

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

№ 1

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2014

В журнале публикуются статьи, содержащие фундаментальные и прикладные результаты в области лазерной оптики, в том числе связанные с исследованиями в области технологии и свойств оптических компонентов, источников, приемников и преобразователей оптического излучения, оптических коммуникаций, оптических датчиков и информационных систем, лазерных технологий обработки материалов, фотоники в биологии и медицине, радиофотоники.

Предназначено для научных сотрудников, специализирующихся в области фотоники и оптоэлектронного приборостроения, студентов старших курсов направлений «Фотоника и оптоэлектроника», «Приборостроение», «Лазерная техника», «Волоконная оптика».

Главный редактор: *А.С. Курков*, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)

Заместитель главного редактора: *В.П. Первадчук*, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

Ответственный секретарь: *Т.А. Осечкина*, канд. физ.-мат. наук (Пермь, Россия)

Редакционная коллегия:

Е.М. Дианов, акад. РАН (Москва, Россия)

Ю.Н. Кульчин, акад. РАН (Владивосток, Россия)

В.П. Матвеев, акад. РАН (Пермь, Россия)

С.А. Бабин, чл.-корр. РАН (Новосибирск, Россия)

А.Н. Гурьянов, чл.-корр. РАН (Нижний Новгород, Россия)

А.Б. Вольныйцев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

Н.А. Гиппиус, д-р физ.-мат. наук, профессор (Сколтех, Москва)

В.В. Криштон, д-р физ.-мат. наук, профессор (Хабаровск, Россия)

А.С. Курков, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)

О.Е. Наний, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

В.П. Первадчук, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

Д.И. Семенов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Ульяновск, Россия)

Е.В. Сорокин, профессор (Венский технический университет, Австрия)

Н.А. Труфанов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

С.К. Турицын, профессор (университет Астон, Бирмингем, Англия)

М.П. Федорук, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

А.И. Цаплин, д-р техн. наук, профессор (Пермь, Россия)

В.Б. Цветков, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва, Россия)

И.Н. Шардаков, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

В.Я. Шур, д-р физ.-мат. наук, профессор (Екатеринбург, Россия)

Ю.В. Чеботаревский, д-р физ.-мат. наук, профессор (Саратов, Россия)

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-59184 от 3 сентября 2014 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Фирстов С.В., Алышев С.В., Мелькумов М.А., Рюмкин К.Е., Шубин А.В., Дианов Е.М.</i> Волоконные световоды, легированные висмутом, – новая активная среда для лазеров и усилителей ближнего ИК-диапазона.....	6
<i>Вебер А.А., Пырклов Ю.Н., Серегин В.С., Русанов С.Я., Бессарабская И.Э., Цветков В.Б.</i> Экспериментальные исследования оптических характеристик стали при высоких температурах.....	20
<i>Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н.</i> Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи	27
<i>Смирнов А.С., Бурдин В.В., Константинов Ю.А.</i> Об оценке h -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне на основе данных поляризационной рефлектометрии.....	51
<i>Ляпин А.А., Рябочкина П.А., Чабушкин А.Н., Ушаков С.Н., Федоров П.П.</i> Визуализатор двухмикронного лазерного излучения на основе $\text{CaF}_2:\text{Ho}$	58
<i>Белюсов А.А., Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В., Дубровская А.А., Тихонов Е.В.</i> О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн.....	65
<i>Первадчук В.П., Давыдов А.Р.</i> Имитационная модель процесса вытяжки кварцевых оптических волокон	87
<i>Труфанов А.Н., Труфанов Н.А.</i> О моделях формирования напряженного состояния в анизотропных оптических волокнах.....	97
<i>Бессонов Д.А., Конюшин А.В., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л.</i> Улучшение характеристик автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода методом прогрессивного лазерного структурирования	112
<i>Генинг Т.П., Воронова О.С., Долгова Д.Р., Абакумова Т.В., Полуднякова Л.В., Курков А.С., Золотовский И.О.</i> Влияние лазерного излучения на длине волны 1265 нм на редокс-зависимые процессы в организме-опухоленосителе	120
<i>Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С.</i> Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,1 мкм для медицинского применения.....	130
Сведения об авторах	140

