропозиционера (при возбуждении разных групп мод световода) достигается неравномерное либо почти однородное распределение яркости поверхности осветителя. При малых ($r = 5 \dots 7$ мм) диаметрах катушки вследствие интенсивной светоотдачи излучения через боковую поверхность световода распределение яркости поверхности осветителя существенно изменяется вдоль длины катушки.

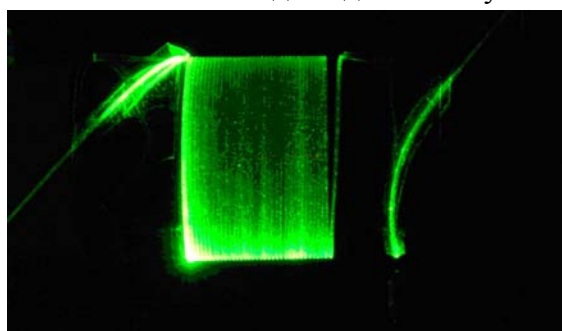


Рис. 2

На рис. 2 изображена катушка осветителя № 1 (см. табл. 1), показано эффективное возбуждение оболочечных мод ВС зеленым светом.

На рис. 3 графически представлены примеры экспериментального распределения интенсивности излучения вдоль поверхности волоконного осветителя (катушка № 6), возбуждаемого красным (кривые 1, 2) и зеленым (кривые 3—5) светом при $\lambda = 633$ нм и $\lambda = 532$ нм соответственно. (Нумерация кривых соответствует номеру эксперимента.)

Расхождение в величинах максимумов кривых вызвано изменениями режимов возбуждения световодов (разными значениями эффективности ввода излучения в световоды).

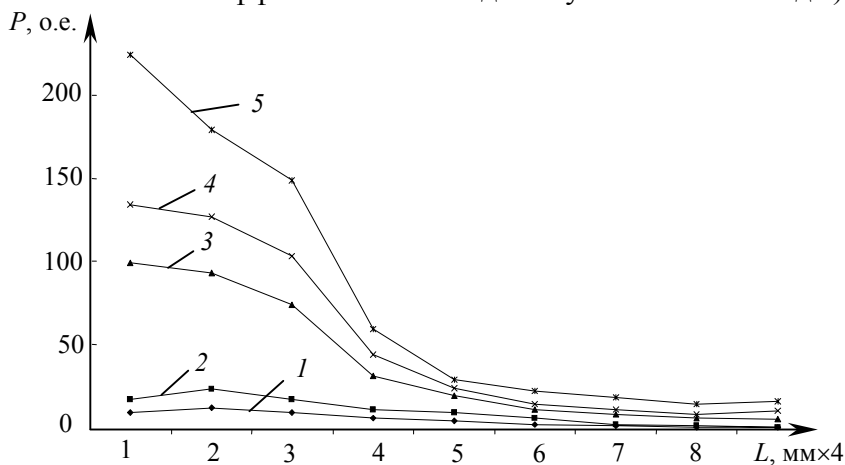


Рис. 3

Оценка особенностей использования волоконного осветителя. При возбуждении рассмотренных образцов волоконных осветителей излучением УФ-светодиодов на длине волны 360 нм (использовался светодиод типа FG360-R5-WC015 мощностью около 0,5 мВт)

интенсивность излучения с боковой поверхности катушек оптоволоконна была на уровне предела чувствительности люксметра (менее 1 мкВт). Этот результат естественен, принимая во внимание малую (менее 10 %) эффективность ввода УФ-излучения светодиодов в кварцевые световоды рассмотренных выше типов. Очевидно, что для создания волоконного осветителя необходимы источники УФ-излучения большей мощности и с улучшенными характеристиками расходимости излучения для его эффективного ввода в оптоволоконно.

На основании результатов исследований волоконного осветителя в красном и зеленом свете были получены оценки его характеристик при использовании в ближней УФ-области спектра при $\lambda=350$ нм. Результаты изменения интенсивности излучения вдоль поверхности волоконного осветителя № 6 приведены в табл. 2, где P_i — снижение интенсивности, ΔP — относительная величина снижения интенсивности при шаге измерений 4 мм.

Таблица 2

Номер эксперимента	P , о.е., при $z = 8$ мм	P_i , о.е., при $z = 12$ мм	ΔP
1 (633 нм)	13,4	10,4	0,78
2 (633 нм)	23,8	17,8	0,75
3 (532 нм)	93,9	74,5	0,79
4 (532 нм)	128,1	104,3	0,81
5 (532 нм)	180,3	150,5	0,83

При красном свете среднее значение ΔP составляет 0,773, при зеленом — 0,82, т.е. уменьшение длины волны (от красного света к зеленому) в 1,19 раза привело к увеличению коэффициента спада яркости примерно в 1,06 раз. Число M мод ВС равно

$$M = \frac{2\pi^2 a^2}{\lambda^2} N_A^2.$$

Интенсивность излучения, рассеянного в результате радиационных потерь на изгибах оптоволоконна, приблизительно пропорциональна полному числу мод. Принимая это во внимание, можно допустить, что и относительная величина ΔP возрастает с уменьшением значения λ по степенному закону с показателем, примерно равным 1,5—2,0 (следует учитывать, что числовая апертура N_A кварцевого оптоволоконна в УФ-диапазоне больше, чем в зеленой и красной областях спектра). В результате при $\lambda = 360$ нм согласно приближенным оценкам расчетное значение $\Delta P \approx 1,2 \dots 1,5$. Следовательно, при заданных характеристиках осветителя (см. табл. 1) ожидаемый спад интенсивности УФ-излучения вдоль его поверхности будет существенно выше, чем при возбуждении зеленым и красным светом. Это указывает на необходимость не только тщательного расчета условий ввода УФ-излучения в световод волоконного осветителя, но и учета его общей геометрии (диаметров сердцевин оптоволоконна и катушки, общего числа витков и др.).

Для получения равномерного светового потока вдоль осветителя достаточно большой (несколько десятков миллиметров) длины необходимо обеспечить оптимальное соотношение радиуса изгиба оптоволоконна (диаметра катушки) и размера сердцевин световода. Количественная оценка такого соотношения может быть получена в результате теоретических и экспериментальных исследований.

Проблемы эффективного ввода излучения светодиодов в оптоволоконно. Вопросы эффективного ввода излучения полупроводниковых лазеров и светодиодов в оптоволоконно активно обсуждались еще в начале 70-х гг. прошлого века [1—3]. Основным результатом теоретических и экспериментальных исследований по данной проблеме заключается в необходимости точного согласования линейных и угловых апертур волоконного световода и излучателя. При прямой стыковке оптоволоконна с ламбертовским излучателем, который в хорошем приближении отражает свойства светоизлучающих диодов, показатель эффективности ввода излучения в ВС (отношение мощности излучения, введенного в сердцевину ВС, к мощности

излучателя) прямо пропорционален квадрату числовой апертуры оптоволоконного элемента. Распространенными методами также являются иммерсия и использование фокусирующих оптических элементов, например микролинз, градианов или стеклянных шариков диаметром порядка нескольких миллиметров [4]. При этом диапазон значений показателя эффективности ввода излучения весьма широк: от 5—50 % для светоизлучающих диодов до 30—90 % для лазерных излучателей.

Основная трудность при создании высокоэффективных устройств фокусировки излучения светодиодов в оптоволоконно заключается в сравнительно больших размерах излучающей области диодов (десятки и сотни микрометров). Изображение излучающего тела светодиода, сформированное оптической системой фокусировки на торце оптоволоконного элемента, по своим размерам часто превышает площадь сечения жилы световода, при этом угловой спектр вводимого излучения существенно превышает угол захвата излучения оптоволоконным элементом.

Наилучшим решением проблемы эффективного ввода излучения светодиода в оптоволоконно является их прямая стыковка, осуществляемая в технологическом процессе изготовления модуля-излучателя, жестко связанного с оптоволоконным элементом (тип „пигтейл“). Затруднением при использовании в волоконных осветителях светоизлучающих диодов коммерческого типа является наличие в них коллиматоров и другой фокусирующей оптики, абберрации которой обычно слишком велики и не позволяют сфокусировать изображение светящегося тела таких светодиодов до размеров, близких к размерам световодной жилы оптоволоконного элемента. Это затруднение может быть преодолено созданием специализированных светоизлучающих и лазерных диодов для массового использования в приборах оптического обеззараживания воды.

Заключение. Результаты выполненных экспериментов показывают принципиальную возможность создания волоконно-оптического УФ-осветителя для установки по обеззараживанию питьевой воды, принцип действия которой основан на явлении нарушенного внутреннего отражения света в оптоволоконном элементе.

При использовании в волоконном осветителе обычных коммерческих кварцевых оптических волокон с диаметром световодной жилы порядка 100—200 мкм предельный радиус изгиба волокон составляет примерно 4—7 мм. Возможным способом создания эффективных волоконных осветителей с внешним диаметром катушки 5—10 мм является использование в них специализированного полимерного оптоволоконного элемента.

Для реализации экономичного волоконного осветителя весьма важным является успешное решение проблемы эффективного ввода излучения в оптоволоконно с КПД не менее 50 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы волоконно-оптической связи / Пер. с англ.; Под ред. Е. М. Дианова. М.: Сов. радио, 1980.
2. Мурадян А. Г., Гольдфарб И. С., Иноземцев В. П. Оптические кабели многоканальных линий связи. М.: Радио и связь, 1987.
3. Гроднев И. И., Ларин Ю. Т., Теумин И. И. Оптические кабели. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Сложные дифракционные преобразователи волновых полей (дифракционные элементы) // Методы компьютерной оптики / Под ред. В. А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.

Сведения об авторе

Евгений Михайлович Никущенко — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; зав. лабораторией; E-mail: znem@list.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

В. В. АРТЕМЬЕВ, Н. П. БЕЛОВ, А. В. СМИРНОВ, А. Д. ЯСЬКОВ

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Рассмотрен оригинальный подход к реализации инвариантного оптико-электронного измерителя скорости перемещения протяженного объекта. Отличительной особенностью рассматриваемого подхода является использование двухканальной схемы анализа изображения с применением межканальных связей для компенсации помех, возникающих при измерении скорости протяженного объекта с оптически-неоднородной поверхностью.

Ключевые слова: измеритель скорости, оптически-неоднородные поверхности, помехоустойчивость, инвариантные характеристики.

Измерение скорости перемещения протяженных объектов с оптически-неоднородными поверхностями (ОНП), таких как бумажное полотно в процессе его отлива на сеточном столе бумагоделательной машины, поток руды на транспортной ленте, поверхность Земли при ее фотографировании с борта летательного аппарата и т.п., осуществляется с использованием оптико-электронных устройств, предназначенных для выделения первичной информации. При реализации таких устройств необходим специальный подход к выбору схемы построения оптического тракта приема сигналов и электронного тракта их преобразования и обработки.

Реальные поверхности имеют различные коэффициенты отражения и поглощения световой энергии и разные размеры неоднородностей, которые характеризуются средним радиусом корреляции [1]. В оптическом тракте характерными помехами являются высокоинтенсивные фоновые засветки и флюктуационные помехи, которые возникают в поле зрения оптической системы. Поэтому электрические сигналы на выходе фотоприемного устройства имеют весьма сложный характер.

Процесс преобразования информации в системе можно представить в виде схемы [2], показанной на рис. 1, а. Изображение участка 1 ОНП протяженного объекта формируется объективом 2 в плоскости периодического растра 3. Конденсор 4 обеспечивает равномерную засветку светочувствительной поверхности фотоприемника 5, электрический сигнал с которого через усилитель 6 подается на блок фильтров 7, обеспечивающий очистку сигнала от помех. Растр 3 выполнен в виде чередующихся с периодом 2δ прозрачных и непрозрачных полос равной ширины (рис. 1, б). Если совместить изображение участка 1 ОНП с периодическим растром 3 и перемещать это изображение перпендикулярно полосам растра со скоростью $V_{и}$, то по растру одновременно будут перемещаться изображения множества ОНП различного контраста и размеров, взаимное положение которых случайно и независимо [2].

Полный световой поток, формируемый за плоскостью периодического растра, представляет собой суммарный световой поток, образуемый отдельными неоднородностями, световые потоки которых имеют одинаковые частоты модуляции и число периодов (см. рис. 1, б, поз. 1—5), но распределенные по случайному закону начальные фазы.

Средняя частота модуляции результирующего светового потока равна частоте модуляции отдельных потоков (см. рис. 1, б, поз. б). Суммарным световым потоком, попадающим на фотоприемник, формируется электрический сигнал (см. рис. 1, б, поз. 7), полезная составляющая которого определяется по формуле

$$f = \frac{V_{\text{и}}}{2\delta} \sin \alpha,$$

где α — угол между вектором скорости $V_{\text{и}}$ и направлением полос раstra.

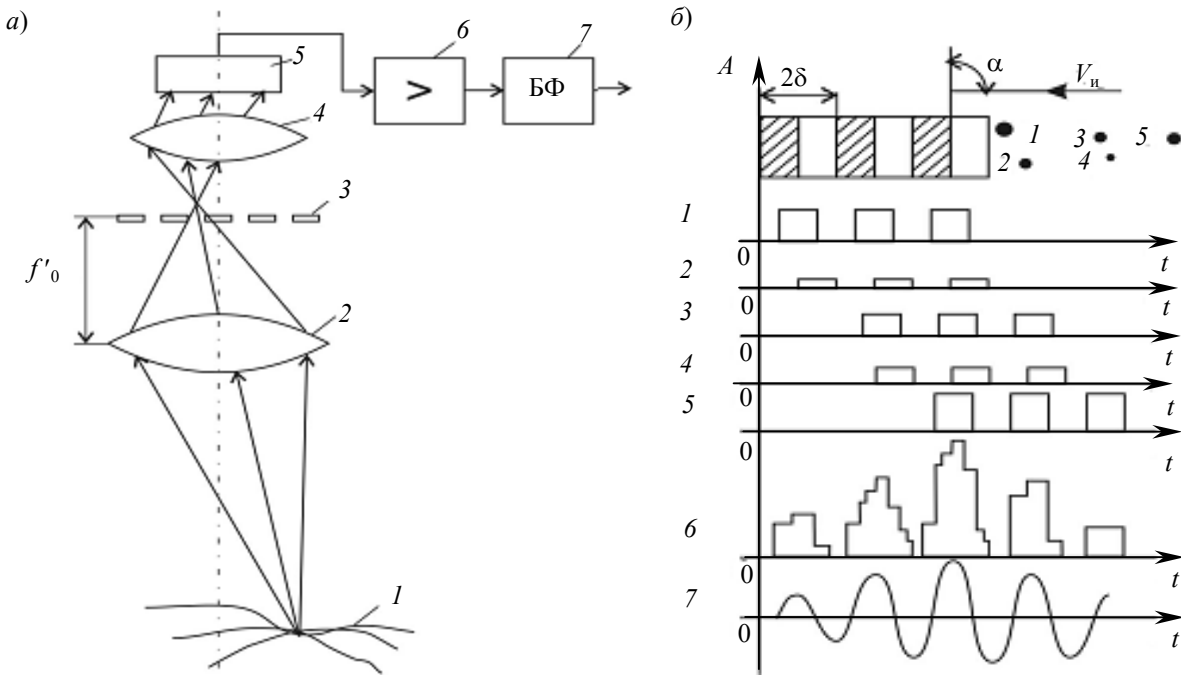


Рис. 1

Соотношение сигнал/шум на выходе фотоприемника зависит не только от уровня освещенности наблюдаемого участка поверхности, но и от согласования размеров поля зрения объектива, пространственного периода раstra и радиуса пятна рассеяния объектива со средним радиусом корреляции неоднородностей [3].

При согласовании этих параметров возникают противоречия, разрешить которые с использованием только классических методов не удастся. Это в значительной степени ограничивает возможности метода узкополосной пространственно-частотной фильтрации при реализации высокоточных оптико-электронных измерителей скорости перемещения протяженных объектов с ОНП, используемых в аэронавигационной и расходоизмерительной технике для контроля скорости потоков жидкостей, газов, сыпучих материалов и т.д.

Наиболее распространенным методом построения высокоточных измерительных устройств является использование принципа инвариантности [4], в основу которого положено предположение о наличии нескольких каналов формирования и обработки сигналов, построенных таким образом, чтобы суммирование сигналов приводило к компенсации помех. При этом информативные признаки сигналов не подвергаются изменениям. Однако это не исключает возможности появления случайных помех хотя бы в одном из каналов, что может привести к искажению информативных признаков сигнала.

Реализация принципа инвариантности к случайным помехам, возникающим в тракте приема сигналов, может быть осуществлена в классе систем с инвариантными характеристиками помехоустойчивости. Для функционирования таких систем достаточно лишь минимальной информации о характеристиках сигнала и помех, а в ряде случаев такая информация вообще не нужна [5].

Такой подход к построению каналов приема и преобразования сигналов в оптико-электронных устройствах для измерителей скорости перемещения протяженных объектов с ОНП можно назвать принципом адаптивной инвариантности.

На рис. 2, а представлена функциональная схема двухканального оптико-электронного измерителя скорости перемещения протяженного объекта 1 [6]. В основу этой схемы положен принцип инвариантности. Анализатор изображения такого измерителя выполнен в виде вращающегося с частотой ω_p периодического раstra б (см. рис. 2, б; здесь V_p — линейная скорость движения раstra). На диаметрально противоположных сторонах раstra б с помощью светоделительного устройства 3 формируется изображение одного и того же участка протяженного объекта 1. Периодический растр б приводится во вращение двигателем 9.

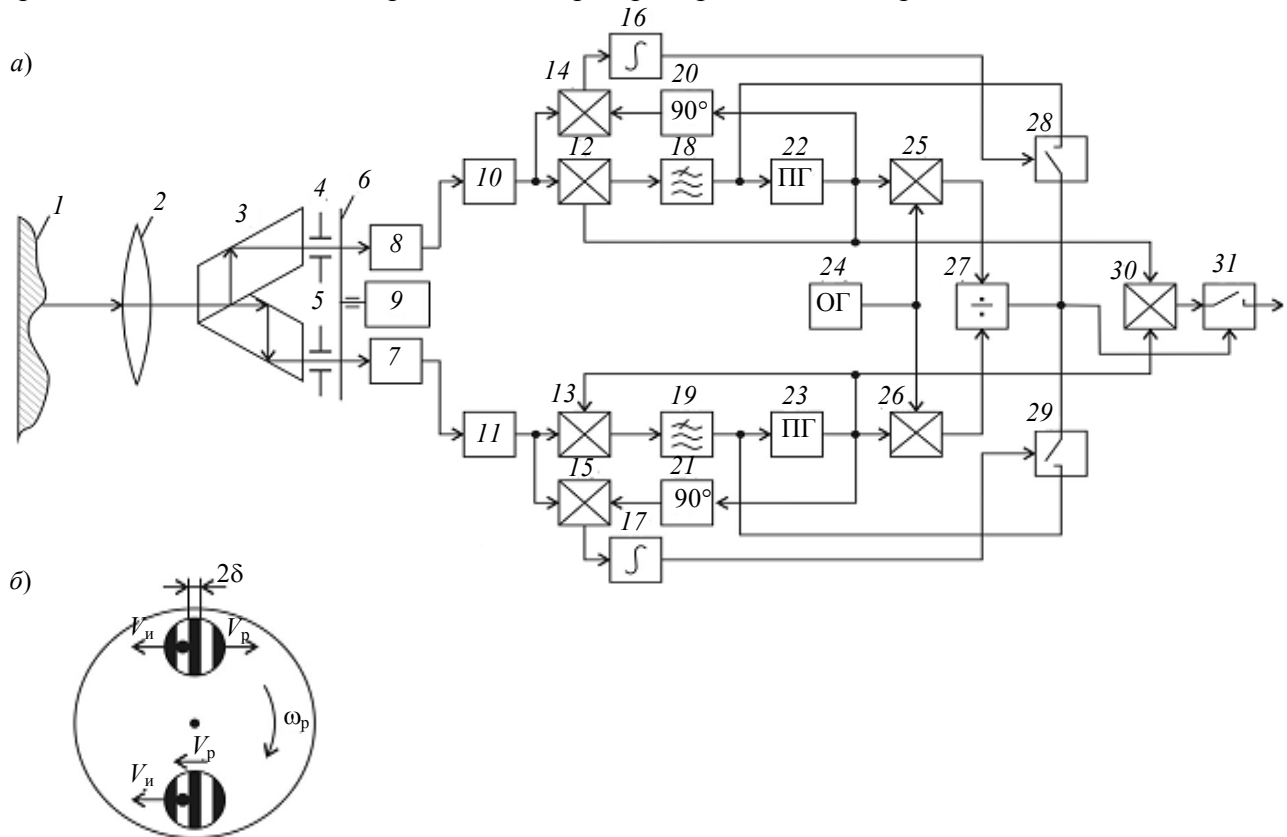


Рис. 2

Изображение участка поверхности протяженного объекта 1, сформированное с помощью объектива 2 и светоделительного блока 3, на диаметрально противоположных сторонах раstra подвергается узкополосной пространственной фильтрации, которая обеспечивается периодической структурой раstra б и диафрагмами 4 и 5. В результате этого на выходе формируется модулированный световой поток, который поступает на фотоприемники 7 и 8, а затем на усилители 10 и 11, снабженные полосовыми фильтрами. Фотоизображения электрических сигналов на выходе полосовых фильтров, полученные с использованием экспериментального макета, представлены на рис. 3.