CONTENTS

<i>Firstov S.V., Alyshev S.V., Melkumov M.A., Rumkin K.E., Shubin A.V., Dianov E.M.</i> Bismuth-doped optical fibers – a new active medium for NIR lasers and optical amplifiers.....	6
<i>Veber A.A., Pyrkov Iu.N., Seregin V.S., Rusanov S.Ia., Bessarabskaia I.E., Tsvetkov V.B.</i> Experimental study of steel optical characteristics at high temperature.....	20
<i>Leonov A.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N.</i> Raman amplifiers in optical communication systems.....	27
<i>Smirnov A.S., Burdin V.V., Konstantinov Iu.A.</i> Evaluation of polarization maintaining fiber <i>h</i> -parameter with polarization reflectometry.....	51
<i>Liapin A.A., Riabochkina P.A., Chabushkin A.N., Ushakov S.N., Fedorov P.P.</i> Visualiser of two-micron laser radiation based on CaF ₂ :Ho	58
<i>Belousov A.A., Volkhin U.N., Gamilovskaia A.V., Dubrovskaja A.A., Tikhonov E.V.</i> Radiophotonical methods and tools used for microwave analog and digital signal processing	65
<i>Pervadchuk V.P., Davydov A.R.</i> Simulation model of quartz optical fibers extraction process	87
<i>Trufanov A.N., Trufanov N.A.</i> Models of the formation of the stress state in PM optical fibers	97
<i>Bessonov D.A., Konushin A.V., Popov I.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L.</i> Improving the characteristics of field-emission glass-carbon cathodes with progressive method of laser structuring.....	112
<i>Gening T.P., Voronova O.S., Dolgova D.R., Abakumova T.V., Poludniakova L.V., Kurkov A.S., Zolotovskii I.O.</i> The effect of laser radiation at 1265 nm on redox-dependent processes in tumor-bearing organisms	120
<i>Filatova S.A., Tsvetkov V.B., Kurkov A.S.</i> Ho fiber laser emitting at a wavelength of 2,1 microns for medical application	130
About the authors	140

Уважаемые коллеги!

Мы приступаем к выпуску журнала «Прикладная фотоника». В настоящее время за рубежом и в нашей стране выпускается достаточно много журналов, посвященных оптической и лазерной тематике. Большинство из них посвящено фундаментальным вопросам, часть является «глянцевыми» журналами и носит рекламный характер. Найти в этом многообразии изданий свою нишу достаточно трудно. Тем не менее мы считаем, что нацеленность именно на практические разработки и применения поможет нам решить эту задачу. Среди тем нашего журнала можно выделить технологию и свойства оптических компонентов, источники, приемники и преобразователи оптического излучения, оптические коммуникации, оптические датчики и информационные системы, лазерные технологии обработки материалов, фотонику в биологии и медицине. Мы рассчитываем, что в статьях, опубликованных в «Прикладной фотонике», будут сочетаться фундаментальный подход и практическое значение результатов исследований. Кроме того, полагаем, что журнал будет выполнять и образовательную функцию.

То, что журнал выпускается именно в Перми, является закономерным. В этом городе сосредоточены высокотехнологичные предприятия, заинтересованные как в выпуске, так и в применении систем на основе современной фотоники. В Перми функционирует Научный центр РАН и два исследовательских университета. Мы надеемся, что наш журнал будет способствовать работе как промышленных предприятий, так и университетов и научных институтов.

Редакционная коллегия журнала «Прикладная фотоника» составлена из высококвалифицированных специалистов, широко известных в России и за рубежом. Это является одним из факторов, определяющих уровень журнала. Но еще в большей степени успех журнала будет зависеть от вас, наши потенциальные авторы, читатели и рецензенты. Мы приглашаем к сотрудничеству всех специалистов в области фотоники и рассчитываем на ваши статьи, рецензии и просто мнения о журнале и предложения по его содержанию.