Характерной особенностью этих сигналов является подверженность их амплитуд резким колебаниям вплоть до полного исчезновения. Это связано с изменениями соотношения между размером изображения неоднородностей поверхности и шагом раstra, с одной стороны, и с изменением

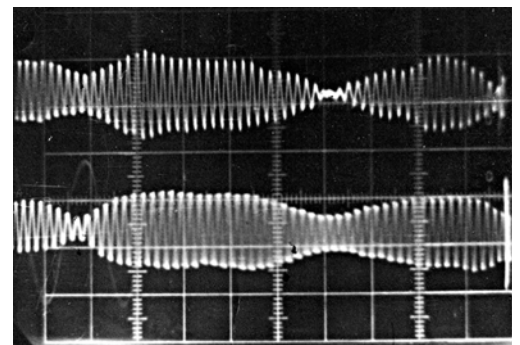


Рис. 3

освещенности поверхности и изменениями контраста неоднородностей на фоне поверхности протяженного объекта — с другой. Однако эти модулированные сигналы жестко синхронизированы по фазе относительно друг друга, что позволяет использовать их для компенсации начального изменения фазы в каждом из каналов электронного тракта обработки сигналов.

После усиления и фильтрации электрические сигналы поступают в электронный тракт обработки сигналов (см. рис. 2, а), в состав которого входят перемножители 12 и 13, фильтры нижних частот 18 и 19, перестраиваемые генераторы (ПГ) 22 и 23, генератор опорной частоты (ОГ) 24, блоки вычитания частот 25 и 26, блок сравнения информативных признаков сигналов 27 и электронный ключ 31.

Рассмотрим характер изменения частот сигналов в каждом из каналов. При неподвижном изображении в плоскости раstra частота электрических сигналов на выходах приемников излучения определяется выражениями

$$f_{01} = \frac{V_p}{2\delta}, \quad f_{02} = \frac{V_p}{2\delta}.$$

При движении изображения в плоскости раstra со скоростью V_n центральная частота электрических сигналов на выходе каждого из приемников излучения смещается на величину

$$\Delta f_1 = \frac{V_n}{2\delta}, \quad \Delta f_2 = \frac{V_n}{2\delta}.$$

Тогда частоты электрических сигналов, формируемых на выходах приемников излучения каждого из каналов, будут изменяться в зависимости от направления движения:

$$f_1 = f_{01} \pm \Delta f_1, \quad (1)$$

$$f_2 = f_{02} \pm \Delta f_2. \quad (2)$$

Подставив величины f_{01} , f_{02} , Δf_1 , Δf_2 в выражения (1) и (2), получим

$$f_1 = \frac{V_p + V_n}{2\delta}, \quad f_2 = \frac{V_p - V_n}{2\delta}.$$

Анализ полученных выражений показывает, что частоты f_1 и f_2 определяются пространственным периодом раstra 2δ , скоростью V_p движения периодического раstra и скоростью V_n движения изображения. Приращения частот Δf_1 и Δf_2 равны между собой и отличаются только знаком. На этой основе в электронном тракте реализуется операция оценки качества сигналов с помощью блоков 25, 26 и 27. Посредством блоков 25 и 26 частоты f_1 и f_2 сравниваются с частотой опорного генератора 24, выделенные приращения частот сравниваются между собой, и при наличии их равенства информация передается в цепи управления.

Вычитая частоты f_1 и f_2 с использованием блока 30, получаем выражение

$$f_1 - f_2 = 2\Delta f.$$

С помощью блоков 15, 17 и 21 в одном канале и блоков 14, 16 и 20 в другом выявляются случаи пропадания сигналов на выходе фотоприемников 7 и 8 соответственно. При одновременном пропадании сигналов в обоих каналах поступление сигналов в цепь индикации после прохождения блока 27 перекрывается устройством 31; при пропадании сигналов в одном из каналов с помощью блока 28 или 29, по результатам сравнения информации блоком 27, сигнал поступает в цепь управления частотой перестраиваемого генератора 22 или 23. В этом случае, при „замирании“ сигнала в одном из каналов, на выходе блока 30 формируется достоверная информация о скорости движения изображения.

Наличие двух каналов пространственно-частотной фильтрации в оптическом тракте формирования сигналов позволяет расширить возможности для согласования размеров поля зрения и радиуса пятна рассеяния оптической системы со средним радиусом корреляции оп-

тических неоднородностей, а также уменьшить влияние флюктуационных помех, возникающих в любом из каналов, на результаты измерения скорости перемещения протяженного объекта с ОНП.

Начальная фаза гармоник сигналов каждого из каналов в такой схеме изменяется одновременно, поэтому при совместной обработке сигналов блоком 27 эти изменения компенсируются, что позволяет обеспечить более высокую точность измерений при малых скоростях движения изображения поверхности.

Предложенная процедура обработки сигналов позволяет осуществить адаптивную коррекцию сигналов и исключить влияние флюктуационных помех на выходные параметры измерительного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левшин В. Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. М.: Машиностроение, 1978.
2. Соломатин В. А., Шилин В. А. Фазовые оптико-электронные преобразователи. М.: Машиностроение, 1986.
3. Казамаров А. А., Хорол Д. М., Шкурский Б. И. Оптимальное измерение параметров оптического сигнала оптико-электронными системами с прямолинейным сканированием // Оптико-механическая промышленность. 1977. № 4.
4. Петров Б. Н. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. М.: Наука, 1976.
5. Артемьев В. В., Демин А. В., Панков Э. Д. Об одном способе повышения точности оптико-электронных угломерных устройств // Оптико-электронные системы и приборы: Межвуз. сб. Новосибирск: НИИГАиК, 1980.
6. А.с. 1350499 СССР, МКИ G 01H 9/00. Оптико-электронное устройство для измерения скорости перемещения объекта относительно оптически-неоднородной поверхности / В. В. Артемьев, Г. Н. Юркова // Б.И. 1987. № 41.

Сведения об авторах

- Василий Викторович Артемьев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: technocon@imail.ru
- Николай Павлович Белов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники, ст. науч. сотрудник; E-mail: technocon@imail.ru
- Андрей Васильевич Смирнов** — канд. техн. наук; ООО „Технокон“, Санкт-Петербург; зам. ген. директора; E-mail: technocon@imail.ru
- Андрей Дмитриевич Яськов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: technocon@imail.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

И. Р. КОТОВ, О. В. МАЙОРОВА, В. Т. ПРОКОПЕНКО

ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ НАКЛОНОВ ДИФFUЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Обсуждается проблема разработки голографических методов и систем контроля напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов, адаптированных к использованию при конструировании автоматизированных измерительных систем. Предложена принципиальная схема устройства системы оптической обработки двухэкспозиционных голографических интерферограмм для измерения локальных наклонов поверхности контролируемых объектов.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, интерферометр сдвига, диффузно отражающий объект.

Метод голографической интерферометрии широко используется при решении задач неразрушающего контроля и исследовании напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов. Особый интерес к этому методу обусловлен его высокой информативностью, возможностью получения трехмерных изображений изучаемых объектов и отсутствием материальных связей с ними.

При исследовании напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов нередко осуществляется наклон поверхности контролируемого объекта. При значительных смещениях плоскости интерференционные полосы становятся неразличимы на фоне шумов. Так, при смещениях поверхности более 10 мкм на 1 см ее длины проведение измерений практически невозможно. Известные способы и устройства контроля наклона поверхности либо обладают крайне низкой чувствительностью, либо не позволяют получать информацию о локальных смещениях [1, 2]. В настоящей статье для компенсации наклона исследуемой поверхности предлагается использовать интерферометрию сдвига.

Принципиальная схема предлагаемого устройства для измерения локальных наклонов поверхности представлена на рис. 1. Источник когерентного излучения 1 освещает голограмму 2, на которой зарегистрированы два состояния исследуемого объекта: до и после действия возмущения. Для обеспечения возможности исследования различных точек поверхности объекта голограмма жестко связана с двухкоординатной подвижкой. Для выделения конкретной точки поверхности объекта в плоскости локализации его действительного изображения расположена диафрагма 3. Линза 4 переводит изменение направления распространения объектных волн в смещение соответствующих лучей на величину $|d|$, определяемую соотношением [3]

$$|d| = f(1 + \cos \theta)\gamma, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние линзы; θ — угол падения светового пучка, освещающего объект; γ — угол наклона поверхности объекта в окрестности анализируемой точки.

Для определения ориентации вектора смещения $|d|$ за линзой 4 установлена оборачивающая призма 5, которая вращается с постоянной скоростью вокруг нормали, опущенной в точку пересечения голограммы с оптической осью устройства. Свет, прошедший через призму, падает на голографические дифракционные решетки 6 и 7 интерферометра, одна из которых закреплена неподвижно, а вторая перемещается. В результате движения решетки 7 периодически изменяется расстояние между решетками и относительное положение их штрихов.

Фотоприемник 8 регистрирует контраст интерференционных полос, который меняется в процессе вращения призмы.

На выходе фотоприемника 8 формируется серия радиоимпульсов (U_i) (рис. 2). Временное положение вершины импульса с максимальной амплитудой относительно начала вращения призмы определяет ориентацию вектора смещения, а расстояние между решетками 6 и 7 в этот момент времени однозначно связано с его величиной.

Расстояние между дифракционными решетками интерферометра измеряется с помощью канала устройства, который содержит эталонную двухэкспозиционную спеклограмму 9 и фотоприемники 10 и 11. На спеклограмме регистрируется эталонное смещение диффузного объекта. Вектор смещения ориентирован перпендикулярно штрихам решеток интерферометра. В момент времени, когда расстояние между решетками соответствует величине эталонного вектора смещения, амплитуда сигнала на выходе фотоприемника 9 становится максимальной. Изменение расстояния между решетками с этого момента времени можно определить, отсчитывая число импульсов с выхода фотоприемника 10, и, следовательно, можно измерять абсолютную величину вектора смещения $|d|$.

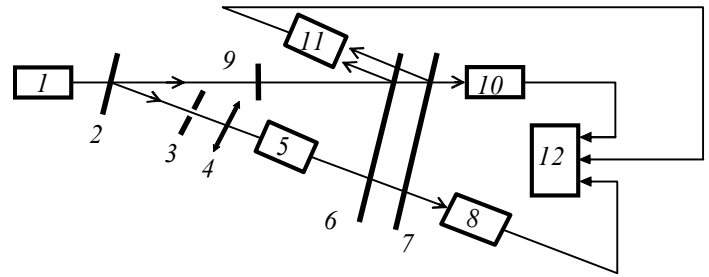


Рис. 1

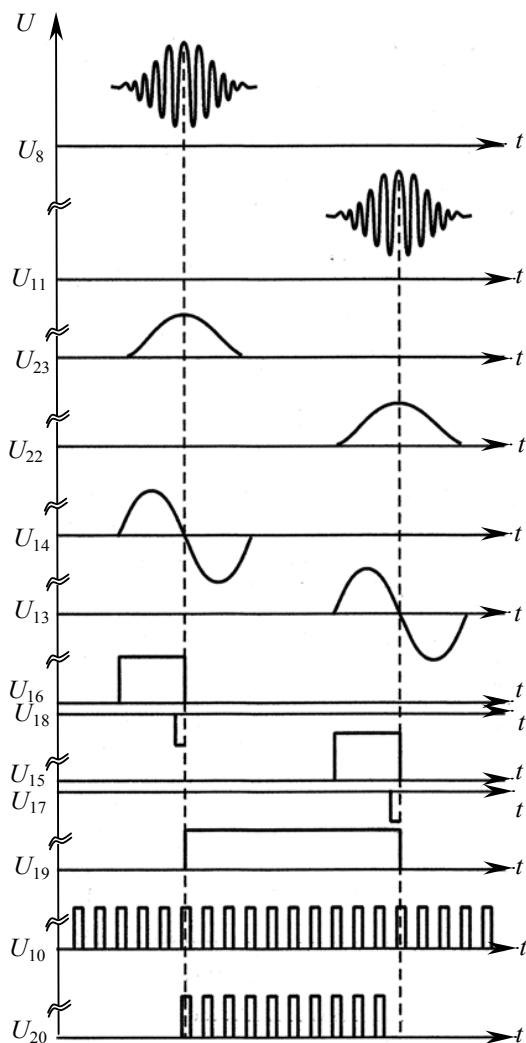


Рис. 2

Эта операция осуществляется при помощи блока обработки сигналов 12 (см. рис. 1), измеряющего временной интервал между вершинами радиоимпульсов, формируемых на выходах фотоприемников 8 и 11. Для определения этого интервала производится дифференцирование огибающей импульсов с выходов фотоприемников 8 и 11, а затем формируется импульс, длительность которого равна временному интервалу между вершинами радиоимпульсов. Длительность этого импульса измеряется счетчиком, на вход которого поступают импульсы счета с выхода фотоприемника 10. Так как расстояние между решетками интерферометра, соответствующее появлению вершины импульса с выхода фотоприемника 11, известно, можно определить абсолютное расстояние между решетками, соответствующее временному положению вершины сигнала приемника 8.

Схема блока обработки сигналов представлена на рис. 3, где 8, 10, 11 — фотоприемники; 22, 23 — детекторы; 13, 14, 17, 18 — дифференциаторы; 15, 16 — усилители-ограничители; 19 — триггер; 20 — ключ, 21 — счетчик импульсов.

Абсолютная величина вектора смещения соответственных лучей определяется формулой

$$|d| = 2htg\alpha, \quad (2)$$

где α — угол Брегга для диффракционных решеток 6 и 7; h — расстояние между решетками, соответствующее максимуму сигнала приемника δ .

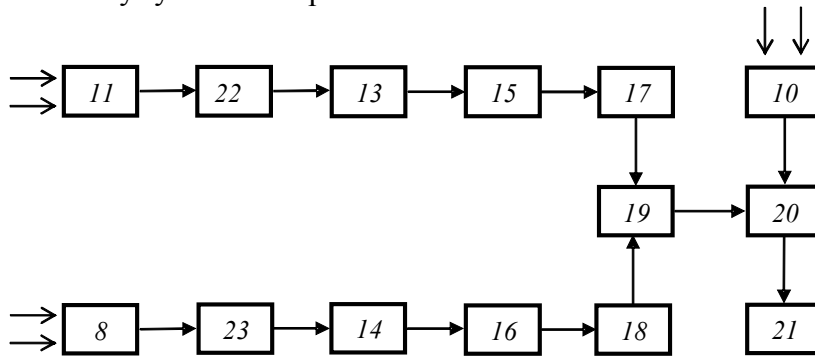


Рис. 3

С учетом уравнений (1) и (2) выражение для определения угла наклона поверхности объекта в окрестности исследуемой точки примет следующий вид:

$$\gamma = \frac{2htg\alpha}{f(1+\cos\theta)}.$$

Процесс измерений с использованием метода голографической интерферометрии можно разделить на три основных этапа:

- выбор методики исследования и регистрация голограммы;
- оптическая обработка голографической интерферограммы и счет интерференционных полос;
- расшифровка и математическая обработка полученной информации.

В настоящее время хорошо разработаны первый и третий этапы. Однако второму этапу — процессу исследований и приборной реализации обработки голографических интерферограмм — уделено недостаточное внимание. Настоящая статья направлена на частичную ликвидацию пробела в этом вопросе. Предложенное устройство может быть использовано при разработке аппаратуры для исследования напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
2. Клименко И. С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
3. Tiziani H. J. A study of the use a laser speckle to measure small tilts of optically rough surfaces accurately // Optical Communication. 1972. Vol. 5, N 12. P. 271—276.

Сведения об авторах

- Игорь Ростиславович Котов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, лаборатория голографии
- Ольга Валериевна Майорова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: maiorova_olga@yahoo.com
- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРОВ И МАТЕРИАЛОВ

УДК 536.2

В. А. КОРАБЛЕВ, Ю. Т. НАГИБИН, А. В. ШАРКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛАМПЫ НАКАЧКИ ЛАЗЕРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОХЛАЖДЕНИЯ

Приводится описание экспериментальной установки для испытаний импульсных ламп накачки лазера и результаты исследований влияния условий охлаждения на спектральный состав и мощность тепловыделений.

Ключевые слова: твердотельный лазер, лампа накачки, система охлаждения, водовоздушное охлаждение, селективно-поглощающие добавки, спектр излучения.

Импульсные газоразрядные лампы являются наиболее распространенным источником накачки активных элементов твердотельных лазеров [1]. Так как плотность тепловыделений на поверхности баллона лампы велика, то для создания компактной и экономичной системы охлаждения необходимо предусмотреть возможность интенсификации теплообмена путем увеличения скорости потока теплоносителя, вдува в поток жидкости мелкодисперсных пузырей воздуха и использования процесса кипения на поверхности.

Для анализа эффективности этих методов на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО была создана экспериментальная установка, главным элементом которой является проточный калориметр. Конструкция калориметра схематично представлена на рис. 1. Импульсная лампа 1 помещена в канал охлаждения 2, наружной стенкой которого является трубка из кварцевого стекла. На входе и выходе канала установлены чувствительные элементы многоспайной дифференциальной термопары, с помощью которой можно измерить перепад температуры в охлаждающей жидкости, возникший вследствие тепловыделений в баллоне лампы и поглощенного в толще жидкости оптического излучения.

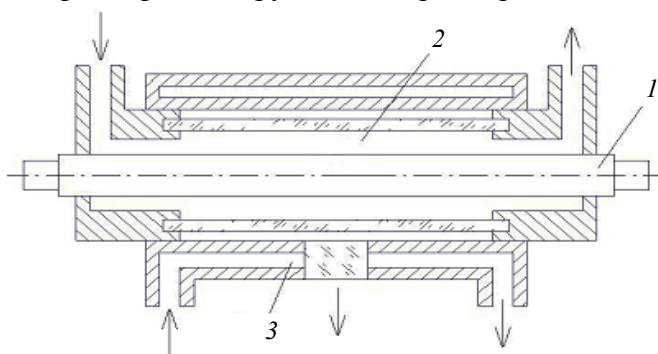


Рис. 1

Канал охлаждения 2 помещен в оболочку 3. Внутри оболочки сделан кольцевой канал для прокачки теплоносителя, охлаждающего внутреннюю поверхность оболочки, на которую падает мощный световой поток от дуги лампы. Для эффективного поглощения излучения поверхность оболочки, обращенная к лампе, зачернена. В оболочке 3 сделано окно из кварцевого стекла для исследования спектра излучения лампы. На входе и выходе кольцевого канала также установлены

чувствительные элементы многоспайной дифференциальной термопары, позволяющей измерить нагрев жидкости вследствие воздействия излучения лампы.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Жидкостные каналы калориметра 1 последовательно подключены к жидкостному термостату 2 типа Т16А. Расход циркулирующей жидкости в замкнутом контуре измерялся с помощью ротаметра. Для питания лампы накачки ИНП 7/70 использовался блок питания 3 типа БП 5000. Излучение лампы через окно в корпусе калориметра и оптическую систему 4 подавалось в спектрограф 5 типа ИСП-51. Для измерения сигнала от термопар использовались цифровой вольтметр 6 типа В7-21 и потенциометр 7 типа НЗ7.

Для создания водовоздушного мелкодисперсного потока в каналах охлаждения установлен компрессор 8, воздух из которого закачивается в поток жидкости через форсунку.

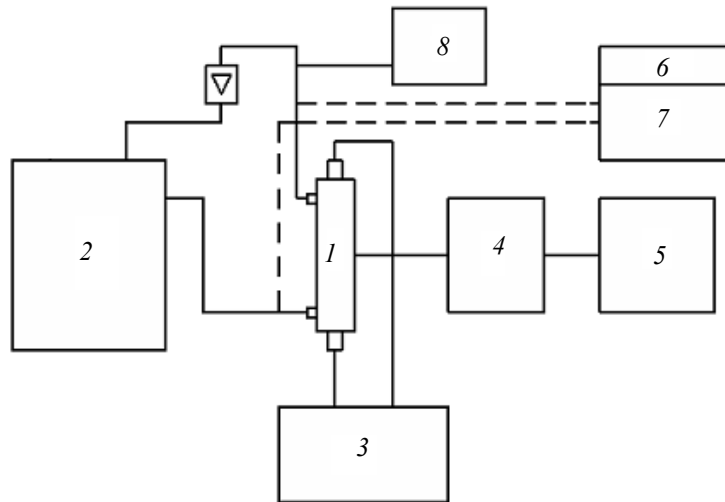


Рис. 2

Мощность поглощенной энергии $\Phi_{1,2}$ в каналах калориметра определяется по формуле [2]

$$\Phi_{1,2} = cG\Delta t_{1,2},$$

где G и c — расход и удельная теплоемкость теплоносителя; $\Delta t_{1,2}$ — перепад температур между входом и выходом каналов охлаждения лампы и оболочки.