С уважением,
главный редактор журнала «Прикладная фотоника» А.С. Курков,
д-р физ.-мат. наук, профессор ПНИПУ,
заведующий лабораторией фотоники
Пермского научного центра УрО РАН

УДК 539.37

**С.В. Фирстов, С.В. Алышев, М.А. Мелькумов,
К.Е. Рюмкин, А.В. Шубин, Е.М. Дианов**

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

**ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ, ЛЕГИРОВАННЫЕ
ВИСМУТОМ, – НОВАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ЛАЗЕРОВ
И УСИЛИТЕЛЕЙ БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА**

Приведен обзор оптических свойств волоконных световодов, легированных висмутом. Представлены характеристики лучших по состоянию на данный момент лазеров и оптических усилителей созданных на основе волоконных световодов, легированных висмутом. Кратко обсуждены проблемы применения висмутовых активных сред.

Ключевые слова: висмут, волоконный световод, волоконный лазер, волоконный оптический усилитель.

**S.V. Firstov, S.V. Alyshev, M.A. Melkumov,
K.E. Rumkin, A.V. Shubin, E.M. Dianov**

Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

**BISMUTH-DOPED OPTICAL FIBERS – A NEW ACTIVE
MEDIUM FOR NIR LASERS AND OPTICAL AMPLIFIERS**

An overview of the optical properties of bismuth-doped optical fibers is presented. The current state of the art in the creation of bismuth-doped fiber lasers and optical amplifiers is described. The problems accounted in practical use of the bismuth-doped fiber lasers and optical amplifiers are briefly discussed.

Keywords: bismuth, optical fiber, fiber laser, optical fiber amplifier.

1. Введение

Поиск и создание новых активных лазерных сред по-прежнему остается весьма актуальным из-за постоянной потребности в новых лазерах и оптических усилителях для многих областей применения, в частности для нового поколения волоконно-оптических систем связи. Современные коммерческие волоконно-оптические системы позволяют передавать информацию со скоростью до 10 Тбит/с по одному световоду, тогда как

в экспериментальных системах скорость передачи информации достигает ~ 100 Тбит/с. Это колоссальный успех в развитии волоконно-оптических систем связи и передачи информации, однако потребность в информации в развитых странах растет ежегодно на 30–40 %. Это означает, что через 10 лет возникнет потребность в передаче информации по одному волоконному световоду с петабитными скоростями. В литературе обсуждается ряд подходов к решению этой проблемы (см., например, работы [1, 2] и ссылки в них). Одним из них является расширение спектральной области для передачи информации. В современных высокоскоростных волоконно-оптических системах для этой цели используется узкая (80 нм) спектральная область 1530–1610 нм, определяемая полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя. Но, как видно из рис. 1, область низких оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла значительно шире. Так, спектральная область с оптическими потерями менее 0,4 дБ/км, которая могла бы быть использована для передачи информации, достигает 400 нм (1300–1700 нм).

Однако в настоящее время для спектральных областей 1300–1520 и 1610–1700 нм отсутствуют эффективные волоконные оптические усилители – обязательные элементы высокоскоростных волоконно-оптических систем связи и передачи информации.

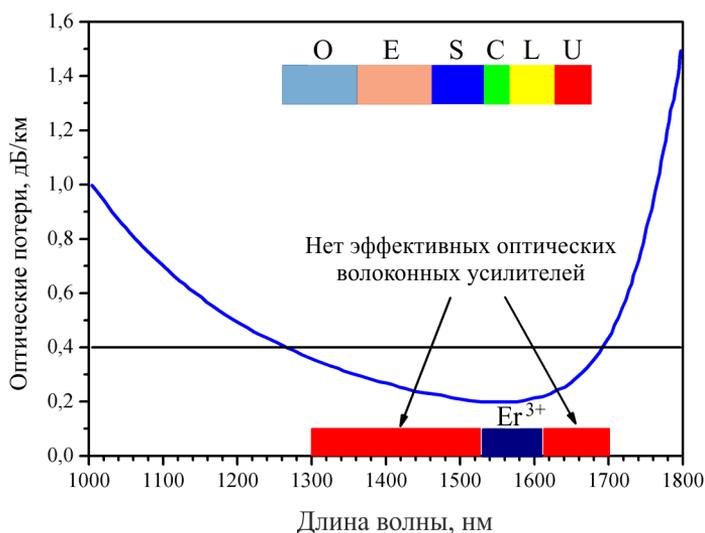


Рис. 1. Спектр оптических потерь волоконных световодов на основе кварцевого стекла и спектральная область работы эрбиевого волоконного усилителя (Er³⁺), используемая в настоящее время для высокоскоростной передачи информации.

Также отмечены спектральные диапазоны O, E, S, C, L и U (терминология, используемая в телекоммуникационной литературе)

Другой важной задачей, решение которой может потребоваться уже в ближайшие годы, является разработка пассивных оптических сетей с грубым (разреженным) спектральным уплотнением (Coarse WDM Next Generation Passive Optical Networks – CWDM NG – PONs). Эти системы предполагается использовать для доставки информации к конечному пользователю (сети доступа), что накладывает серьезные ограничения на их стоимость. Планируется, что данные системы будут работать в диапазоне длин волн 1271–1611 нм¹. В этом случае требуется оптический усилитель с полосой усиления 340 нм или 170 нм – при разбиении полосы усиления на два диапазона для прямого и обратного трафика [3]. Пока создание любого из указанных усилителей является очень сложной задачей. Поэтому в данных системах предлагалось использовать различные схемы усиления на основе комбинирования полупроводниковых усилителей, эрбиевых волоконных усилителей, оптических параметрических и ВКР-усилителей [4]. Однако обеспечение оптического усиления по приемлемой для этих систем стоимости все еще встречает серьезные затруднения.

В этом контексте активные волоконные световоды, легированные висмутом, являются многообещающей средой, так как на данных типах световодов уже сейчас продемонстрировано оптическое усиление и лазерная генерация в диапазоне длин волн от 1146 до 1775 нм. Настоящая работа посвящена обзору оптических и усилительных свойств этих световодов.

2. Оптические свойства волоконных световодов, легированных висмутом

Люминесценция в ближнем инфракрасном диапазоне в стеклах, легированных висмутом, была обнаружена в 2001 г. [5]. Первый ИК-люминесцирующий легированный висмутом световод был изготовлен в 2005 г. [6, 7]. Всестороннее изучение оптических свойств данных активных сред показало, что характеристики формирующихся висмутовых активных центров (ВАЦ) в сильной степени определяются составом стекла сердцевины световодов. В результате многолетних исследований удалось выявить четыре класса ВАЦ в световодах на основе

¹ TU-T G. 694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid Series G: Transmission systems and Media Digital Systems and Networks Transmission media characteristics – Characteristics of optical component and subsystems. December 2003.

кварцевого стекла, а именно: ВАЦ, ассоциированные с алюминием (ВАЦ-Al); ВАЦ, ассоциированные с фосфором (ВАЦ-P); ВАЦ, ассоциированные с кремнием (ВАЦ-Si), и ВАЦ, ассоциированные с германием (ВАЦ-Ge). Понятие «ассоциированные» означает, что соответствующие центры появляются в стекле, содержащем в значительных количествах данный элемент. Например, ВАЦ-Al формируются в алюмосиликатных, алюмофосфоросиликатных, алюмогерманатных стеклах. Появление определенного класса ВАЦ устанавливалось по характерным полосам поглощения и люминесценции. Подробное обсуждение оптических свойств висмутовых активных центров в различных стеклянных матрицах приводится, например, в работах [8–11]. Здесь необходимо лишь отметить, что способность висмута образовывать различные ИК-люминесцирующие активные центры в зависимости от состава стекла делает его более универсальным по сравнению, например, с редкоземельными элементами. Другими словами, изменяя состав стекла сердцевины световода, мы можем сильно сдвигать его полосу люминесценции – соответственно, и полосу оптического усиления – и тем самым добиваться оптического усиления и лазерной генерации в широком спектральном диапазоне.

На рис. 2 представлены характерные спектры потерь висмутовых световодов различного состава. Включение висмута в стекло сердцевины приводит к появлению в спектре потерь световода характерных полос поглощения в видимой и ближней ИК-области. Каждому световоду соответствуют определенные полосы поглощения. Кроме полос ВАЦ во всех световодах присутствует полоса поглощения ОН групп с максимумом на 1,38 мкм.

Рис. 3 демонстрирует спектры люминесценции и возбуждения люминесценции световодов, различающихся по химическому составу стекла сердцевины. Спектрами люминесценции определяется возможная рабочая спектральная область лазеров и усилителей, а спектрами возбуждения люминесценции – область излучения источников накачки. Видно, что спектральное положение полос люминесценции и возбуждения характерной люминесценции существенно зависит от химического состава стеклянной матрицы. Поэтому для получения лазерной генерации в широком спектральном диапазоне необходимо варьировать химический состав стекла сердцевины активного световода и источники накачки.