На описанной экспериментальной установке исследовались следующие режимы охлаждения лампы:

- охлаждение дистиллированной водой при различных расходах: от 0,07 до 0,12 кг/с;
- охлаждение двухфазным потоком при расходах воды 0,1 кг/с и воздуха $4,10^{-5}$ кг/с;
- охлаждение потоком воды с температурой, близкой к температуре кипения;
- охлаждение дистиллированной водой с введением селективно-поглощающих добавок (хромпика) в концентрациях n от $2,5 \cdot 10^{-7}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$ кг/м³.

Для выяснения влияния режима охлаждения на спектральные характеристики излучения производилось фотографирование спектра излучения лампы при вышеуказанных режимах на спектрографе ИСП-51. Для идентификации длин волн дополнительно фотографировался спектр излучения железа. Проявленная и зафиксированная фотопластинка исследовалась на микрофотометре, который вычерчивал плотность почернения сфотографированного спектра.

Для расчета спектральной плотности E лучистого потока была проведена градуировка фотометра по планковскому спектру излучения температурной лампы.

Исследования спектрального состава излучения лампы при охлаждении двухфазным потоком воды с мелкодисперсными пузырями показали, что из-за многочисленных светопреломлений на границе воздушных пузырей излучение лампы равномерно во всем диапазоне длин волн ослабляется на 27 %. Аналогичный результат получен и при использовании кипящего потока воды.

Спектральная плотность излучения лампы при различных концентрациях хромпика в потоке охлаждающей жидкости графически представлена на рис. 3 следующими кривыми: 1 — чистая вода; 2 — раствор хромпика с концентрацией $n=2,5 \cdot 10^{-7}$ кг/м³, 3 — $n=5 \cdot 10^{-7}$ кг/м³, 4 — $n=7,5 \cdot 10^{-7}$ кг/м³, 5 — $n=10^{-6}$ кг/м³, 6 — $n=1,25 \cdot 10^{-6}$ кг/м³, 7 — $n=1,50 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. Анализ графика показывает, что концентрация хромпика существенно влияет на поглощение излучения в диапазоне длин волн менее 0,5 мкм, в диапазоне более длинных волн ослабление излучения лампы не было зафиксировано. С помощью селективно-поглощающих добавок можно уменьшить воздействие ультрафиолетового излучения на активный элемент и другие части квантрона, подобрав оптимальную концентрацию с помощью вышеописанной методики.

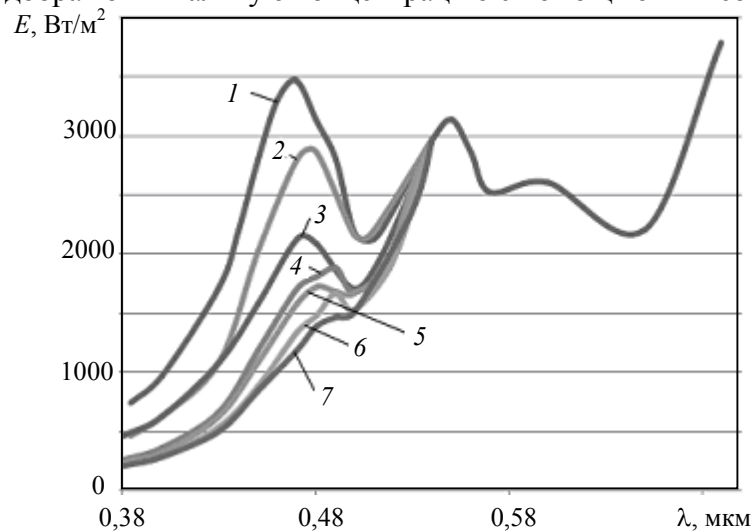


Рис. 3

Баланс тепловыделений в каналах был исследован при охлаждении лампы накачки потоком жидкости с различными концентрациями хромпика и водовоздушным потоком. Расчет выделившейся в канале охлаждения лампы тепловой мощности Φ_1 и тепловой мощности Φ_2 , поглощенной оболочкой, проводился по приведенной выше формуле.

При проектировании системы охлаждения квантрона с отдельными контурами для лампы и активного элемента использование селективного поглощения в коротковолновой части спектра позволяет существенно снизить тепловую нагрузку на активный элемент, в результате чего уменьшается его рабочая температура. Это имеет большое значение для лазерных сред, активированных эрбием и гольмием, так как повышается КПД лазера. Тепловая мощность, поглощенная оболочкой, снизилась практически вдвое, при этом спектральная плотность излучения в области накачки активных сред (см. рис. 3) практически не изменилась.

Использование водовоздушного охлаждения показало, что в канале охлаждения лампы выделяется тепловой поток, примерно на 30 % превышающий величину теплового потока при однофазном охлаждении, причем эта величина мало зависит от расхода жидкости. Использование двухфазного потока интенсифицирует теплообмен в каналах, однако необходимость применения компрессора и сепаратора воздуха на выходе из канала охлаждения усложняет конструкцию и делает установку более шумной.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- описанная экспериментальная установка и методика исследований режимов работы лампы накачки могут быть использованы при разработке систем охлаждения лазеров, в том числе и с применением новых активных сред;

- использование селективно-поглощающих добавок в теплоноситель позволяет перераспределить тепловые потоки в квантроне и улучшить тепловой режим активного элемента;

- интенсификация теплообмена на элементах квантрона с помощью водовоздушных потоков нецелесообразна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малинин А. Н., Шуабов А. К., Шимон Л. Л. и др. Новые высокоэффективные электроразрядные лампы видимого и ультрафиолетового диапазонов спектра // Прикладная физика. 2006. № 1. С. 27—29.
2. Калориметрия. Теория и практика // В. Хеминггер, Г. Хене. М.: Химия, 1990. 176 с.

Сведения об авторах

- Владимир Антонович Кораблев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: KVA@grv.ifmo.ru
- Юрий Тихонович Нагибин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: nagibin77@mail.ru
- Александр Васильевич Шарков** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: Sharkov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

УДК 536.6

Ю. З. БУБНОВ, Г. В. БИРЮЛИН, В. И. ЕГОРОВ, С. В. ПОСТЕРНАКОВ

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ

Представлены результаты конечно-элементного моделирования нестационарного теплового поля мембранной структуры сенсора газосигнализатора с нагревателем, работающим в импульсном режиме.

Ключевые слова: газосигнализатор, мембрана, моделирование, тепловой режим.

В странах с развитой промышленностью выделяются значительные средства на создание систем экологического мониторинга и портативных газоаналитических приборов и сигнализаторов, своевременно информирующих о превышении содержания в воздухе токсичных и горючих газов, что позволяет оценивать границы допустимости технологических процессов и предупреждать нежелательные явления, например пожары.

Анализ путей развития газовых сенсоров показал, что наиболее перспективными для массового применения являются полупроводниковые газовые сенсоры, отличающиеся высокой надежностью, простотой в эксплуатации и низкой стоимостью.

Одна из особо важных задач в повышении потребительских характеристик полупроводниковых газовых сенсоров — снижение их энергопотребления, что связано, в первую очередь, с условиями работы газоаналитических приборов в автономном режиме, т.е. при электропитании от портативных аккумуляторов. Потребляемая мощность этих приборов должна составлять нескольких десятков милливольт.

Как показывает анализ конструкторско-технологических решений по минимизации потерь тепла, наиболее предпочтительным является применение мембранных структур, совмещенных с подложкой сенсора, которая подвешивается к выводам корпуса сенсора с помощью тонкой золотой проволоки. При этом для эффективной экономии тепла при использовании мембраны в рабочей зоне кристалла ее толщина (h) должна быть менее 5 мкм. Минимальная

толщина мембраны при существующих конструкторско-технических ограничениях составляет 2—4 мкм. При выборе конструкции сенсора и параметров режимов работы нагревателя необходимо иметь подробную информацию по распределению температуры в кристалле в различные моменты времени.

В конструкции сенсора используется корпус широко применяемого транзистора; схема конструкции представлена на рис. 1, где 1 — основание корпуса, 2 — крышка, 3 — кремниевая подложка. В крышке 2 имеется отверстие для доступа внутрь корпуса анализируемых газов. На мембране кремниевой подложки размещены компоненты сенсора, изготовленные по пленочной технологии.

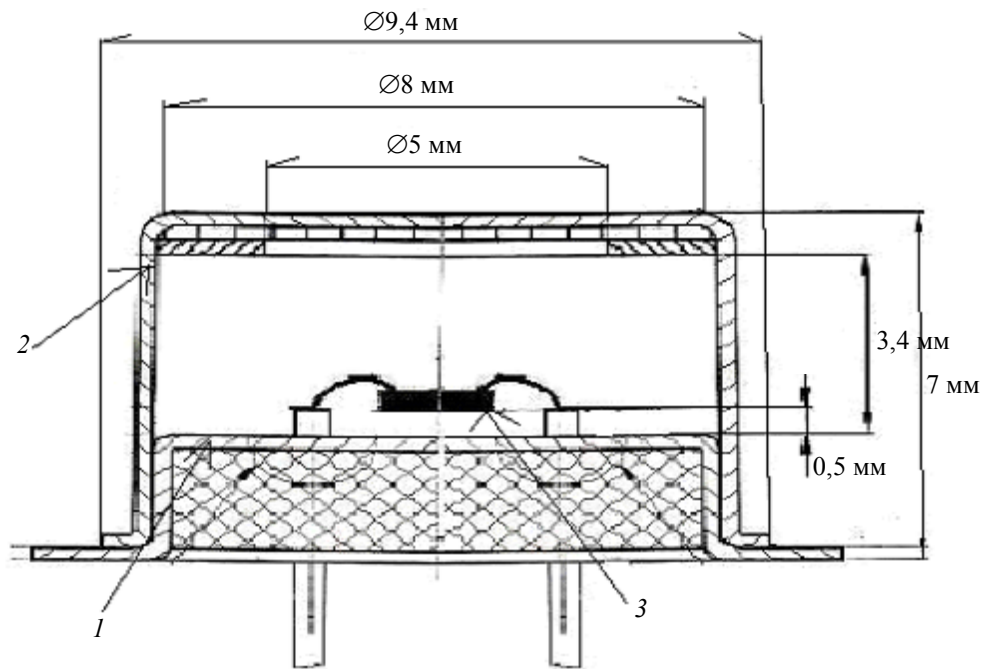


Рис. 1

Нагреватель, в качестве которого используется слой поликремния толщиной 0,4 мкм, размещен в центре мембраны и имеет размеры 0,62×0,68 мм. Нагреватель работает в импульсном режиме с периодом порядка 6 с. Длительность (τ_n) максимального нагрева составляет примерно 1 с. Схематично разрез подложки представлен на рис. 2, где 1 — кремниевая подложка, 2 — мембрана, 3 — чувствительный слой, 4 — нагреватель.

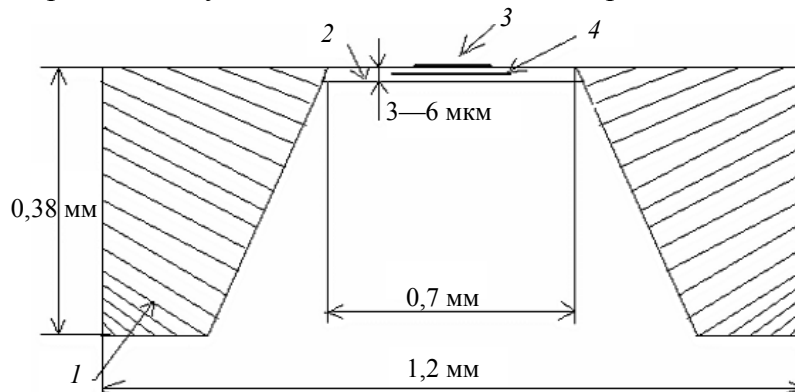


Рис. 2

Расчет нестационарного нелинейного трехмерного температурного поля подложки сложной геометрической формы проводился с помощью компьютерной программы, основанной на методе конечных элементов. В математической и тепловой моделях коэффициенты конвективного теплообмена являются функцией температуры; коэффициент лучистого теплообмена рассчитывался в программе непосредственно по формуле Стефана — Больцмана

при коэффициенте черноты 0,9. По технологическим причинам необходимо обеспечить периодический нагрев сенсора до 450 °С и охлаждение до 100 °С, поэтому напряжение на нагреватель подается в импульсном режиме с периодом примерно 6 с: нагрев — 1 с, остывание — 5 с. Так как сопротивление нагревателя зависит от температуры, его мощность непостоянна.

Экспериментально была определена зависимость сопротивления нагревателя от его температуры; мощность нагревателя в программе задавалась в виде нелинейной функции

$$P(\tau, t) = \frac{U^2(\tau)}{R(t)},$$

где $U(\tau)$ — функция напряжения от времени, $R(t)$ — зависимость сопротивления нагревателя от температуры, $P(\tau, t)$ — функция мощности.

В результате расчета было получено распределение температур в объеме подложки в зависимости от времени для различных толщин мембраны и различной средней мощности импульса. В таблице приведены полученные значения температур, где t_{\max} и t_{\min} — максимальное и минимальное значение температуры чувствительного элемента, расположенного над нагревателем; Δt_n и Δt_m — максимальный перепад температуры по нагревателю и по мембране соответственно.

h , мкм	P , Вт	t_{\max} , °С	t_{\min} , °С	Δt_n , °С	Δt_m , °С
3	0,42	510	90	110	150
3	0,57	570	100	130	220
4	0,42	365	80	70	120
4	0,5	440	90	85	140
4	0,57	515	100	100	165
6	0,57	460	90	70	120

На рис. 3 представлен график распределения температуры $t(x)$ в плоскости мембраны в момент окончания действия нагревателя (при $h = 4$ мкм, $P = 0,42$ Вт), где $x = 0$ соответствует центру мембраны, а $x = 0,35$ мм — краю мембраны.

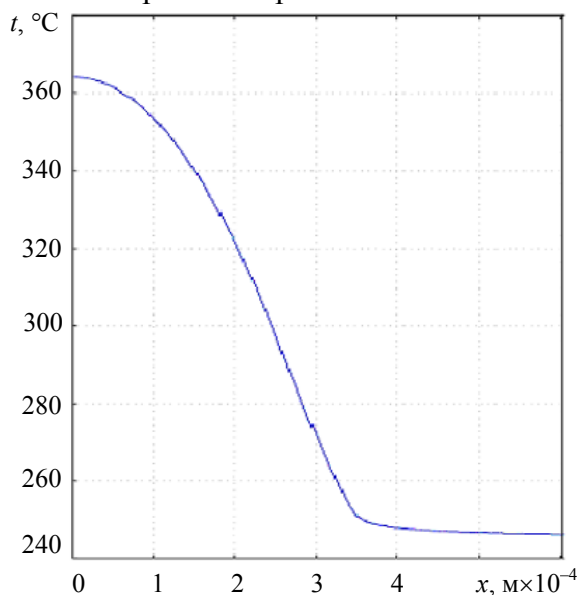


Рис. 3

В процессе нагрева в зоне тепловыделений на мембране возникает высокая неравномерность температурного поля. Наблюдается резкое падение температуры в зоне перехода от мембраны к массиву кремния.

Экспериментальные исследования газоаналитических характеристик сенсоров с мембраной толщиной 3—4 мкм показали, что максимальная величина отклика на 0,5 % CH₄ достигается при $P = 0,4 \pm 0,03$ Вт, при этом длительность нагрева $\tau_n = 1,0$ с, а период 5 с. Эти

параметры хорошо согласуются с данными, приведенными в таблице. Также известно [1, 2], что максимум отклика полупроводникового газового сенсора на метан соответствует температуре его чувствительного элемента (400—430 °С). Это косвенно подтверждает достоверность теплового расчета.

Использование сенсора без мембраны увеличивает среднюю мощность в 3 раза [3], что доказывает эффективность применения мембранных сенсорных структур.

Хорошее соответствие результатов тепловых расчетов и экспериментальных данных свидетельствует о возможности применения полученной тепловой модели при проектировании других типов сенсоров с мембраной и выборе режимов их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов Ю. З. Полупроводниковые газовые сенсоры // Петербургский журнал электроники. 1996. № 3. С. 87—91.
2. Датчики газов: “Figaro” (Япония). М.: Изд. дом „Додэка—XXI“, 2003.
3. Бубнов Ю. З., Голиков А. В., Казак А. В. Полупроводниковые газовые сенсоры и газоаналитические приборы на их основе // Электроника: наука, технология, бизнес. 2008. Спецвыпуск. С. 72—80.

Сведения об авторах

- Юрий Захарович Бубнов** — д-р техн. наук, профессор; ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург; главный конструктор
- Гавриил Владимирович Бирюлин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: gavrila@bk.ru
- Владимир Иванович Егоров** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru
- Сергей Владимирович Постернаков** — ОАО „Авангард“, Санкт-Петербург; вед. инженер

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

УДК 536.6

Д. А. ДАНИЛОВ, В. И. ЕГОРОВ, С. В. ФАДЕЕВА, А. В. ШАРКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Представлены результаты моделирования тепловых и гидродинамических полей в радиоэлектронном аппарате кассетного типа. Сопоставлены результаты расчетов с использованием программы, разработанной на основе метода конечных элементов, и расчетов по программе, реализующей метод поэтапного моделирования.

Ключевые слова: радиоэлектронная аппаратура, моделирование, тепловой режим.

Существующая в настоящее время тенденция к типизации и унификации конструкций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), обусловленная их разнообразием, ведет к автоматизации проектирования устройств и снижению их стоимости. При этом сохраняется необходимость

обеспечения нормального теплового режима РЭА для проведения моделирования тепловых процессов.

В настоящей статье рассматривается герметичный радиоэлектронный аппарат (блок), содержащий модули одного типоразмера. Такие блоки называются кассетными. Обеспечение теплового режима блока осуществляется за счет естественной конвекции. В связи с этим важным аспектом является анализ движения воздуха внутри блока.

Авторами проведено математическое моделирование теплового режима и поля скоростей воздушного потока внутри прибора с помощью пакета программ (П1), разработанных на основе метода конечных элементов. Результаты моделирования сравнивались с программой (П2), реализующей известную методику расчета [1, 2].

Исследуемый кассетный блок состоит из корпуса и модулей, имеющих лицевые панели и разъемы для присоединения кросс-платы. В блоке имеются воздушные каналы: между соседними модулями, между кросс-платой и задней крышкой корпуса (кабельный канал), между модулями и корпусом — боковые, верхний, нижний. Блок кассетного типа имеет два вида конструктивного исполнения: с передней крышкой корпуса (рис. 1) и без передней крышки.

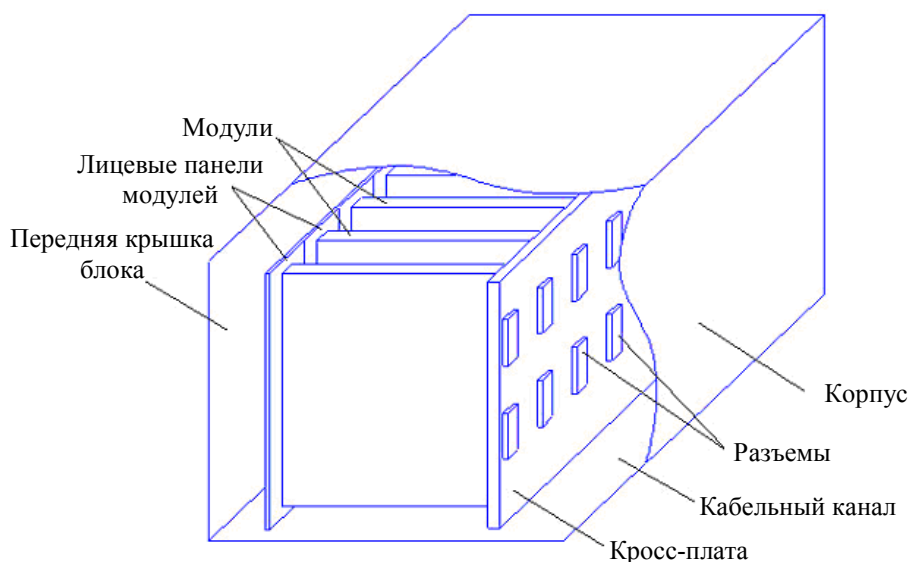


Рис. 1

Геометрические параметры исследуемого блока приведены в таблице.

Элемент блока	Высота h , м	Ширина s (толщина), м	Глубина d (толщина), м
Корпус	0,3	0,47	0,3
Модуль	0,26	0,01	0,28
Кросс-плата	0,26—0,3	0,47	0,002

Воздушные каналы блока имеют следующую ширину: боковые — 0,018 м, верхний и нижний — 0,0175 м, кабельный — 0,013 м, между модулями — 0,015 м.