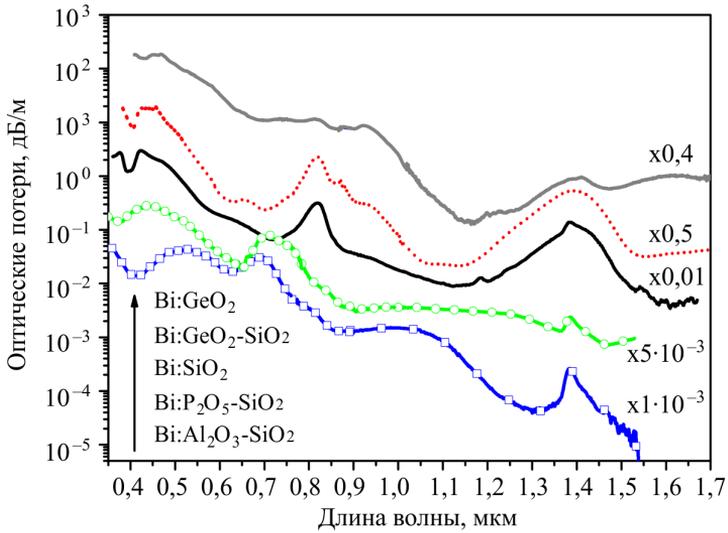


Рис. 2. Характерные оптические потери в легированных висмутом световодах с разными составами стекла сердцевины. Исходные спектры поглощения перекрывались друг с другом, поэтому для наглядности каждое значение соответствующего спектра потерь умножалось на коэффициент, приведенный справа от линии

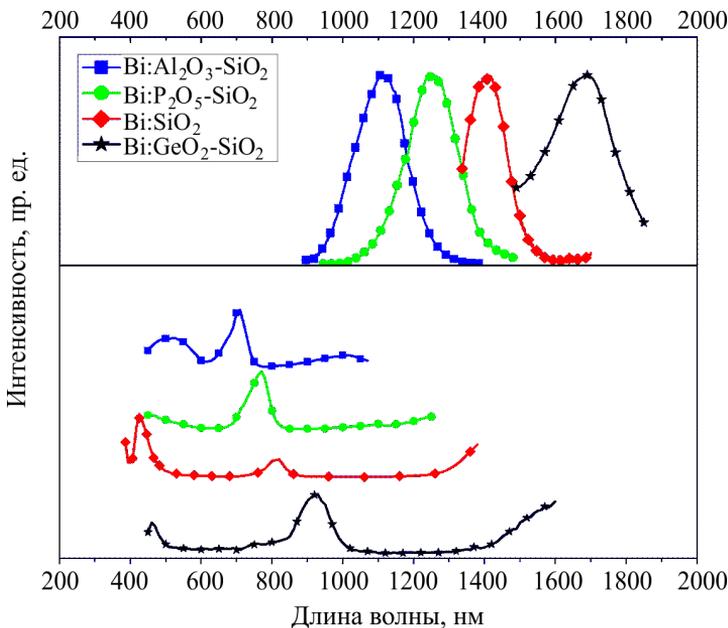


Рис. 3. Характерные спектры люминесценции (верхний график) и возбуждения люминесценции (нижний график) висмутовых световодов различного состава (световод из чистого кварцевого стекла, а также алюмосиликатный, фосфоросиликатный, германосиликатный световоды)

3. Лазеры

Висмутовые волоконные лазеры создавались на основе световодов различного химического состава (см. предыдущий пункт), что позволяло получать лазерную генерацию в разных спектральных областях. Резонатор висмутовых лазеров формировался из активного световода и двух волоконных брэгговских решеток показателя преломления. Запись таких решеток осуществлялась УФ-облучением отрезков фоточувствительных световодов, которые затем приваривались к концам активного образца. Иногда для снижения внутрирезонаторных потерь брэгговские решетки записывались в сердцевине активного световода. Во всех экспериментах одна из решеток имела коэффициент отражения, близкий к 100 % (глухое зеркало). Коэффициент отражения другой (выходной) решетки выбирался исходя из свойств активной среды (полупрозрачное зеркало). В некоторых схемах в качестве выходного зеркала служил торец оптического волокна. Длина волны накачки выбиралась в зависимости от конкретного типа световода. В качестве источников накачки использовались волоконные лазеры, работающие на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-лазеры), Yb и Er–Yb волоконные лазеры, твердотельный неодимовый лазер. Накачка вводилась в сердцевину активного световода.

Исторически первым лазером на основе активного волокна, легированного висмутом, был лазер на основе алюмосиликатного световода, т.е. лазер, использующий оптические переходы ВаЦ–Al [12]. На данном типе центров была достигнута лазерная генерация в диапазоне от 1146 до 1215 нм с низким значением пороговой мощности накачки (~100 мВт). Позже было показано, что на данном типе световодов можно создавать лазеры с выходной мощностью 15 Вт ($\lambda_{\text{las}} = 1160$ нм) [13] и КПД ≈ 28 % [14]. Длина волны излучения накачки таких лазеров была в области 1060–1090 нм.

Висмутовые волоконные лазеры, излучающие в области длин волн от 1270 до 1360 нм, создавались на основе фосфоросиликатных световодов, легированных висмутом [15, 16]. В настоящее время максимальная достигнутая мощность таких лазеров составляет 10,6 Вт (для $\lambda_{\text{las}} = 1330$ нм), а КПД ≈ 40 %. В качестве источника накачки для таких лазеров используется ВКР-лазер, излучающий на длине волны 1230 нм.

До сих пор наилучшие результаты показывают висмутовые лазеры, работающие в области ≈ 1320 –1540 нм. В этом случае максимальная выходная мощность превышает 20 Вт (для $\lambda_{\text{las}} = 1460$ нм). КПД ра-

боты такого лазера составляет 60 % [17]. Активной средой данного типа лазеров служит германосиликатный световод, легированный висмутом. Следует отметить, что лазерная генерация возникает на оптических переходах между энергетическими уровнями, принадлежащими ВАЦ-Si, при возбуждении $\lambda_{\text{pump}} = 1340$ нм ВКР-лазером. Однако в легированных висмутом германосиликатных световодах могут формироваться и ВАЦ-Ge, полоса люминесценции (усиления) которых расположена в области 1600–1800 нм.

Первые результаты показывают возможность лазерной генерации в области 1625–1775 нм на оптическом переходе между энергетическими уровнями ВАЦ-Ge с использованием в качестве накачки Er-Yb волоконного лазера, излучающего на длине волны 1568 нм. Максимальное значение КПД таких лазеров составляет 20 % [18, 19]. Необходимо подчеркнуть, что генерация в данном диапазоне является новым результатом, и здесь еще остаются возможности дальнейшего улучшения характеристик.

Спектральные области лазерной генерации на различных типах волоконных световодов, легированных висмутом, представлены на рис. 4. На приведенном графике также отмечены спектральные диапазоны, ис-

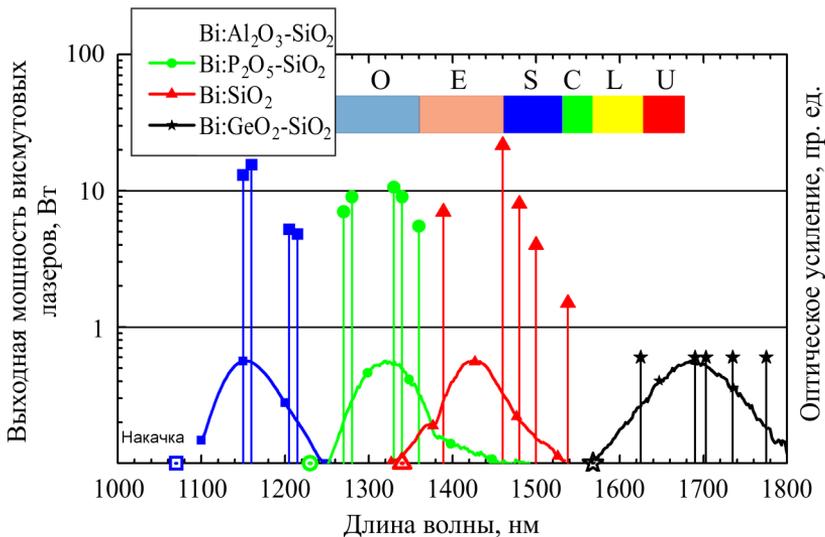


Рис. 4. Спектральный диапазон излучения лазеров на различных (по химическому составу стекла сердцевины) световодах, легированных висмутом. Положение вертикальных линий соответствует длинам волн, длины линий – мощностям лазеров. Также показаны нормированные спектры оптического усиления