Температура окружающей воздушной среды $T_{cp} = 40$ °С. Мощность тепловыделений каждого модуля (P_i) одинакова и составляет 8 Вт. Количество модулей (N) 15. Степень черноты всех поверхностей 0,9.

При моделировании тепловой модели приняты следующие допущения:

- все модули представляют собой пластины определенной толщины с вертикальной лицевой панелью и равномерно распределенными по объему источниками теплоты;
- температура модуля (T_i) соответствует его среднеповерхностной температуре;
- температурное поле металлического корпуса прибора равномерное;
- кондуктивные тепловые связи модулей с корпусом блока не учитываются.

В работах [1, 2] и соответственно в программе П2 принято допущение о том, что воздух движется в вертикальном направлении по каналам между модулями, по каналам между крайними модулями и боковыми стенками корпуса [3], а в горизонтальном направлении — между зоной модулей и верхней и нижней стенками корпуса. При этом не учитывается конвективный теплообмен в кабельном канале и в канале между передней крышкой корпуса и лицевыми панелями модулей.

В результате расчета по программам П1 и П2 выявлен перегрев модулей относительно температуры окружающей среды и получены значения поля скоростей воздушного потока и расхода воздуха в каналах.

На рис. 2 графически показано распределение температуры нагрева модулей (ΔT_i) относительно температуры T_{cp} при $P_i = 8$ Вт для блока с передней крышкой (рис. 2, а) и без нее (рис. 2, б): кривая 1 соответствует расчету по программе П2, а кривые 2 и 3 отражают результаты моделирования (программа П1) соответственно при открытом и закрытом кабельном канале (при ширине канала между модулями 15 мм). Значения $\Delta T_{i, П2}$ (рассчитанные по программе П2) мало различаются для блока с передней крышкой и без нее. При этом $\Delta T_{i, П1} > \Delta T_{i, П2} = 17\%$ для блока без крышки и $\Delta T_{i, П1} < \Delta T_{i, П2} = 5\%$ для блока с передней крышкой; наличие крышки увеличивает перегрев модулей (по программе П1 — на 20 %). Массовый расход воздуха в каналах между модулями (для обоих конструктивов) остается на уровне 0,0001 кг/с (по программе П2) и на уровне 0,0002 кг/с (по программе П1).

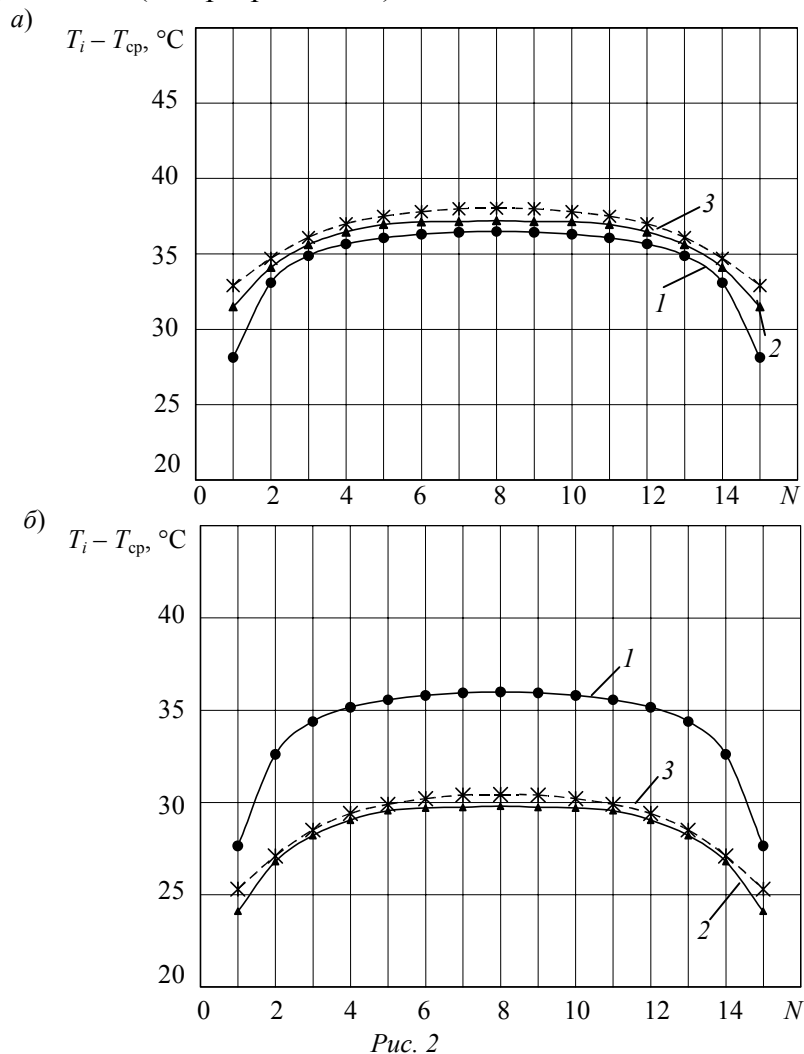


Рис. 2

При моделировании блока без передней крышки выявлено, что в каналах между модулями в зоне, прилегающей к их лицевым панелям, движение воздуха направлено вниз. При

этом образуется область циркуляции воздуха, которая захватывает в среднем 30 % площади модуля (рис. 3).

Для вычисления средних значений массовых расходов воздуха в каналах была проведена серия расчетов при следующих диапазонах изменения параметров: мощность тепловыделений модуля — от 4 до 16 Вт; ширина кабельного канала — от 0 до 0,03 м; ширина верхнего канала — от 0,01 до 0,07 м; ширина нижнего канала — от 0,01 до 0,04 м. Расход воздуха, поступающего снизу в канал между модулями, распределяется следующим образом: 30 % поступает сверху в кабельный канал, 70 % — в направлении соседних каналов.

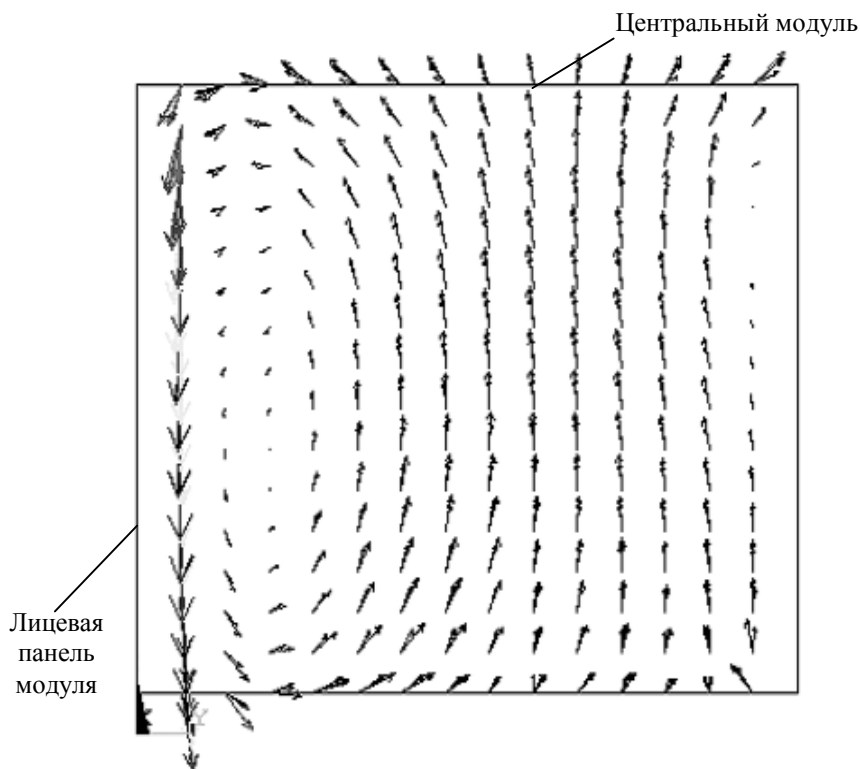


Рис. 3

Было также проанализировано влияние ширины канала между модулями на величину перегрева центрального модуля при неизменной мощности всего блока. Моделирование показало, что с увеличением расстояния между модулями изменяется характер пространственного распределения скорости воздуха в каналах, в частности увеличивается область циркуляции.

В блоке с передней крышкой при закрытом кабельном канале выявляются две области циркуляции в канале между модулями: в одном случае воздух циркулирует в зоне лицевой панели модуля, в другом — в зоне кросс-платы. Результаты расчета перегрева модулей по существующей методике [1] являются заниженными на 5 % для блоков с передней крышкой и завышенными на 20 % для блоков без передней крышки, что обусловлено принятыми допущениями при расчете параметров движения воздуха в каналах РЭА.

В заключение отметим, что учет особенностей движения воздуха в каналах радиоэлектронного аппарата позволяет повысить точность расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990.
2. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в РЭА. М.: Высш. школа, 1984.
3. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.

Сведения об авторах

- Даниил Александрович Данилов** — ФГУП „Аврора“, Санкт-Петербург; инженер
Владимир Иванович Егоров — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru
Светлана Викторовна Фадеева — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга
Александр Васильевич Шарков — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: ktf@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию 07.12.09 г.

УДК 536.2:536.5:53.087

К. С. КОСТЕНКО, Г. Н. ЛУКЪЯНОВ, Д. С. ПЕТРОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Рассмотрены особенности теплообмена через ограждающие конструкции зданий и сооружений в статическом и динамическом режимах. Приведены результаты экспериментов по измерению колебаний температуры вне и внутри здания и анализ их взаимосвязи.

Ключевые слова: ограждающая конструкция, теплообмен, тепловая инерция, спектральная плотность мощности, фазовый сдвиг.

Экспериментальное исследование теплообмена через ограждающую конструкцию (ОК) является основой для решения задач контроля качества тепловой изоляции и оценки тепловой эффективности зданий и сооружений.

Существующие методики оценки тепловой эффективности базируются на стационарных методах, основная суть которых состоит в следующем. Для рассматриваемой задачи тепловая схема процесса теплопередачи может быть представлена как одномерная задача теплопроводности через плоскую многослойную стену: схема процесса представлена на рис. 1, где Q — тепловой поток, проходящий через ограждающую конструкцию; T_1, T_2, \dots, T_n — температура на границе 1-го, 2-го, ..., n -го слоя ОК; $T_{ср1,2}$ — температура окружающей среды при различных погодных условиях; $T_{вн.п}$ — температура воздуха внутри помещения; $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ — толщина 1-го, 2-го, ..., n -го слоя ОК

Уравнение для определения теплового потока имеет следующий вид:

$$Q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i} S,$$

где $\sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ — суммарное термическое сопротивление n слоев ОК; S — площадь ОК;

δ_i, λ_i — толщина и коэффициент теплопроводности материала i -го слоя ОК соответственно.

Для расчетной схемы процесса теплопередачи (см. рис. 1) при установившемся тепловом режиме ОК тепловые потоки, проходящие через каждый из слоев конструкции, одинаковы. Термическое сопротивление и площадь ОК остаются неизменными, а тепловой поток поддерживается системой управления теплоснабжением здания на уровне, обеспечивающем нормативные параметры воздуха внутри помещения.

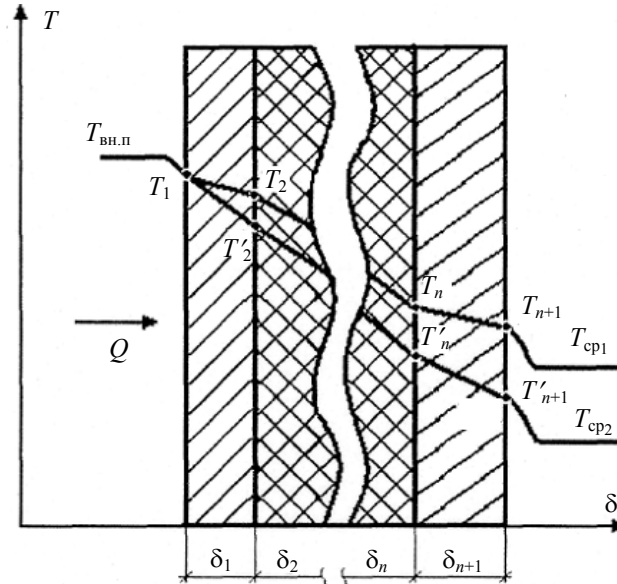


Рис. 1

Таким образом, переменными параметрами процесса теплопередачи для рассматриваемого случая являются разность температур вне и внутри помещения ($\Delta T = T_1 - T_{n+1} \neq \text{const}$) и находящийся в пропорциональной зависимости от нее тепловой поток через ОК ($Q \neq \text{const}$), а неизменным параметром является термическое сопротивление ОК. Тогда, определив удельный тепловой поток через ОК одним из инструментальных методов и используя уравнение теплопроводности

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_1 - T_{n+1}),$$

можно вычислить термическое сопротивление ОК:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{q}.$$

Для получения достоверных результатов при контроле теплозащитных свойств ОК согласно нормативным документам требуется проведение измерений при режиме теплопередачи, близком к стационарному (в условиях отсутствия атмосферных осадков, тумана, задымленности и исключения воздействия на ОК в течение 12 ч до проведения измерений прямого и отраженного солнечного облучения). При этом предусматривается минимальная длительность периода наблюдения Z_0 (в сутках) за температурами воздуха вне и внутри помещения, которая определяется зависимостью [1]

$$Z_0 = \frac{Z_1 D^2}{2\pi},$$

где D — тепловая инерция ОК при периоде колебаний температуры воздуха, равном 24 ч.

По результатам натурных испытаний строятся графики изменения во времени температур и плотности тепловых потоков (рис. 2), по которым выбираются периоды с наиболее установившимся режимом и вычисляются средние значения термического сопротивления для данного периода; на рис. 2: a — изменения температуры воздуха внутри помещения

$T_{\text{вн.п}}$ (кривая 1) и температуры воздуха окружающей среды $T_{\text{ср}}$ (кривая 2); б — изменение температуры $T_{\text{ср}}$; в — изменение теплового потока через ОК; г — изменения $T_{\text{вн.п}}$ (кривая 1) и $T_{\text{ср}}$ (кривая 2) — нормированные значения.

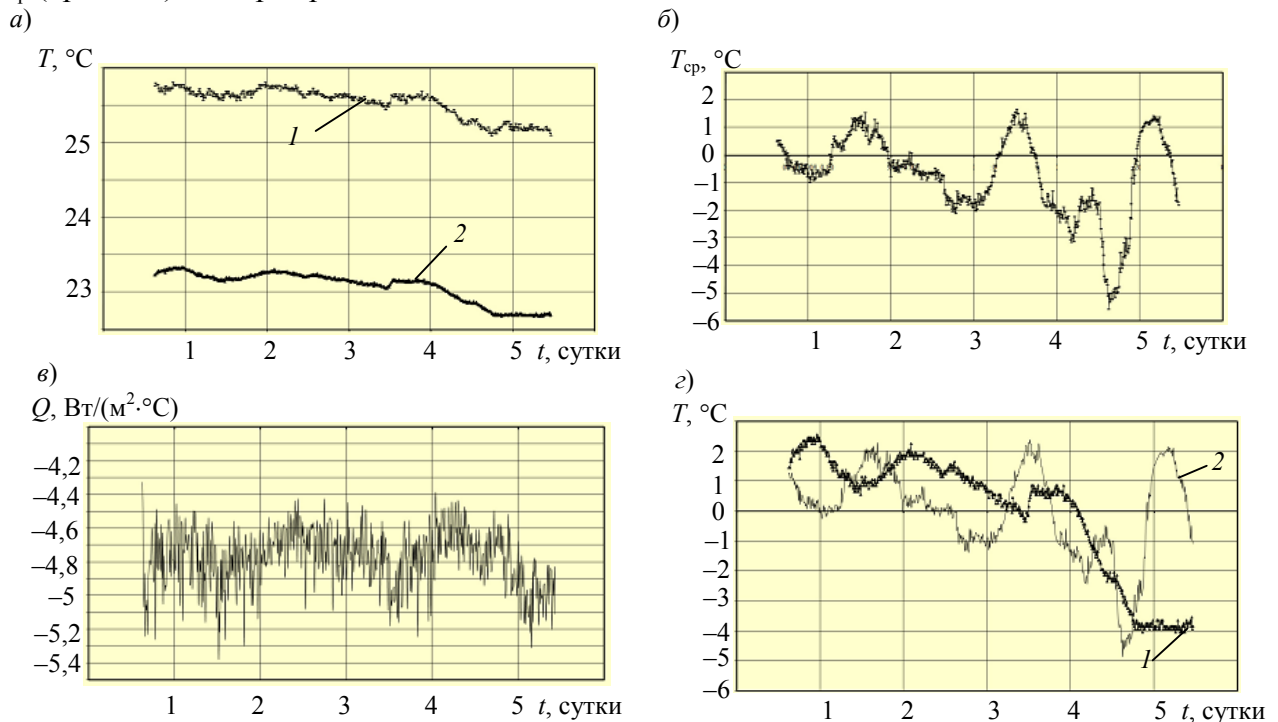


Рис. 2

Далее, согласно методике [2], по результатам измерений для расчетов выбирается период отклонения среднесуточной температуры наружного воздуха от среднего ее значения за этот период в пределах $\pm 1,5$ °С. Данные ограничения позволяют снизить влияние теплоемкости ограждающей конструкции (которая не учитывается в методике расчета тепловых сопротивлений) на тепловой поток. Вследствие непредсказуемости погодных явлений эти условия не всегда удается выполнить, но согласно методике [2] эти данные для расчетов не используются. Однако они содержат полезную информацию о поведении ограждающих конструкций в процессе изменения условий окружающей среды, что позволяет получить дополнительные данные для оценивания изоляционных свойств ОК.

Для оценки термического сопротивления ОК при нестационарном процессе можно использовать колебания температуры окружающей среды и колебания температуры внутренней поверхности стены. О теплофизических свойствах ОК можно судить по запаздыванию колебаний температуры ее внутренней поверхности относительно колебаний температуры окружающей среды, а также по коэффициенту передачи этих колебаний.

Определить запаздывание колебаний температуры внутри помещения относительно температуры окружающей среды можно путем определения взаимной спектральной плотности мощности [1]:

$$S_{xy}(f) = |X(f)Y^*(f)|,$$

где $X(f)$ — фурье-преобразование от колебаний температуры окружающей среды; $Y(f)$ — фурье-преобразование от колебаний температуры в помещении; $S_{xy}(f)$ — функция взаимной спектральной плотности мощности колебаний температуры в помещении и вне его.

Взаимная спектральная плотность мощности позволяет определить, какой частоте соответствует максимальная интенсивность взаимодействия между внешней средой и помещением, и чему равен фазовый сдвиг колебаний температуры внутри помещения относительно колебаний температуры вне его.

Как показывает анализ рис. 2, а, з, колебания температуры вне и внутри помещения происходят синхронно с периодом 24 ч, но с временным сдвигом, составляющим примерно 11 ч.

На рис. 3 показан результат вычисления функции взаимной спектральной плотности мощности, которая представлена как фаза (кривая 1) и модуль (кривая 2). Максимальное взаимодействие происходит на частоте $1 \cdot 10^{-4}$ Гц, что соответствует периоду в 24 ч, сдвиг по фазе составляет 3,45 рад, что соответствует временному сдвигу, равному 11,5 ч.

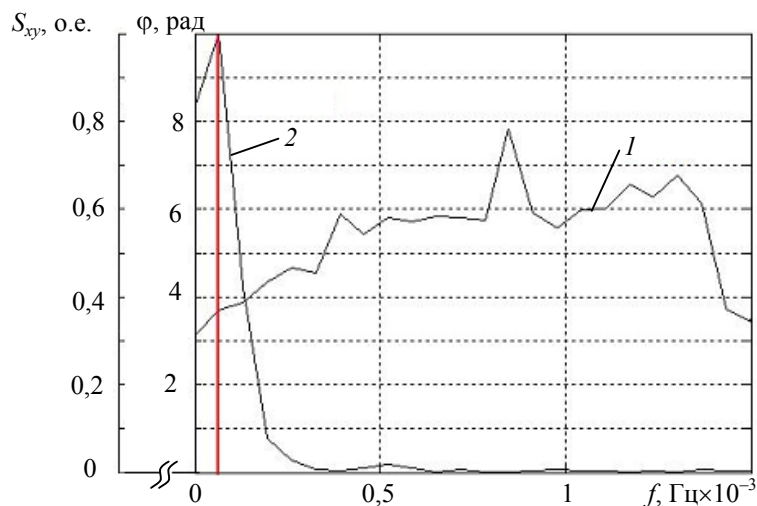


Рис. 3

Описанным выше образом были обработаны результаты измерений по 18 объектам с конструктивно схожими решениями. Результаты показали, что на 16 объектах значения фазового сдвига колебаний температуры внутри помещения относительно температуры вне его находятся в диапазоне от 3,4 до 3,8 рад. На данных объектах не было выявлено существенных дефектов тепловой изоляции, а термическое сопротивление по результатам измерений превышало нормативное значение. На двух объектах значение фазового сдвига составило менее 3,3 рад, а термическое сопротивление ограждающих конструкций было ниже нормативного.

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований, позволяют оценить не только термическое сопротивление ограждающей конструкции, но и влияние ее теплоемкости на тепловые потоки и теплоизоляционные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
2. Сидельников С. С., Лездин Д. Ю., Мотуз М. И. Комплексная методика контроля качества ограждающих конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой РФ, 2002.

Сведения об авторах

- Константин Сергеевич Костенко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: kks@sald.ru
- Геннадий Николаевич Лукьянов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; E-mail: gen-lukjanow@yandex.ru
- Дмитрий Сергеевич Петров** — ЗАО „Техника. Тепловидение. Медицина“, Санкт-Петербург, директор; E-mail: ttm@ttm.spb.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

Д. П. ВОЛКОВ, М. В. УСПЕНСКАЯ

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ

Представлены результаты расчета теплопроводности полимерных материалов с наполнителем из стеклянных микрошариков. Показано, что повышение концентрации наполнителя приводит к росту теплопроводности композиции. Результаты расчета сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: полимерные композиции, структура, модель, теплопроводность.

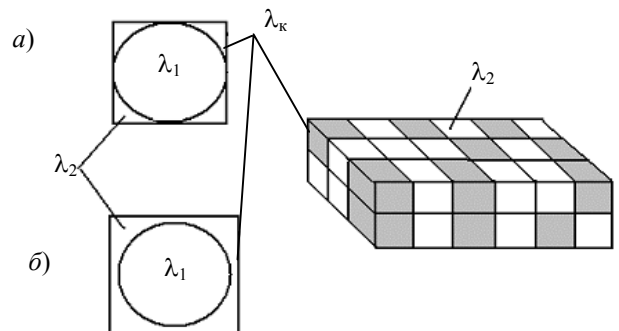
Широкое использование уретановых эластомеров для получения конструкционных изделий требует введения в исходные матрицы наполнителей, существенно повышающих их эксплуатационные и технологические свойства. В качестве наполнителей при производстве изделий из литевых полимеров часто используются стеклянные микрошарики (СМШ).

Для расчета теплофизических свойств известных наполненных полимеров (компаундов) и разработки новых компаундов с заданными теплофизическими свойствами необходимо знать зависимость между эффективной теплопроводностью наполненной композиции, свойствами ее компонентов и их концентрацией. Эта зависимость может быть получена теоретически на основании анализа процесса переноса тепла в компаундах, если последние представить в виде гетерогенной системы с определенной структурой.

Обычно структура компаунда и его свойства изучаются на модели с неконтактирующими вкраплениями наполнителя [1] или на модели зернистой системы с постоянно контактирующими частицами (цепочечная структура) [2].

Структура компаунда меняется в зависимости от концентрации наполнителя. При низких концентрациях вероятность контакта между частицами мала, с увеличением концентрации она монотонно повышается, образуя в системе непрерывные пространственные цепочки. Такую систему можно описать двухслойной моделью с ограниченно хаотическим распределением компонентов [3].

Будем считать (для упрощения) все частицы наполнителя микрошариками одного диаметра. Если вокруг сферы (частицы) описать тело, например куб, и считать, что куб заполнен веществом с некоторой эффективной теплопроводностью λ_k , то можно рассматривать процесс переноса тепла на примере двухкомпонентной модели, состоящей из плотно уложенных (без пустот) кубов двух типов: кубов с теплопроводностью λ_2 материала связующего компонента и кубов с теплопроводностью λ_k (см. рисунок, а).



Опуская вывод расчетной формулы, запишем выражение для теплопроводности λ_k , полученное с помощью приема адиабатического дробления:

$$\lambda_k = \lambda_2 \left[0,215 + \frac{1,57}{1-\nu} \left(\frac{1}{1-\nu} \ln \frac{1}{\nu} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

где $\nu = \lambda_2 / \lambda_1$; λ_1 — теплопроводность зерен наполнителя.

Теплопроводность компаунда — как гетерогенной системы — определяется выражением

$$\lambda = \lambda_k (m_1')^2 + 4m_1' m_2' \frac{\lambda_k \lambda_2}{\lambda_k + \lambda_2} + \lambda_2 (m_2')^2, \quad (2)$$

где m'_2 — объемная концентрация связующего, не вошедшего в кубы; m'_1 — объемная концентрация кубов, связанная с объемной концентрацией наполнителя (частиц) m_1 зависимостью

$$m'_1 = \frac{m_1}{1-0,476} \approx 1,91m_1, \quad m'_2 = 1-m'_1. \quad (3)$$

Здесь объемная концентрация полимера внутри куба принята равной $m_2 \approx 0,476$. Такая модель позволяет рассчитать теплофизические свойства компаунда с наполнителем, занимающим до 52,4 % объема компаунда в целом (практически предельно возможное значение объемной концентрации наполнителя).

Любая наполненная пластическая масса состоит из трех компонентов: наполнитель — межфазный слой (МФС) — связующее (полимер). В состав МФС входят: адсорбционный слой полимера, поверхностный слой наполнителя, изменившийся под действием полимера, продукт возможного химического взаимодействия наполнителя и полимера [4]. Толщина МФС в основном определяется толщиной адсорбционного слоя. Плотность полимерной части (МФС + связующее) возрастает [5] (уменьшается [6]) с увеличением доли наполнителя. В работах [5, 6] показано, что плотность МФС отличается от плотности полимерной части примерно на 10—15 %. Если предположить (в грубом приближении), что теплопроводность МФС изменяется прямо пропорционально его плотности, то при исходной теплопроводности полимера $\lambda_2 = 0,2$ Вт/(м·К) теплопроводность МФС (при увеличении плотности на 15 %) будет составлять $\lambda_{\text{МФС}} = 0,23$ Вт/(м·К), что практически не отразится на эффективной теплопроводности полимерной композиции в целом. Поэтому в расчетах примем теплопроводность МФС равной теплопроводности полимера λ_2 .

Обращает на себя внимание тот факт, что даже существенное изменение теплопроводности наполнителя (в десятки раз) при одинаковой его концентрации незначительно изменяет теплопроводность полимерной композиции. Последнее можно объяснить тем, что пространственные структуры в суспензиях образуются вандерваальсовыми силами сцепления, связывающими частицы через тонкие остаточные прослойки жидкой среды, в частности полимера. Тогда наполненные полимеры можно рассматривать как систему, состоящую из частиц твердого тела с тонкими полимерными прослойками на поверхности (см. рисунок, б) [7].

Выражение (1) для расчета λ_k в этом случае примет следующий вид:

$$\lambda_k = \lambda_2 \left[0,215 \frac{1+9,33h}{1+3h} + \frac{1,57}{(1+2h)(1-\nu)} \left(\frac{1+h}{1-\nu} \ln \frac{1+h}{h+\nu} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

где $h = \bar{h}/r$ — относительная толщина полимерной прослойки; \bar{h} — толщина полимерной прослойки; r — средний радиус частиц наполнителя; при $h=0$ уравнение (4) принимает вид (1).

Теплопроводность компаунда как гетерогенной системы определяется выражением (2). Объемная концентрация кубов m'_1 в выражении (2) в этом случае связана с концентрацией m_1 наполнителя зависимостью

$$m'_1 = \frac{1+3h}{1-0,476} m_1 = 1,91(1+3h)m_1.$$

По формуле (4) можно рассчитать теплопроводность компаунда при различных диаметрах (D) наполнителя. При больших размерах частиц наполнителя, т.е. при $r/\bar{h} > 1000$, и не большом отличии в теплопроводности компонентов ($\lambda_1/\lambda_2 < 100$) целесообразно при расчете теплопроводности пользоваться формулами (1)—(3).

Расчеты коэффициента теплопроводности на основе данной модели по приведенным формулам проводились на полиуретановых олигомерах марок СКУ-ПФЛ-100, СКУ-ППЛ-65 и СКУ-7Л. В качестве наполнителей использовались стеклянные микрошарики диаметром

$D \leq 100$ мкм. Массовая концентрация наполнителей в композите изменялась в пределах 5—60 %. Сопоставление расчетных (λ_p) и экспериментальных (λ_s) [8] значений теплопроводности наполненных полимеров приведено в таблице.

Температура, °С	Теплопроводность композита, Вт/(м·К)											
	СКУ-ПФЛ-100, СМШ — 5 %		СКУ-ПФЛ-100, СМШ — 20 %		СКУ-ПФЛ-100, СМШ — 60 %		СКУ-ППЛ-65, СМШ — 60 %		СКУ-7Л, СМШ — 10 %		СКУ-7Л, СМШ — 60 %	
	λ_p	λ_s	λ_p	λ_s	λ_p	λ_s	λ_p	λ_s	λ_p	λ_s	λ_p	λ_s
50	0,146	0,143	0,170	0,161	0,279	0,277	0,232	0,234	0,158	0,160	0,317	0,310
75	0,152	0,150	0,176	0,169	0,291	0,282	0,243	0,250	0,165	0,169	0,336	0,320
100	0,157	0,159	0,183	0,180	0,307	0,297	0,255	0,265	0,172	0,179	0,357	0,331
125	0,161	0,168	0,189	0,188	0,328	0,315	0,272	0,285	0,177	0,190	0,380	0,353
150	0,167	0,176	0,196	0,201	0,343	0,327	0,281	0,310	0,183	0,200	0,392	0,366

Анализ таблицы показывает, что при увеличении температуры наблюдается увеличение теплопроводности композиций независимо от их состава. Повышение концентрации наполнителя, обладающего большей теплопроводностью, чем полимерная матрица, приводит к увеличению теплопроводности композиции. Результаты расчета показывают хорошее качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными. Относительная погрешность не превышает 9 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оделевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. 1951. Т. 21, вып. 6. С. 667—685.
2. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974.
3. Заричняк Ю. П., Лисенко Т. А. Исследование теплофизических свойств двойных твердых растворов титана, циркония и гафния // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1976. Т. 19, № 5. С. 117—123.
4. Сагалаев Г. В., Симонов-Емельянов И. Д. Оценка свойств межфазного слоя в наполненных полимерных системах // Пластические массы. 1973. № 2. С. 48—52.
5. Тростянская Е. Б. Отверждение наполненных пластмасс // Изделия из пластмасс с заданными свойствами. М.: МД НТП, 1972. С. 18—26.
6. Рафиков М. Н., Гузев В. В., Мальшева Г. П. Об оценке толщины полимерного слоя, адсорбированного наполнителем // Высокомолекулярные соединения. 1971. Т. 13(А), № 11. С. 2625—2626.
7. Липатов Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977.
8. Волков Д. П., Кулиева Л. А., Успенская М. В., Токарев А. В. Исследование теплопроводности полимерных композиционных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 1. С. 75—77.

Сведения об авторах

Дмитрий Павлович Волков

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга;
E-mail: dpv@grv.ifmo.ru

Майя Валерьевна Успенская

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи;
E-mail: mv_uspenskaya@mail.ru

Рекомендована кафедрой компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию 07.12.09 г.

ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАТЕРИАЛЫ

УДК 535: 621.373.826:539

А. В. БЕЛИКОВ, А. Е. ПУШКАРЁВА, А. В. СКРИПНИК,
Т. В. СТРУНИНА, К. В. ШАТИЛОВА

ЛАЗЕРНОЕ ТЕКСТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Предложен метод лазерного текстурирования поверхности твердого материала в целях повышения его адгезии к полимерам. Показано, что лазерное текстурирование способствует увеличению усилий на сдвиг практически в 3 раза.

Ключевые слова: YAG:Er-лазер, лазерное текстурирование, адгезия, эмаль, полимер.

Введение. Создание новых и совершенствование существующих методов соединения материалов крайне актуально для широкого круга технологий. Механическая прочность соединений определяется как степенью адгезии, так и площадью адгезионного контакта.

Различают несколько механизмов адгезии [1]. Согласно молекулярному (адсорбционному) механизму адгезия возникает под действием межмолекулярных вандерваальсовых сил и водородных связей. Для такой адгезии применимо известное правило сходства веществ по полярности, а именно: чем ближе по полярности адгезив и субстрат, тем более прочен контакт между ними. Электрическая теория связывает адгезию с возникновением двойного электрического слоя на границе раздела между адгезивом и субстратом. Отслаивание, как и раздвижение, обкладок конденсатора вызывает увеличение разности электрических потенциалов, что обуславливает прочность адгезионного контакта. Диффузионный механизм адгезии предусматривает взаимное проникновение молекул и атомов в поверхностные слои взаимодействующих фаз. Процесс диффузии приводит, можно сказать, к размыванию границы раздела фаз, взаимному их растворению в местах контакта. Отдельно выделяется механизм, обусловленный химическим взаимодействием при адгезии. В конкретных условиях может преобладать один из механизмов, чаще же механизм адгезии является смешанным.

В настоящей статье предлагается новый способ повышения механической прочности соединения материалов. Суть этого способа заключается в увеличении площади соприкосновения материалов адгезива и субстрата за счет создания с помощью лазерного излучения на поверхности твердого материала текстур, представляющих собой последовательность микродефектов. Теоретически показано, как прочность соединения при постоянной адгезии зависит от размера формируемых дефектов и расстояния между их центрами.

В ходе экспериментальных исследований были созданы текстуры на поверхности эмали. Для этого применялось излучение YAG:Er-лазера, работающего в режиме основной поперечной моды. В качестве адгезива использовался светополимеризующийся стоматологический пломбировочный материал. Прочность сформированного соединения измерялась в условиях, когда прикладываются усилия на сдвиг [2, 3].

Описание метода. Работа адгезии W_a , характеризующая прочность адгезионной связи, определяется работой обратимого разрыва адгезионной связи, отнесенной к единице площади. Полная работа адгезии W , приходящаяся на всю площадь S контакта тел, равна $W = W_a S$. Отношение полной работы адгезии в случае модифицированной поверхности (W_{s_1}) к полной работе адгезии в случае гладкой поверхности (W_s) выражается уравнением

$$\frac{W_{s_1}}{W_s} = \frac{S_1}{S}, \quad (1)$$

где S_1 — площадь модифицированной (текстурированной) поверхности.

Гладкая поверхность имеет форму квадрата со стороной X (рис. 1, а).

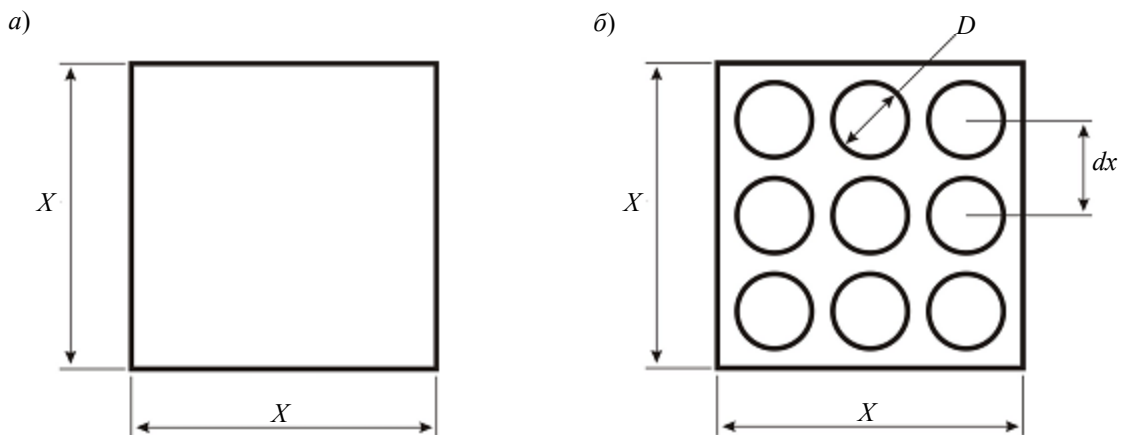


Рис. 1

Текстурированную поверхность можно представить в виде суперпозиции гладкой поверхности и поверхности с микродефектами, представляющими собой полусферы диаметром D , расстояние между центрами которых равно dx (рис. 1, б). Площадь такой поверхности

$$S_1 = S_{\text{sph}} + S_0,$$

здесь S_{sph} — площадь поверхностей всех полусфер, S_0 — площадь оставшейся ровной поверхности; величина $S_{\text{sph}} = S_{\text{sph}i} \cdot N$, где $S_{\text{sph}i} = 0,5\pi D^2$ — площадь поверхности одной полусферы, N — их количество. Максимальное количество полусфер, которое можно без перекрытия разместить на поверхности, имеющей форму квадрата, равно

$$N_{\text{max}} = \left(\frac{X}{dx} \right)^2.$$

Таким образом, полная площадь модифицированной поверхности, при условии, что полусферы не перекрываются, определяется как

$$S_1 = S_{\text{sph}} + S_0 = 0,5\pi D^2 \left(\frac{X}{dx} \right)^2 + X^2 - 0,25\pi D^2 \left(\frac{X}{dx} \right)^2 = 0,25\pi D^2 \left(\frac{X}{dx} \right)^2 + X^2.$$

В этом случае отношение полных работ адгезии для модифицированной и гладкой поверхностей характеризуется выражением

$$\frac{W_{s_1}}{W_s} = \frac{S_1}{S} = \frac{0,25\pi D^2 \left(\frac{X}{dx} \right)^2 + X^2}{X^2} = \frac{0,25\pi D^2}{dx^2} + 1. \quad (2)$$

В эксперименте в качестве объекта исследования были использованы зубы человека (принадлежащие людям возрастной категории 25—40 лет), удаленные по показаниям заболеваний пародонта. Для поддержания естественных свойств образцы хранились в 0,1%-ном

водном растворе тимола при температуре около 4 °С не более двух недель в защищенном от света месте. Для создания микродефектов использовался одномодовый YAG:Er-лазер с длиной волны излучения 2,94 мкм, работающий в режиме свободной генерации. Энергия излучения в зоне обработки составила 1,0 мДж ($\pm 3,5\%$), длительность лазерного импульса по полувысоте 100 мкс ($\pm 10\%$). Воздействие проводилось в неконтактном режиме. Поверхность эмали коронки зуба позиционировалась в фокусе собирающей линзы с фокусным расстоянием $38,0 \pm 0,1$ мм, зуб перемещался в двух взаимно ортогональных направлениях при помощи сканера в плоскости, перпендикулярной направлению оптической оси линзы.

Под действием одиночного лазерного импульса на поверхности эмали формировался микродефект диаметром $D \approx 100$ мкм. Посредством смещения зуба в перерывах между лазерными импульсами на расстояние $dx = 100$ мкм формировалась текстура, представляющая собой квадрат со стороной $X = 2$ мм. На поверхность, содержащую текстуру, наносился пломбировочный материал “Revolution” (фирмы “Kerr”, США), который полимеризовался с помощью потока света, создаваемого источником “Allegro™ Rembrandt®”, в течение 30 с. В качестве стандартной использовалась технология, при которой на гладкую поверхность эмали сначала наносится состав “Nano-Bond Self-Etch Primer”, затем адгезив “Nano-Bond Adhesive” и далее материал “Revolution” с последующей его полимеризацией.

Всего в ходе эксперимента было исследовано 10 образцов эмали, обработанных по стандартной методике, и 10 образцов эмали, подвергнутых лазерному текстурированию. В обоих случаях в объем материала “Revolution” помещались штифты из конструкционной стали, с помощью которых производилась фиксация образцов в устройстве РМУ-0,05-1, предназначенном для измерения разрывного усилия на сдвиг.

Результаты. На рис. 2 представлен график полученной из выражения (2) зависимости отношения полных работ адгезии от размеров и взаимного расположения микродефектов в текстуре. Как видно из графика, при фиксированном расстоянии между центрами микродефектов в текстуре адгезия тем выше, чем больше диаметр полусферы.

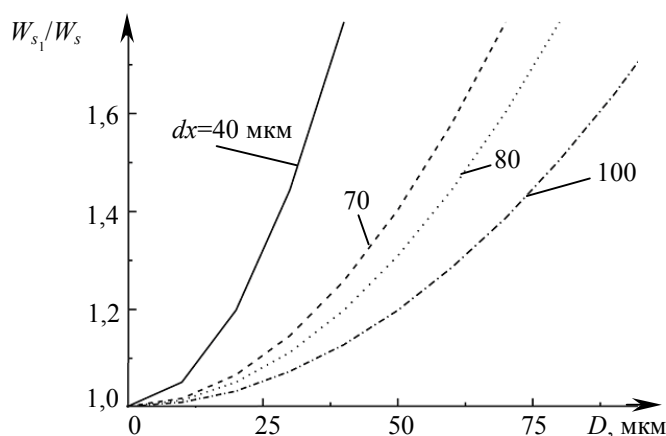


Рис. 2

Следует отметить, что при фиксированном размере (X) текстурированной поверхности с уменьшением диаметра D полусфер возрастает количество микродефектов, что увеличивает затраты лазерной энергии, необходимые для формирования текстуры.