пользуемые в современных волоконных линиях связи, и спектры оптического усиления висмутовых световодов. Видно, что, комбинируя различные составы сердцевины, можно перекрыть лазерной генерацией широкий спектральный диапазон от 1100 до 1800 нм.

4. Оптические усилители

Приведенные выше результаты показывают, что световоды, легированные висмутом, могут служить активной средой для волоконных оптических усилителей, работающих в диапазоне 1100–1800 нм.

В настоящее время с использованием германосиликатных световодов разработан оптический усилитель для области 1430 нм с шириной полосы усиления по уровню 3 дБ $\Delta\lambda_{1/2} = 36$ нм [20]. Рис. 5 показывает спектр усиления и спектральную зависимость шум-фактора данного усилителя. Пиковое усиление в 24 дБ достигалось при мощности накачки 65 мВт коммерчески доступным лазерным диодом с длиной волны излучения $\lambda_{\text{pump}} = 1310$ нм. Шум-фактор в полосе $\Delta\lambda_{1/2}$ составлял ~6 дБ. Максимальная эффективность усиления была равна 0,4 дБ/мВт. Это значение примерно на порядок меньше, чем типичные значения для эрбиевых волоконных усилителей, но на порядок выше, чем для типичного ВКР-усилителя, и в 2–4 раза выше, чем для тулиевого волоконного усилителя [20].

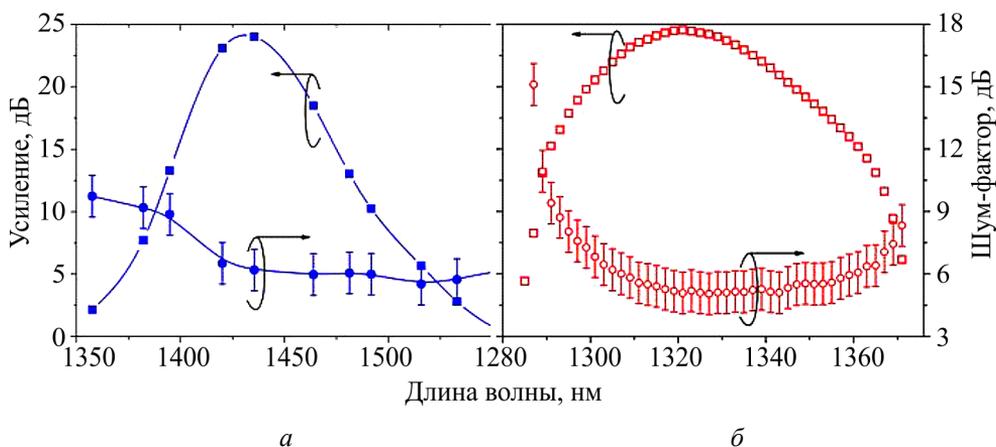


Рис. 5. Характеристики оптических усилителей на основе легированных висмутом световодов: *a* – германосиликатного; *б* – фосфоросиликатного

Для области 1283–1372 нм также разработан оптический усилитель на основе фосфоросиликатного световода, легированного висму-

том. Однако для достижения усиления 24,5 дБ в этом случае требовалась мощность в 6 раз выше (460 мВт от волоконного ВКР-лазера с $\lambda_{\text{pump}} = 1230$ нм), чем для усилителя на 1430 нм [13]. Максимальная эффективность усиления составляла 0,09 дБ/мВт. Ширина полосы усиления $\Delta\lambda_{1/2} = 37$ нм. Спектр оптического усиления и спектральная зависимость шум-фактора усилителя представлены на рис. 5, б.