Выбор диаметра микродефекта зависит от многих факторов. Непременным требованием в ряде случаев является минимизация диаметра.

К недостаткам предложенной модели расчета отношения W_{s1}/W_s следует отнести то, что при ее использовании не учитывается влияние на прочность соединения микрорельефа, возникающего на поверхности микродефектов. Характерные размеры элементов этого рельефа могут быть сопоставимы с размерами структурных элементов обрабатываемого материала [4], что

способствует увеличению адгезии не за счет механических эффектов, а вследствие межмолекулярного взаимодействия.

Внешний вид текстур, сформированных лазерным излучением на поверхности зубной эмали, продемонстрирован на рис. 3.

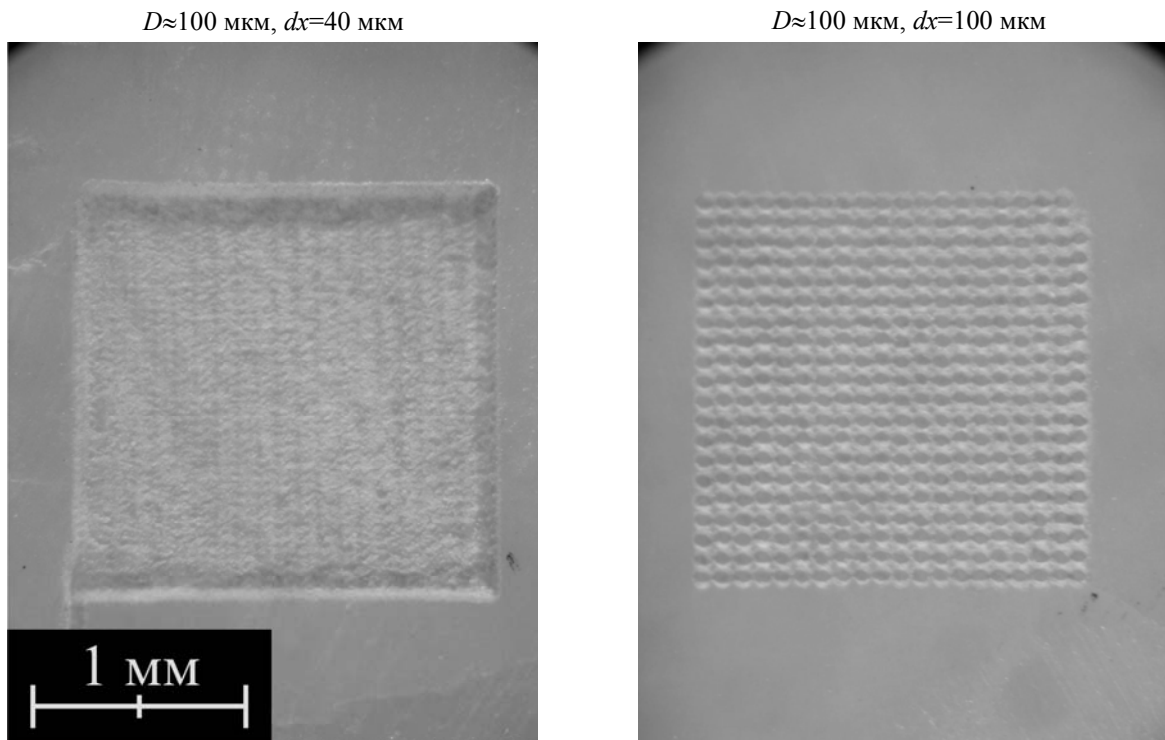


Рис. 3

На рис. 4 представлены результаты измерений прочности на сдвиг (P) соединений эмали зуба и пломбировочного материала “Revolution”, образованных в рамках применения стандартной технологии к химически модифицированной поверхности (I) и новой технологии к поверхности (II), содержащей текстуру, сформированную излучением YAG:Er-лазера при $D \approx 100$ мкм и $dx = 100$ мкм.

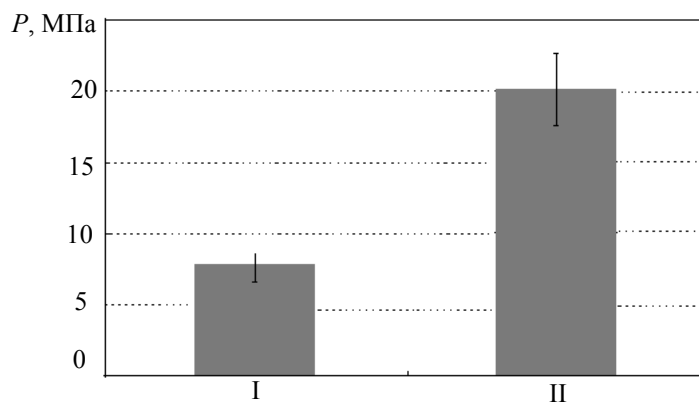


Рис. 4

Рассмотренный в статье новый способ повышения механической прочности соединений материалов и подготовки поверхности перед нанесением на нее полимера демонстрирует, прежде всего, следующее: прочность соединения материала “Revolution” с поверхностью, содержащей сформированную лазерным излучением текстуру, практически в 3 раза выше, чем с немодифицированной поверхностью. В рамках предложенной геометрической модели текстуры показано, что увеличение адгезии только за счет механических эффектов способствует

ее росту лишь в 1,8 раза. Данное противоречие свидетельствует о существовании дополнительных механизмов повышения адгезии, к числу которых могут быть отнесены, например, механизмы, связанные с вовлечением сил межмолекулярного взаимодействия или с особенностями поверхности микродефектов, создаваемых лазерным излучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин А. А., Басин В. Е. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974.
2. Gardner A. K., Staninec M., Fried D. The influence of surface roughness on the bond strength of composite to dental hard tissues after Er:YAG-laser irradiation // SPIE. 2005. Vol. 5687.
3. Le Ch. Q., Staninec M., Fried D. The influence of pulse duration on the bond strength of dentin to composite after Er:YAG-laser irradiation // SPIE. 2005. Vol. 5687.
4. Keller U., Hibst R. Experimental studies of the application of the Er:YAG-laser on dental hard substances: II. Light microscopic and SEM investigations // Lasers in Surgery and Medicine. 1989. Vol. 9. P. 9345—9351.

Сведения об авторах

- Андрей Вячеславович Беликов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Александра Евгеньевна Пушкарёва** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: alpushkareva@yandex.ru
- Алексей Владимирович Скрипник** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Татьяна Валерьевна Струнина** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; инженер;
E-mail: struninatatiana@mail.ru
- Ксения Владимировна Шатилова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;
E-mail: kshatilova@mail.ru

Рекомендована кафедрой
лазерной техники
и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

Е. Б. ЯКОВЛЕВ, В. В. СВИРИНА, О. Н. СЕРГАЕВА

ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Рассматривается проблема лазерного плавления металлов ультракороткими импульсами. Предложена модифицированная вакансионная модель плавления, на основе которой проведен анализ лазерного плавления и объяснены такие его особенности, как постоянство температуры поверхности металла и наличие потока энергии к фронту плавления без градиента температуры в расплавленном слое.

Ключевые слова: лазерное плавление, вакансионная модель плавления, ультракороткие лазерные импульсы, численное моделирование.

Введение. В последние годы произошел возврат интереса к изучению лазерно-индуцированных фазовых переходов (плавление, кристаллизация) в различных материалах. Было выяснено, что при быстром лазерном нагревании кинетика таких переходов существенно отличается от их протекания в условиях медленного нагревания [1].

Как показывают исследования, при действии ультракоротких лазерных импульсов на металлы плавление происходит при температурах, превышающих температуру плавления. Кроме того, если, в соответствии с существующими представлениями, фронт плавления распространяется с поверхности, то скорость его продвижения оказывается больше, чем допустимая скорость распространения возмущения в металлах — скорость звука [2].

Существует множество теорий плавления [см., например, 3], однако ни одна из них не дает возможности проанализировать кинетику плавления при действии ультракоротких лазерных импульсов, когда необходимо детально знать механизм перехода вещества из твердого состояния в жидкое. Например, предложен механизм гомогенной нуклеации, заключающийся в том, что при значительном перегреве в объеме материала могут возникнуть зародыши жидкой фазы, произойдет объемное плавление [2]. Против этого можно возразить: объем расплава большинства металлов больше, чем объем твердой фазы, поэтому при возникновении зародыша расплава в нем должно вырасти давление, что приведет к увеличению температуры плавления: вероятность образования зародыша резко снижается.

Теории плавления не могут также объяснить, как переносится энергия к фронту плавления при отсутствии градиента температуры в слое расплава, и когда начинается увеличение температуры расплава на поверхности, т.е. когда возникает градиент температуры в расплаве.

Модифицированная вакансионная модель плавления. Основные классические выводы, касающиеся плавления и затвердевания, были получены еще до того, как атомистическая теория стала общепризнанной. До появления методов изучения молекулярной структуры вещества она попросту не принималась во внимание при исследовании термодинамики фазовых превращений. Поэтому современные теории плавления должны описывать через характеристики структуры кристалла и его расплава разнообразные процессы увеличения энтропии кристалла во время его перехода в расплав, строение которого менее упорядочено [3].

В работе [4] предложена модифицированная вакансионная модель плавления, которая может быть применена для описания процесса плавления металла при действии ультракоротких лазерных импульсов.

Основные положения, описывающие построение модели плавления, базирующейся на анализе изменения концентрации вакансий, предложены Френкелем [5, 6]. Эти положения можно сформулировать следующим образом:

— явление плавления связано с резким увеличением числа вакансий в кристалле при увеличении температуры, при этом необходимо учитывать уменьшение энергии образования вакансий при росте их концентрации;

— с увеличением концентрации вакансий связана скрытая теплота плавления и изменение объема материала при плавлении;

— концентрация вакансий увеличивается за счет их диффузии с поверхности, поэтому плавление происходит с поверхности.

Согласно этой модели нарушение дальнего порядка при плавлении происходит за счет деформации кристаллической решетки вакансиями (см. рис. 1, где a — единичная вакансия,

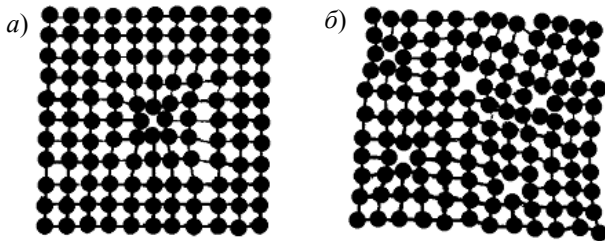


Рис. 1

b — структура, искаженная взаимодействующими вакансиями).

При больших концентрациях вакансий, когда деформированные области перекрываются, кристаллическая решетка будет деформирована полностью. В таком, деформированном вакансиями кристалле атомы, окружающие какой-либо произвольно выбранный атом, располагаются вокруг него преимущественно на тех же расстояниях, что и в исходном кристалле, но с некоторым разбросом — сохраняется ближний порядок. Этот разброс носит случайный характер и быстро возрастает с увеличением расстояния от выбранного атома.

Состояние деформированного вакансиями кристалла описывается его свободной энергией F :

$$F = En - \alpha n [1 - \exp(-nv)] - kTn \ln \left(\frac{Ne}{n} \right),$$

где E — энергия образования вакансии; n — концентрация вакансий; α — энергия взаимодействия вакансий; v — объем, в котором взаимодействуют вакансии; N — концентрация узлов кристаллической решетки; T — температура; k — постоянная Больцмана; e — основание натурального логарифма.

Предполагается, что при увеличении концентрации вакансий n растет вероятность их расположения на таком расстоянии друг от друга, при котором будет уменьшена суммарная энергия образования вакансий F_v . Энергия образования пары взаимодействующих вакансий меньше, чем энергия образования двух невзаимодействующих вакансий ($2E$) на величину 2α . Тогда энергия образования вакансий с учетом их взаимодействия $F_v = En - \alpha n_n$ (здесь n_n — число вакансий во взаимодействующих парах); n_n можно определить как произведение общего числа вакансий n на вероятность того, что около вакансии в некотором объеме v , определяемом радиусом взаимодействия вакансий, окажется еще хотя бы одна вакансия: т.е. по закону Пуассона $n_n = n [1 - \exp(-nv)]$.

Уравнение диффузии вакансий при плавлении можно представить в следующем виде [4]:

$$\mu \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \mu \frac{\partial n}{\partial x} \right),$$

где $\mu = \partial F / \partial n$ — химический потенциал вакансий, D — коэффициент их диффузии; граничные условия сводятся к определению теплового потока на границе: $q = D \varepsilon(n) \partial n(0) / \partial x$ ($\varepsilon(n)$ — энергия образования и растворения вакансии).

Основные результаты. Результаты численного решения задачи нагрева серебра лазерными импульсами микросекундной длительности приведены на рис. 2, где представлена зависимость температуры поверхности T , глубины слоя расплава h и отражения R от времени (кривые 1—3 соответственно). Фрагмент экспериментальной зависимости $R(t)$, рассмотренной в работе [7], показан на рис. 3.

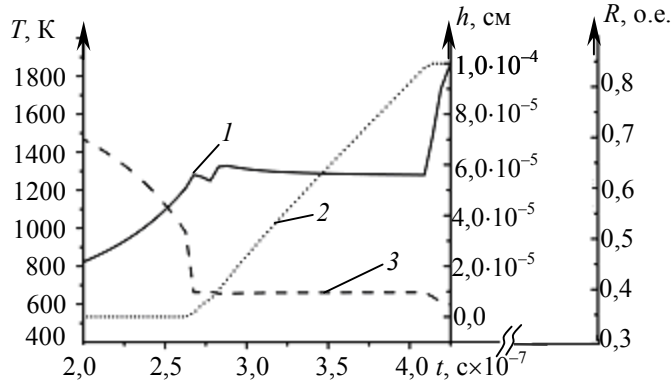


Рис. 2

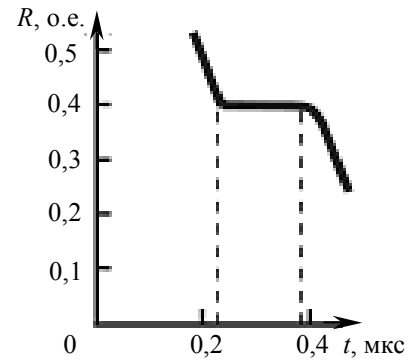


Рис. 3

При вычислениях приняты следующие значения параметров: теплопроводность $\lambda=4,29$ Вт/(см·К); объемная теплоемкость $c=2,467$ Дж/(см³·К); $\alpha=0,5756$ эВ; $E=1,1$ эВ; $N=5,856 \cdot 10^{22}$ 1/см³; энергия активации диффузии вакансии $E_d=0,66$ эВ; $\nu=1,421 \cdot 10^{-20}$ см³; максимальная плотность мощности поглощенного лазерного излучения $q_0=7 \cdot 10^7$ Вт/см²; начальная температура образца, согласно работе [7], принята равной 573 К.

Форма импульса определена в виде $q_0 \exp\left[\frac{(t-t_{\max})}{t^2}\right]$, где $t=0,3$ мкс, $t_{\max}=0,6$ мкс.

Анализ рис. 2 и 3 показывает удовлетворительную согласованность расчета с экспериментом.

Темп нагрева при лазерном воздействии определяется большой скоростью подвода энергии: так, например, при действии пикосекундных импульсов скорость передачи энергии от электронов, нагретых до температур порядка нескольких десятков тысяч градусов Кельвина, к решетке может достигать примерно 10^{14} Вт/см³. Процесс плавления в при этом отличается от хорошо известного плавления в квазистационарных условиях.

Температуру металла при нагревании импульсом пикосекундной длительности можно определить из решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c_e \frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) &= \alpha_p q_0 t \exp(-\alpha_p x - t/t_0) / t_0 - \beta_{ei} (T_e - T_i); \\ c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) &= \beta_{ei} (T_e - T_i); \\ \lambda_e \frac{\partial T_e(0, t)}{\partial x} &= \lambda_i \frac{\partial T_i(0, t)}{\partial x} = 0, \end{aligned} \right\}$$

где T_e , T_i , λ_e , λ_i , c_e , c_i — температура, теплопроводность и теплоемкость электронного газа (индекс „e“) и кристаллической решетки (индекс „i“) соответственно; β_{ei} — коэффициент теплообмена между электронным газом и решеткой; $\alpha_p q_0 t \exp(-\alpha_p x - t/t_0) / t_0$ — поглощенная плотность мощности лазерного излучения; α_p — коэффициент поглощения; t_0 — характерная длительность лазерного импульса.

При вычислениях принято: $\lambda_e=2,37$ Вт/(см·К); $\lambda_i=1$ Вт/(см·К); $c_e=0,04035$ Дж/(см³·К); $c_i=2,43$ Дж/(см³·К); $\alpha_p=10^{-5}$ см⁻¹; $E=1,1$ эВ; концентрация атомов $n_0=5,856 \cdot 10^{22}$; $e_d=0,66$ эВ; длительность воздействия $\tau=4 \cdot 10^{-11}$ с; $q_0=1,7 \cdot 10^{11}$ Вт/см².

Результаты численного решения задачи нагревания серебра импульсами пикосекундной длительности графически представлены на рис. 4 и 5.

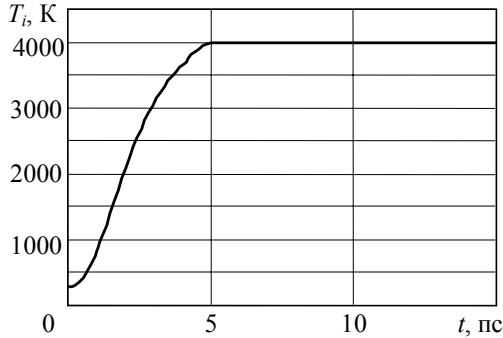


Рис. 4

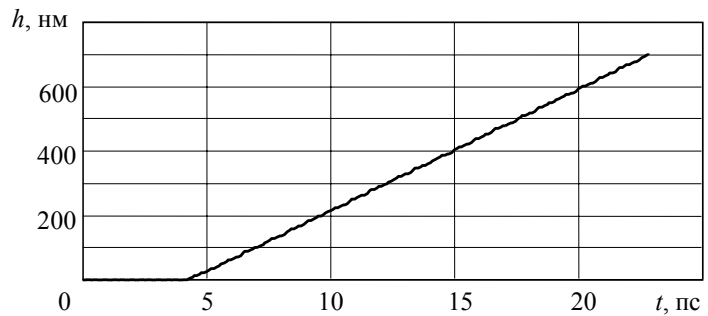


Рис. 5

Эволюция механизмов плавления при лазерном нагревании. Рассмотрим, как меняется режим плавления при действии сверхкоротких лазерных импульсов.

Предположим, что даже в условиях значительного перегрева плавление можно зафиксировать при концентрации вакансий, соответствующей концентрации вакансий в расплаве при температуре плавления T_m .

Определим скорость подачи энергии, при которой плавление металла при температуре его плавления не происходит:

— при температуре плавления

$$\frac{dT}{dt} > \frac{kT_m^2 \exp\left(-\frac{E_d}{kT_m}\right)}{\tau_0(E_v + E_d)};$$

— при температурах, превышающих T_m ,

$$\frac{dT}{dt} > \frac{kT^2}{\tau_0(E_v + E_d)} \exp\left[-\frac{E_d}{kT} + \frac{E_v(T - T_m)}{kTT_m}\right].$$

Здесь E_v — энергия образования вакансий с учетом их взаимодействия, $\tau_0=10^{-14}$ с.

Зависимость температуры кристаллической решетки от времени характеризуется выражением

$$T_i = \frac{q\tau}{(c_e + c_i)h} \left(1 - \exp\left(-\frac{\lambda_i(1 + c_i/c_e)}{c_i} t\right) \right).$$

Время достижения температуры T поверхности определяется как

$$t = -\frac{c_i}{\lambda_i(1 + c_i/c_e)} \ln\left(1 - \frac{Th(c_e + c_i)}{q\tau}\right).$$

Температура, при которой начнется плавление, определяется из уравнения

$$\frac{kT^2}{\tau_0(E_v + E_d)} \exp\left[-\frac{E_d}{kT} + \frac{E_v(T - T_m)}{kTT_m}\right] = \frac{\lambda_i}{c_i c_e h} [q\tau - Th(c_e + c_i)].$$

В результате можно найти время проплавления

$$t_m = \frac{h\tau_0}{\delta} \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right),$$

где δ — постоянная кристаллической решетки.

Если температура начала плавления такова, что дальний порядок нарушается вследствие генерации френкелевских пар, то процесс плавления начинается одновременно по всему объему прогретого материала. Время плавления в этом случае определяется временем генерации достаточного числа дефектов решетки:

$$n_{10} = N \exp\left\{\frac{E - \alpha[1 - \exp(-n_{10}v) + n_{10}v \exp(-n_{10}v)]}{2\alpha v n_{10}}\right\}.$$

Если принять v таким же, как при вакансионном плавлении, то можно оценить энергию взаимодействия α_F френкелевских пар:

$$\alpha_F = \frac{E_F}{2v n_{10} \ln\left(\frac{n_{10}}{N}\right) + 1 - \exp(-n_{10}v) + n_{10}v \exp(-n_{10}v)},$$

где E_F — энергия образования френкелевских пар.

Заключение. Приведенные экспериментальные данные и численные расчеты подтверждают возможность применения вакансионной модели плавления к описанию процессов, происходящих при плавлении материалов ультракороткими лазерными импульсами. При нагревании металлов импульсами микросекундной длительности результаты численного расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. Используя вакансионную модель плавления, можно однозначно объяснить постоянство температуры поверхности при лазерном плавлении и наличие потока энергии к фронту плавления без градиента температуры в расплавленном слое. Такой режим возможен до тех пор, пока плотность потока мощности лазерного излучения на поверхности не превысит некоторого критического значения, определяемого скоростью генерации вакансий на поверхности расплава и величиной диффузионного потока вакансий, который определяется градиентом концентрации вакансий на фронте плавления. Поэтому глубина проплавления будет определяться плотностью потока лазерного излучения и свойствами материала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты 09-02-00932-а и 09-02-01065-а, и государственного контракта № П1134.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rethfeld B., Socolowski-Tinten K., von der Linde D., Anisimov L. D. Ultrafast thermal melting of laser-excited solids by homogeneous nucleation // Phys. rev. B. 2002. Vol. 65, N 9. P. 1—4.
2. Ретфельд Б., Темнов В. В., Соколовски-Тинтен К. и др. Сверхбыстрое термическое плавление твердых тел под воздействием фемтосекундных лазерных импульсов // Опт. журн. 2004. Т. 71, № 6. С. 18—23.
3. Уббелодде А. Р. Расплавленное состояние вещества. М.: Металлургия, 1982. 256 с.
4. Яковлев Е. Б. Перегрев твердых тел при плавлении // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1989. Т. 53, № 3. С. 591—594.
5. Френкель Я. И. Собрание избранных трудов. М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 2.
6. Френкель Я. И. Статистическая физика. М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1948.
7. Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов, Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.

Сведения об авторах

- Евгений Борисович Яковлев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;
E-mail: Yak@lastech.ifmo.ru
- Вера Владимировна Свирина** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;
E-mail: vsvirina@mail.ru
- Ольга Николаевна Сергаева** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерных технологий и экологического приборостроения;
E-mail: olgasergayeva@ Rambler.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий
и экологического приборостроения

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

В. С. СОЛОВЬЕВ, М. В. УСПЕНСКАЯ, Н. В. СИРОТИНКИН

ПОЛИМЕРНЫЕ ВОДОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИЦИИ С ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Изучено влияние модифицированных алюмосиликатных стеклосфер на макрокинетику гелеобразования и деформационно-прочностные характеристики полимерных акриловых композиций.

Ключевые слова: гелеобразование, сшитые полимеры.

Акриловые сшитые сополимеры обладают высокой водопоглощающей способностью и прозрачностью, легко реагируют на незначительные изменения во внешней среде (температуры, кислотности, освещенности): это обуславливает их широкое применение в промышленности, медицине и сельском хозяйстве [1—3]. Одним из главных недостатков акриловых абсорбентов является их низкая физико-механическая прочность. Введение в полимерную матрицу различных наполнителей, таких как бентониты, стеклосферы и т.п., способствует устранению этого недостатка.

Для проведения экспериментов в качестве наполнителей были использованы алюмосиликатные стеклосферы (АСС), поскольку они оказывают комплексное положительное влияние на такие характеристики полимерных композиций, как прочность, теплостойкость, теплопроводность и горючесть [4, 5]. Для увеличения взаимодействия между звеньями полимерной цепи и частицами наполнителя и улучшения, таким образом, физико-механических и специфических характеристик полимерного материала применяется модификация поверхности наполнителя [6, 7]. В описываемом эксперименте в качестве модификатора поверхности стеклосфер был использован латекс АБС.

Эксперимент. Акриловые композиции были синтезированы путем радикальной полимеризации в водной среде при температуре 50 °С. В качестве мономеров использовались акриловая кислота и акриламид в следующем соотношении: 70 мас.% кислоты — 30 мас.% акриламида. В качестве инициатора полимеризации была использована окислительно-восстановительная система персульфат аммония — тетраметилэтилендиамин, а в качестве сшивающего агента — *N,N'*-метиленбисакриламид. Степень нейтрализации (α) акриловой кислоты составляла 0,9. Полимеризация проводилась при начальной концентрации мономеров 30 мас.% и концентрации сшивающего агента 0,3 мас.%. Продолжительность синтеза композиций в водной среде составила 3 ч. Содержание наполнителя варьировалось в пределах 10—60 мас.%.

Модификация алюмосиликатных стеклосфер проводилась следующим способом: частицы наполнителя тщательно отмывались и подвергались сушке в течение 24 ч, а затем помещались в латекс АБС в соотношении 1:1; смесь перемешивалась в течение 30 мин, и добавлялся CaCl_2 в качестве коагулянта. Полученные модифицированные частицы алюмосиликатных стеклосфер отфильтровывали и сушили при температуре 20 °С в течение 24 ч.

Результаты. Модификация поверхности частиц наполнителя приводит к изменению макрокинетики гелеобразования. График зависимости времени начала гелеобразования (t) от концентрации (N) модифицированных алюмосиликатных стеклосфер представлен на рис. 1.

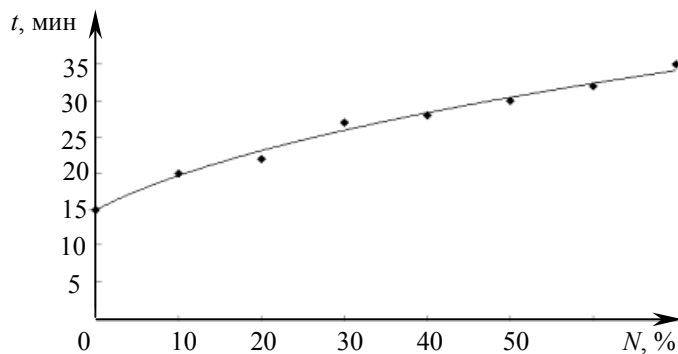


Рис. 1

Как видно из графика, рост значения N приводит к увеличению времени t . Это можно объяснить тем, что подвижность макромолекул в адсорбционном слое уменьшается и, как следствие, снижается скорость полимеризации. При формировании сетчатых полимеров на начальных этапах синтеза происходит образование большой разветвленной молекулы, которая характеризуется значительно меньшей подвижностью, что приводит к ограничению возможности реакционноспособных групп полимера вступать в реакцию, в результате чего образование сетчатого полимера замедляется.

Следует отметить, что зависимость времени начала гелеобразования от концентрации модифицированных АСС описывается степенной функцией вида

$$t = 14,94N^2.$$

В отличие от представленной зависимости, зависимость $t(N)$ для немодифицированных стеклосфер описывается как „концентрационный оптимум“, т.е. функция сначала возрастает, а затем убывает при увеличении концентрации немодифицированных стеклосфер в полимерной матрице [8]. Прочностные характеристики полимерных композиций с модифицированными и немодифицированными АСС отличаются на порядок. Влияние концентрации модифицированного наполнителя на прочностные характеристики (G) полимерных пленок иллюстрируется графиком, представленным на рис. 2.

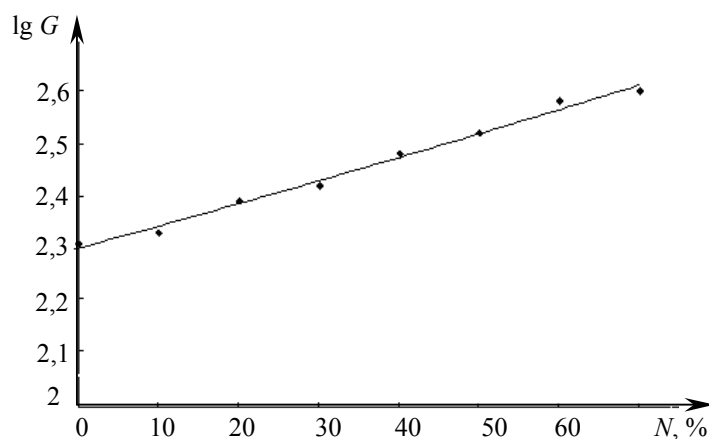


Рис. 2

Повышение прочностных характеристик полимерных композиций с модифицированными АСС объясняется не только взаимодействием между отдельными макромолекулами и поверхностью частиц, но и влиянием надмолекулярных структурных образований, свойства которых изменяются под действием наполнителя. Частицы наполнителя — АСС — в композите являются узлами полимерной сетки, формирующейся в результате взаимодействия макромолекул полимера с поверхностью частиц.

Итак, исследования впервые полученных композиций на основе модифицированных латексом АБС алюмосиликатных стеклосфер и акриловых сополимеров показывают, что с увеличением количества наполнителя в полимерной матрице повышается прочность пленок на разрыв и увеличивается время начала гелеобразования. Использование модифицированных частиц наполнителя на порядок, по сравнению с немодифицированными стеклосферами, увеличивает деформационно-прочностные характеристики композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nabita M.* Radiation polymerization of hydrophilic monomers for producing hydrogel used in waste treatment processing // *Polym-Plast Technology and Eng.* 2004. Vol. 43, N 4. P. 1157—1176.
2. Пат. 2157243 РФ, МПК⁷ А64 L 15/22. Гидрогелевая композиция и перевязочные средства из нее для лечения ран различной этиологии // *А. Н. Пищуров, А. И. Валуев, Г. А. Сытов* и др. 2000.
3. *Budtova T., Suleimenov S.* Physical principles of using polyelectrolyte hydrogels for purifying and enrichment technologies // *J. Appl. Polym. Sci.* 1995. Vol. 57, N 12. P. 1653—1658.
4. Наполнители для полимерных композиционных материалов. Справочное пособие: Пер. с англ. М.: Химия. 1981. 116 с.
5. *Вудов В. В.* Влияние некоторых факторов на прочность полых стеклянных микросфер // Тугоплавкие волокна и мелкодисперсные наполнители: Науч. труды. М.: НПО „Стеклопластик“, 1998. С. 25—26.
6. *Казанский К. С., Дубровский С. А., Антощенко Н. В.* Характеристика и структура полиэтиленоксидных гидрогелей, получаемых через макромономеры // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А.* 1997. Т. 39, № 5. С. 816—824.
7. *Дубровский С. А., Кузнецова В. И.* Упругость и структура гидрогелей на основе полиакрилатов и крахмала // Там же. 1997. Т. 35, № 3. С. 271—275.
8. *Горский В. А.* Стеклосферы и фуллерены в качестве модификаторов акриловых супервлагоабсорбентов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГТИ, 2006.

Сведения об авторах

- Валерий Сергеевич Соловьев** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: solovievvs@gmail.ru
- Майя Валерьевна Успенская** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: mv_uspenskaya@mail.ru
- Николай Васильевич Сиротинкин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), кафедра химии и технологии каучука и резины

Рекомендована кафедрой
физики и техники оптической связи
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

В. В. ТОГАТОВ, П. А. ГНАТЮК, Д. С. ТЕРНОВСКИЙ

ТЕОРИЯ СВЕРХБЫСТРОГО ВЫКЛЮЧЕНИЯ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Рассмотрен режим сверхбыстрого выключения высоковольтного МОП-транзистора, при котором время переключения прибора не превышает единиц наносекунд. Дано объяснение механизма сверхбыстрого выключения и предложена его математическая модель. Приведены результаты прямых экспериментов, подтверждающих наличие механизма сверхбыстрого выключения.

Ключевые слова: МОП-транзистор, высоковольтная техника, импульсная техника, техника наносекундного диапазона.

В работе [1] предложена теория сверхбыстрого включения МОП-транзистора, в которой установлено, что в общем случае процесс включения МОП-транзистора состоит из двух этапов: сверхбыстрого включения и установления стационарного состояния. При этом постоянная времени на этапе установления на порядок и более превышает длительность этапа сверхбыстрого включения, составляющую единицы наносекунд.

В развитие этой теории в настоящей статье рассматривается режим сверхбыстрого выключения МОП-транзистора, который также реализуется в два этапа: сверхбыстрого выключения, составляющего единицы наносекунд, и более медленного этапа спада тока. В статье использованы обозначения, принятые в работе [1].

Анализ режима сверхбыстрого выключения. Проанализируем процесс выключения МОП-транзистора из режима насыщения, когда ток стока i_D в момент переключения ограничивается элементами внешней цепи. На рис. 1 показана схема выключения транзистора Q . К цепи стока транзистора через омическую нагрузку R_L подключен источник постоянного напряжения V_H . Схема дополнена элементами, учитывающими индуктивности L_D и L_S выводов транзистора и токоподводящих дорожек в цепях стока и истока. На схеме также показаны межэлектродные емкости C_{GS} , C_{GD} и C_{DS} .

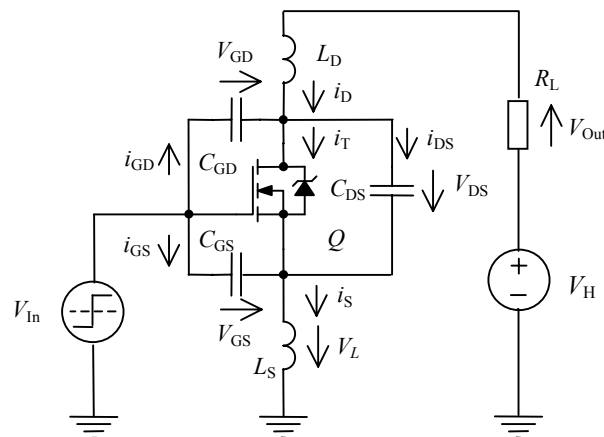


Рис. 1

При анализе процесса выключения будем использовать кусочно-линейную аппроксимацию передаточной характеристики МОП-транзистора. Согласно этой аппроксимации ток транзистора

$$i_T = \begin{cases} 0, & V_{GS} \leq V_{Th}; \\ S(V_{GS} - V_{Th}), & V_{GS} > V_{Th}, \end{cases}$$

где S — крутизна транзистора, V_{GS} — напряжение на емкости C_{GS} , V_{Th} — пороговое напряжение транзистора; согласно принятой аппроксимации ток i_T определяется только напряжением V_{GS} на емкости C_{GS} и не зависит от токов, протекающих через емкости C_{GD} и C_{DS} .

После подачи в цепь затвора транзистора отрицательного напряжения V_R емкость C_{GS} , заряженная до положительного напряжения $V_{GS}(0) = V_F$, перезаряжается через индуктивность L_S в цепи истока. На этапе задержки при выключении транзистора ток i_T остается постоянным и равным току насыщения $(i_D)_{Sat}$. Момент окончания этапа задержки $t = t_{Del}$, соответствующий переходу транзистора в активный режим, определяется из уравнения

$$V_{GS}(t_{Del}) - V_{Th} = \frac{(i_D)_{Sat}}{S}.$$

В этом уравнении за начало отчета $t = 0$ принят момент изменения полярности затворного напряжения. При мгновенном переключении напряжения V_F на $-V_R$ и нулевом сопротивлении в цепи затвора ток затвора в момент окончания задержки определяется как [2]

$$i_{GS}(t_{Del}) = -\frac{I_F - (i_D)_{Sat}}{S} \sqrt{\frac{C_{GS}}{L_S} \left[1 + 2 \frac{(i_D)_{Sat} + I_R}{I_F - (i_D)_{Sat}} \right]}, \quad (1)$$

где $(i_D)_{Sat} = V_H / R_L$, $I_F = S(V_F - V_{Th})$, $I_R = S(V_R + V_{Th})$.

При уменьшении напряжения затвор-исток до значения $V_{GS}(t_{Del})$ транзистор переходит в активный режим и ток через транзистор уменьшается. При выводе переходной характеристики тока $i_T(t)$ воспользуемся следующими соотношениями:

$$-V_R = V_{GS} + V_L, \quad V_L = L_S \frac{di_S}{dt}, \quad V_{GS} = V_{Th} + \Delta V_{GS}, \quad i_S = i_T + i_{GS}, \quad i_T = S \Delta V_{GS}, \quad i_{GS} = C_{GS} \frac{d\Delta V_{GS}}{dt}.$$

Здесь ΔV_{GS} — превышение напряжения V_{GS} над пороговым V_{Th} , V_L — напряжение на индуктивности L_S .

Комбинируя эти выражения, получаем уравнение, определяющее переходную характеристику тока $i_T(t)$ МОП-транзистора:

$$\frac{d^2 \Delta V_{GS}}{dt^2} + \frac{S}{C_{GS}} \frac{d\Delta V_{GS}}{dt} + \frac{1}{L_S C_{GS}} \Delta V_{GS} = -\frac{V_R + V_{Th}}{L_S C_{GS}}. \quad (2)$$

Примем за начало отсчета ($t = 0$) на этапе спада тока момент перехода транзистора в активный режим (момент окончания этапа задержки t_{Del}). Тогда начальные условия задачи на этом этапе могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta V_{GS}(0) = \frac{(i_D)_{Sat}}{S}, \quad \frac{d\Delta V_{GS}}{dt}(0) = \frac{i_{GS}(t_{Del})}{C_{GS}}. \quad (3)$$

Решение уравнения (2) при начальных условиях (3) приводится к виду

$$i_T(t) = -I_R + e^{-\delta t} \left[(I_R + (i_D)_{Sat}) \left(\frac{\delta}{\gamma} \operatorname{sh}\gamma t + \operatorname{ch}\gamma t \right) + \frac{2\delta i_{GS}(t_{Del})}{\gamma} \operatorname{sh}\gamma t \right], \quad (4)$$

где $\delta = \frac{S}{2C_{GS}}$, $\gamma = \sqrt{\delta^2 - \frac{1}{L_S C_{GS}}}$.

Для упрощения выражения (4) воспользуемся приближенными равенствами:

$$\gamma \approx \frac{S}{2C_{GS}} - \frac{1}{SL_S}, \quad \frac{\delta}{\gamma} \approx 1 + \frac{2C_{GS}}{S^2 L_S}.$$

При значениях этих параметров, используемых в последующих расчетах, погрешность определения величин γ и δ/γ составляет менее 1%. Пренебрегая также членами второго порядка малости, получаем следующее выражение для тока транзистора:

$$i_T(t) = -I_R + [I_R + i_S(t_{Del})] e^{-\frac{t}{SL_S}}, \quad (5)$$

здесь $i_S(t_{Del}) = (i_D)_{Sat} - i_{GS}(t_{Del})$ — ток в цепи истока в момент окончания этапа задержки.

Из выражения (5) следует, что постоянная времени на этапе спада тока при выключении транзистора такая же, как при включении [1]: $\tau_{off} = \tau_{on} = SL_S$. Вместе с тем асимптотическое значение тока $i_T(t)$ в уравнении (5) равно не нулю, а $-I_R = -S(V_R + V_{Th})$. Поэтому при большом значении напряжения V_R время спада тока i_T до нуля может быть много меньше τ_{off} .

В момент перехода транзистора из режима насыщения в активный режим ($t = 0$) ток стока $(i_D)_{Sat}$ скачком уменьшается на величину $i_{GS}(t_{Del})$ (1), т.е. реализуется режим сверхбыстрого выключения транзистора. Если $i_{GS}(t_{Del}) \geq (i_D)_{Sat}$, то ток i_T скачком уменьшается до нуля. Физический смысл режима сверхбыстрого выключения аналогичен смыслу режима сверхбыстрого включения [1]. До тех пор, пока ток $i_T(t)$ не достигнет величины $i_S(t_{Del}) = (i_D)_{Sat} - i_{GS}(t_{Del})$, отрицательная обратная связь, обусловленная индуктивностью L_S , в транзисторе будет отсутствовать. В дальнейшем спад тока i_T осуществляется в соответствии с уравнением (5).

Уравнение (5) правильно отражает факт наличия процесса сверхбыстрого выключения. Вместе с тем следующее из этого уравнения скачкообразное изменение тока i_T в момент $t = 0$ является идеализацией реального процесса быстрого спада тока. Длительность спада тока i_T на этапе сверхбыстрого выключения определяется током $i_{GS}(t_{Del})$ разряда емкости C_{GS} с напряжения $V_{GS}(t_{Del})$ до порогового напряжения V_{Th} . Зависимость спада тока i_T на этом этапе определяется уравнением (4).

Оценим влияние емкостей C_{GD} и C_{DS} на характер спада тока при выключении транзистора. С учетом направлений емкостных токов можно записать

$$i_D = i_T + i_{DG} + i_{DS} = i_T + C_{GD} \frac{dV_{GD}}{dt} + C_{DS} \frac{dV_{DS}}{dt}, \quad V_{DS} = V_H - R_L i_D - V_L.$$

В высоковольтных схемах напряжение сток-исток V_{DS} при выключении транзистора намного превышает напряжения V_L и V_{GS} . Поэтому в первом приближении можно считать $V_{GD} = V_{DS} \approx V_H - R_L i_D$. При этом уравнение, определяющее спад тока нагрузки, приводится к виду

$$\frac{di_D}{dt} + \frac{1}{CR_L} i_D - \frac{1}{CR_L} i_T(t) = 0, \quad (6)$$

где $C = C_{DS} + C_{GD}$.

Начальное условие задачи характеризуется выражением

$$i_D(0) = (i_D)_{Sat} = \frac{V_H}{R_L}. \quad (7)$$

Проанализируем реакцию тока стока $i_D(t)$ на мгновенный спад тока транзистора со значения $(i_D)_{Sat}$ до нуля, т.е. положим в уравнении (6) $i_T(t) \equiv 0$. При этом условии уравнение (6) принимает вид

$$i_D = \frac{V_H}{R_L} e^{-\frac{t}{R_L C}}. \quad (8)$$

В общем случае ток стока определяется уравнением

$$i_D = e^{-\frac{t}{R_L C}} \left[\frac{1}{R_L C} \int_0^t i_T(t) e^{\frac{t}{R_L C}} dt + (i_D)_{Sat} \right]. \quad (9)$$

На рис. 2 приведены зависимости $t_{\text{off}}(V_F)$ при $C_{GS} = 3$ нФ (кривая 1) и $t_{\text{off}}(C_{GS})$ при $V_F = 20$ В (кривая 2), рассчитанные по уравнениям (4) и (9) при следующих значениях параметров: $C = 100$ пкФ, $S = 20$ А/В, $I_{\text{Sat}} = 25$ А, $V_R = 0$, $V_{\text{Th}} = 3$ В, $R_L = 5$ Ом и $L_S = 4$ нГн. Время выключения определялось на временном интервале изменения тока стока от значения $(i_D)_{\text{Sat}}$ до $0,1(i_D)_{\text{Sat}}$. Как следует из графика, при изменении емкости C_{GS} от 1 до 5 нФ время выключения снизилось с 15 до 2,4 нс. Аналогично, с увеличением напряжения V_F с 10 до 25 В время выключения снизилось с 17,5 до 2,5 нс. В обоих случаях снижение времени выключения связано с увеличением времени разряда емкости C_{GS} до порогового напряжения V_{Th} . А это, в свою очередь приводит к росту тока $i_{GS}(t_{\text{Del}})$, который вычитается из $(i_D)_{\text{Sat}}$. Таким образом, характер рассмотренных зависимостей соответствует концепции сверхбыстрого выключения.

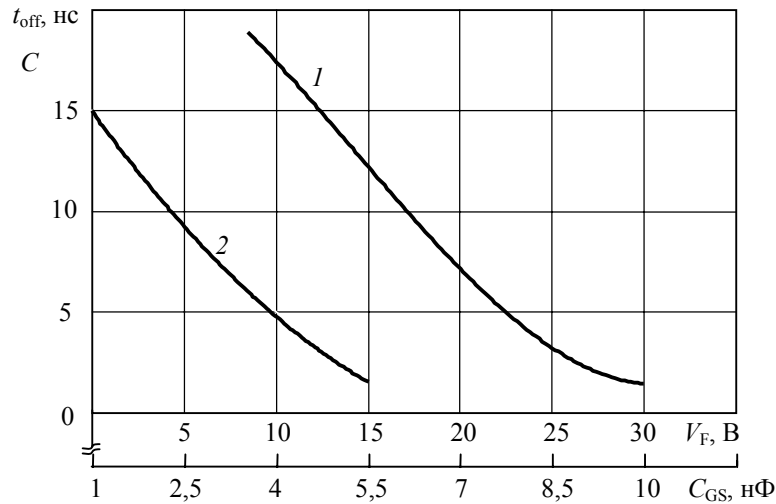


Рис. 2

Для экспериментального обоснования функционирования режима сверхбыстрого выключения были сняты осциллограммы напряжения V_L на сопротивлении нагрузки $R_L = 5,5$ Ом при $V_H = 140$ В (рис. 3). Транзистор IRF3415 выключался при $V_R = 0$ и двух значениях затворного напряжения, предшествующего выключению: $V_F = 10$ В (кривая 1) и $V_F = 20$ В (кривая 2). Так как крутизна исследуемого транзистора $S = 20$ А/В, то в обоих случаях транзистор выключался из режима глубокого насыщения. Как следует из осциллограмм, время спада тока стока, измеренное между уровнями $(i_D)_{\text{Sat}} = 0,1 \dots 0,9$, за счет увеличения затворного напряжения снизилось почти в 3 раза — с 16 до 5,5 нс.

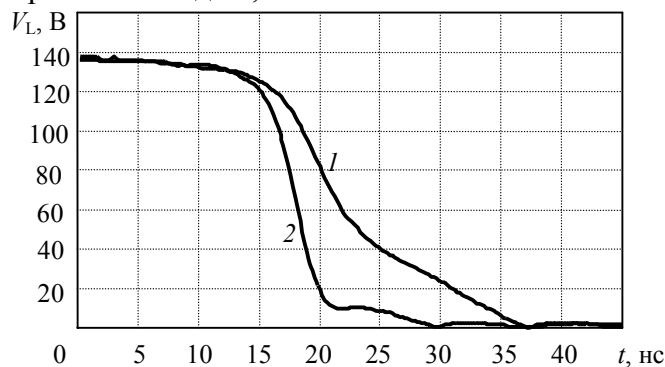


Рис. 3

Как и в режиме сверхбыстрого включения, поведение МОП-транзистора в режиме сверхбыстрого выключения не укладывается в рамки общепринятых представлений. Согласно последним, время выключения МОП-транзистора определяется процессом перезаряда собственных емкостей. В этом смысле увеличение амплитуды импульса прямого напряжения, подаваемого на затвор, никак не может приводить к снижению времени переключения. Однако в режиме сверхбыстрого выключения наблюдается именно эта картина, которая хорошо

согласуется и с рассмотренным механизмом переключения МОП-транзистора в данном режиме, и с результатом прямого эксперимента.

В заключение представленного анализа режима сверхбыстрого выключения МОП-транзистора приведем следующие выводы:

— показано, что при выключении МОП-транзистора из режима насыщения в общем случае реализуются два режима: режим сверхбыстрого выключения и режим сравнительно медленного спада тока с постоянной времени на этапе спада SL_S ;

— установлено, что за счет предварительной накачки тока, осуществляемой в период задержки по цепи затвора, ток стока по окончании задержки снижается на величину тока затвора (в пределе до нуля) за время, не превышающее единиц наносекунд;

— сформулирована математическая модель режима сверхбыстрого выключения;

— справедливость механизма сверхбыстрого переключения подтверждена прямым экспериментом.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тогатов В. В., Гнатюк П. А., Терновский Д. С. Теория сверхбыстрого включения МОП-транзисторов // Науч.-техн. вестн. Санкт-Петербург. гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики. 2009. № 4(62). С. 68—74.
2. Тогатов В. В., Гнатюк П. А., Терновский Д. С. Коммутационные процессы в высокочастотных преобразователях // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 6. С. 32—43.

Сведения об авторах

- Вячеслав Вячеславович Тогатов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; E-mail: v.togatov@mail.ru
- Петр Анастасьевич Гнатюк** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; науч. сотрудник; E-mail: gnatyuk@mail.ru
- Дмитрий Сергеевич Терновский** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; E-mail: dm-ternovsky@mail.ru

Рекомендована кафедрой
электроники

Поступила в редакцию
07.12.09 г.

SUMMARY

P. 7—14.

INTERACTION OF IR-LASER RADIATION WITH BIOLOGICAL TISSUES. LASER DIAGNOSTICS OF DISEASES

Several problems of laser radiation interaction with biological tissues are considered. Perspective applications of diagnostic lasers are discussed: gas analyzers on the base of tunable laser diodes in the middle IR, coherent high-resolution tomography on the base of wide-band light sources, and terahertz tomography.

Keywords: gas analyzer, coherent tomography, femtosecond laser, phonon-crystal fibers, terahertz spectral range.

Data on author

Viktor A. Serebryakov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: serebryakov@hotmail.ru

P. 15—17.

MATHEMATICAL MODELING OF HUMAN CORNEA STRESS

Information on stressedly-deformed state of human eye is considered as a mean for ophthalmological diseases diagnostics. A mathematical model of eye stress is proposed. Results of modeling of interferometric pattern for polarized light are presented.

Keywords: ophthalmology, diagnostics, stressedly-deformed human eye state.

Data on authors

Konstantin Yu. Kuznetsov — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: kkyznetsov@gmail.com

Yury T. Nagibin — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: nagibin77@mail.ru

Vladimir A. Trofimov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: troftu@mail.ru

P. 18—22.**MEASURING SYSTEM FOR INVESTIGATION OF OSCILLATION PROCESSES IN HUMAN ORGANISM**

A complex of instruments for simultaneous analysis of respiration and cardiac activity in human body is described. The complex consists of respiration characteristics measuring instrument and analyzer of cardiac rhythms “Expert - 01” combined in an integrated system. Results of investigation of interaction of respiratory and cardio-vascular systems are presented.

Keywords: measuring complex, rhinological instrument, temperature sensor, process analysis.

Data on authors

- Aleksey A. Voronin* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Thermophysics; E-mail: ale_vor@rambler.ru
- Ivan A. Dmitriev* — FGUP “SRI of Industrial and Sea Medicine”, St. Petersburg, Head of Group
- Gennady N. Lukyanov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics; Department of Electronics; E-mail: gen-lukjanow@yandex.ru
- Larisa A. Rybina* — Cand. Biol. Sci.; Pavlov Physiology Institute RAS, St. Petersburg

P. 22—26.**FIBER OPTIC ILLUMINATOR FOR WATER DISINFECTION SYSTEM**

Employment of fiber optic illuminator with frustrated total internal reflection in water disinfection devices is considered. Results of experimental modeling of illuminator in the form of multimode fiber coil are presented. Problems of practical realization of fiber optic illuminator are discussed.

Keywords: LED, optical fiber, water disinfection.

Data on author

- Evgeny M. Nikuschenko* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; Head of Laboratory; E-mail: znem@list.ru

P. 27—31.**NOISE-IMMUNE OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENT FOR MEASUREMENT OF LENGTHY OBJECT VELOCITY**

An original approach is proposed to realization of invariant opto-electronic instrument for measurement of velocity of lengthy object movement. Distinctive feature of the approach consists in application of dual-channel outline of image analysis with the use of cross-channel links to compensate for errors caused by optical nonhomogeneity of the object surface.

Keywords: velocity measurement, optically inhomogeneous surface, noise immunity, invariant characteristics.

Data on authors

- Vasily V. Artemiev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer System Design; E-mail: technocon@imail.ru
- Nikolay P. Belov* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; Senior Scientist; E-mail: technocon@imail.ru

- Andrey V. Smirnov* — Cand. Techn. Sci.; “Technocon Ltd.”, St. Petersburg; Deputy Director General; E-mail: technocon@imail.ru
- Andrey D. Yaskov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: technocon@imail.ru

P. 32—34.**MEASUREMENT OF LOCAL SLOPES OF DIFFUSELY REFLECTING OBJECTS WITH THE USE OF HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY**

Development of holographic methods and instruments for control over stressedly-deformed state of diffusely reflecting object adapted to employment in automated measuring systems is discussed. A concept design is proposed of a system for measuring local slopes of the object surface with optical processing of double-exposed holographic interferograms.

Keywords: holographic interferometry, shearing interferometer, diffusely reflecting object.

Data on authors

- Igor R. Kotov* — Cand. Techn. Sci.; Pavlov St. Petersburg State Medical University, Laboratory of Holography
- Olga V. Maiorova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: maiorova_olga@yahoo.com
- Viktor T. Prokopenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics

P. 35—38.**STUDY OF OPERATION CONDITIONS OF LASER PUMP LAMP AT DIFFERENT COOLING TECHNIQUES**

An experimental setup for pulsed laser pump lamp testing is described. Results are presented of experimental study of cooling conditions effects on generation spectrum and heat emission power of pump lamp.

Keywords: solid-state laser, pump lamp, cooling system, water-air cooling, selectively absorbing additives, radiation spectrum.

Data on authors

- Vladimir A. Korablev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: KVA@grv.ifmo.ru
- Yury T. Nagibin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: nagibin77@mail.ru
- Alexander V. Sharkov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: Sharkov@grv.ifmo.ru

P. 38—41.

ANALYSIS OF THERMAL REGIMES OF SEMICONDUCTOR SENSORS

Results are presented of finite element modeling of thermal field in membrane structure of gas analyzer sensor with heater operating in pulsed mode.

Keywords: gas analyzer, membrane, modeling, thermal regime.

Data on authors

- Yury Z. Bubnov* — Dr. Techn. Sci., Professor; “Avangard Public Corp.”, St. Petersburg; Chief Designer
Gavriil V. Birylin — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: gavriila@bk.ru
Vladimir I. Egorov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru
Sergey V. Posternakov — “Avangard Public Corp.”, St. Petersburg; Leading Engineer

P. 41—45.

MODELING OF THERMAL REGIMES OF ELECTRONIC SYSTEMS WITH NATURAL VENTILATION

Computer simulation of thermal and hydrodynamic fields in electronic cassette-type apparatus is performed. Results of calculations on the base of finite elements method are compared with step-by-step modeling.

Keywords: radio-electronic device, modeling, thermal regime.

Data on authors

- Daniil A. Danilov* — FGUP “Aurora”, St. Petersburg; Engineer
Vladimir I. Egorov — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: KTF@grv.ifmo.ru
Svetlana V. Fadeeva — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring
Alexander V. Sharkov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: ktf@grv.ifmo.ru

P. 45—48.

EXPERIMENTAL STUDY OF DYNAMICS OF HEAT EXCHANGE THROUGH ENCLOSURE

Peculiarities in heat exchange through enclosure in static and dynamic regimes are considered. Temperature oscillation inside and outside a construction are measured experimentally. Analysis of correlation of the measuring data is carried out.

Keywords: enclosure, heat exchange, thermal inertia, spectral power density, phase shift.

Data on authors

- Konstantin S. Kostenko* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: kks@sald.ru
Gennady N. Lukyanov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Electronics; E-mail: gen-lukjanow@yandex.ru
Dmitry S. Petrov — “Technique. Thermovision. Medicine Corp.”, St. Petersburg; Director; E-mail: ttm@ttm.spb.ru

P. 49—51.

THERMAL CONDUCTIVITY OF FILLED POLYMERS

Thermal conductivity of polymer materials filled with glass microspheres is calculated. Increasing the filler concentration is shown to lead to a rise in the composite thermal conductivity. Calculated results are compared with experimental data.

Keywords: polymer composite, structure, model, thermal conductivity.

Data on authors

- Dmitry P. Volkov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Computer Thermophysics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: dpv@grv.ifmo.ru
- Maya V. Uspenskaya* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: mv_uspenskaya@mail.ru

P. 52—56.

LASER TEXTURING OF MATERIAL SURFACE

A method is proposed for laser texturing of solid material surface to enhance its adhesion to polymers. Laser texturing is shown to practically increase shearing force by a factor of three.

Keywords: YAG:Er-laser, laser texturing, adhesion, enamel, polymer.

Data on authors

- Andrey V. Belikov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technique and Biomedicine Optics; E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Alexandra E. Pushkareva* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technique and Biomedicine Optics; E-mail: alpushkareva@yandex.ru
- Aleksey V. Skripnik* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technique and Biomedicine Optics; E-mail: meddv@grv.ifmo.ru
- Tatiana V. Strunina* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technique and Biomedicine Optics; Engineer; E-mail: struninatatiana@mail.ru
- Ksenia V. Shatilova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technique and Biomedicine Optics; E-mail: kshatilova@mail.ru

P. 57—62.**PECULIARITIES IN MELTING OF METAL UNDER EXPOSURE TO ULTRA SHORT LASER PULSES**

The problem of metal melting under exposure to ultra short laser pulses is considered. A modified vacancional model of melting is proposed. Analysis of laser-induced melting on the base of the model explains such peculiarities of the process as constancy of metal surface temperature and energy flux toward the front of melting with zero gradient of temperature across the melted layer.

Keywords: laser-induced melting, vacancional model of melting, ultra short laser pulse, numerical modeling.

Data on authors

- Evgeny B. Yakovlev** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: Yak@lastech.ifmo.ru
- Vera V. Svirina** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: vsvirina@mail.ru
- Olga N. Sergaeva** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Laser Technologies and Applied Ecology; E-mail: olgasergaeva@rambler.ru

P. 63—65.**POLYMER WATER-ABSORBING HIGH-STRENGTH COMPOSITES**

Polymer acrylic composites filled with modified silica-alumina glass spheres are considered. Effect of the filler on macro-kinetics of gelation and deformation and strength characteristics of the composites is investigated.

Keywords: gelation, cross-linking polymers.

Data on authors

- Valery S. Soloviev** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: solovievvs@gmail.ru
- Maya V. Uspenskaya** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: mv_ustenskaya@mail.ru
- Nikolay V. Sirotinkin** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Technology Institute (Technical University)

P. 66—70

THEORY OF ULTRASPEED SWITCHDOWN OF MOP-TRANSISTORS

Regime of ultraspeed switchdown of high-voltage MOP-transistor with a switching time no greater than several nanoseconds is studied theoretically. A mathematical model and explanation of the ultraspeed process is proposed. The theoretical conclusions are confirmed by results of direct experiments.

Keywords: MOP-transistor, high-voltage technique, pulse work, nanosecond range technique.

Data on authors

- Vyacheslav V. Togatov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Electronics; E-mail: v.togatov@mail.ru
- Peter A. Gnatyuk* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Electronics; Scientist; E-mail: gnatyuk@mail.ru
- Dmitry S. Ternovsky* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Department of Electronics; E-mail: dm-ternovsky@mail.ru

СЕРАФИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ СУХОПАРОВ

1918 — 2010

16 марта 2010 г. скончался известный ученый, профессор кафедры компьютеризации и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО, член редколлегии журнала „Известия вузов. Приборостроение“ Серафим Александрович Сухопаров.



С. А. Сухопаров — выходец из многодетной семьи, родился в Орловской губернии. Детство его не было безоблачным: он родился спустя полгода, как свершилась Октябрьская революция, в стране менялся быт, ломался уклад жизни... Рано начав трудовую жизнь, так как вынужден был помогать большой семье, Серафим Александрович, тем не менее, поступил в Химико-технологический техникум им. Д. И. Менделеева. Совмещая учебу с работой лаборантом на Государственном оптико-механическом заводе (ныне фирма ЛОМО), он впоследствии поступает в Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО), который заканчивает в 1943 г.

Во время блокады Ленинграда, работая на заводе ГОМЗ, а затем, будучи в эвакуации, — на Казанском оптическом заводе, Серафим Александрович занимался созданием необходимых для Советской армии военно-оптических приборов. В 1945 г. он работал в комиссии по демилитаризации фирмы „Карл Цейс Йена“, изучая ее достижения и опыт и привлекая специалистов этой фирмы для работы по контрактам на оптических заводах нашей страны.

В 1947 г. С. А. Сухопаров становится начальником лаборатории, а спустя 10 лет — главным инженером ЦКБ ЛОМО. При его непосредственном участии осуществлялись исследования и разработка теории нерасстраивающихся оптических приборов, методов их расчета, юстировки и контроля.

Преподавательскую деятельность С. А. Сухопаров начал в Физико-механическом техникуме им. С. А. Зверева в 1952 г. По конкурсу в 1960 г. был принят доцентом в ЛИТМО, где впоследствии возглавил кафедру специальных оптических приборов. Наряду с руководством кафедрой Серафим Александрович много сил и времени отдавал научно-педагогической работе: исследования по совершенствованию надежности оптических приборов продолжают его ученики.

Интересы С. А. Сухопарова в науке были многогранны: измерительные и информационные технологии, телевидение. Его теоретические исследования опубликованы в 105 научных трудах; оригинальные разработки защищены 25 авторскими свидетельствами на изобретения; сами научные труды и учебные пособия до сих пор являются уникальными.

Профессор С. А. Сухопаров — ветеран труда и блокады. Его заслуги перед Родиной отмечены рядом правительственных наград.

До последних дней своей жизни С. А. Сухопаров имел большой запас творческих сил и оригинальных идей. Его всегда отличали скромность, отзывчивость, высокая работоспособность и безграничная потребность в научном поиске.

Выражаем глубокое соболезнование родственникам и близким покойного.

*Коллектив кафедры компьютеризации
и проектирования оптических приборов СПбГУ ИТМО*

Редакционная коллегия журнала