В случае алюмосиликатных световодов, легированных висмутом, КПД усилителя для области $\approx 1140\text{--}1215$ нм не превышает 0,01 дБ/мВт. Одной из причин низкого КПД является наличие в данных типах световодов поглощения из возбужденного состояния [21].

Усилительные свойства германосиликатных световодов в области 1600–1800 нм на данный момент находятся в состоянии исследования. Полученные результаты будут представлены в других работах.

5. Проблемы применения висмутовых активных сред

Несмотря на очевидный прогресс в области создания висмутовых лазеров и усилителей, существует ряд проблем, типичных при использовании новых лазерных материалов, которые пока не решены.

Отметим три ключевые проблемы:

1. Эффективная лазерная генерация на висмутовых волоконных световодах получена при низком общем содержании висмута (менее 0,02 ат. %). Попытки увеличить концентрацию висмута приводят либо к возрастанию фоновых ненасыщаемых потерь [22], либо к формированию других активных центров с короткими временами жизни люминесценции [23].

2. КПД оптических висмутовых лазеров и усилителей ниже по сравнению с аналогичными устройствами с использованием световодов с редкоземельными ионами (Er^{3+} , Yb^{3+}).

3. Отсутствие экспериментально подтвержденной модели висмутового активного центра создает определенные трудности при оптимизации химического состава стеклянной матрицы и технологии производства висмутовых волоконных световодов и, как следствие, не позволяет добиться оптимальных характеристик висмутовых лазеров и усилителей.

Трудности в использовании висмутовых сред в значительной степени связаны со своеобразием висмута как активного иона. Bi^{3+} , входящий в состав исходных соединений при изготовлении волоконных световодов, быстро восстанавливается при высоких температурах (температурах плавления

ния стекла) с образованием разнообразных нанокластеров [24]. Проведение интенсивных исследований и получение новых результатов в данном направлении позволит продвинуться в решении указанных проблем.

6. Заключение

В работе представлен обзор основных достижений в области висмутовых волоконных лазеров и усилителей. В частности показано, что висмутовые волоконные лазеры перекрывают O, E, S, C, L и U телекоммуникационные полосы. Полученные результаты свидетельствуют о больших потенциальных возможностях использования висмутовых волоконных световодов для создания лазеров и оптических усилителей, работающих в ближнем ИК-диапазоне.

Список литературы

1. Morioka T. New generation optical infrastructure technologies: “EXAT ‘initiative’ towards 2020 and beyond” // OptoElectronics and Communications Conference. – 2009. – Paper FT4.
2. Дианов Е.М. На пороге пета-эры // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183, № 5. – С. 511–518.
3. Four extended-reach TDM PONs sharing a bidirectional hybrid CWDM amplifier / P.P. Iannone, H.H. Lee, K.C. Reichmann, X. Zhou, M. Du, B. Palsdottir, K. Feder, P. Westbrook, K. Brar, J. Mann, L. Spiekman // J. Lightwave Technol. – 2008. – Vol. 26. – P. 138–143.
4. Engineering an extended gain bandwidth hybrid Raman – optical Parametric amplifier for next generation CWDM PON / S. Peris, N. Madamopoulos, N. Antoniadis, D. Richards, M.A. Ummy, R. Dirsinville // J. Lightwave Technol. – 2014. – Vol. 32, iss. 5. – P. 939–946.
5. Fujimoto Y., Nakatsuka M. Infrared Luminescence from Bismuth-Doped Silica Glass // Jpn. J. Appl. Phys. – 2011. – Vol. 40. – P. L279–L281.
6. Absorption, Fluorescence and Optical Amplification in MCVD Bismuth-Doped Silica Glass Optical Fibres / V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky, E.M. Dianov, A.A. Umnikov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov // Proc. European Conf. on Optical Communications, September 25–29. – Glasgow, 2005. – Paper Th 3.3.5.
7. Silica-Based Bismuth-Doped Fiber for Ultra Broad Band Light-Source and Optical Amplification around 1.1 μm / T. Haruna, M. Kakui, T. Taru, Sh. Ishikawa, M. Onishi // Proc. Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting, August 7–10. – Budapest, 2005. – Paper MC3.

8. Dianov E.M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers // *Light: Science and Applications* 1. – 2012. – e 12. DOI: 10.1038/lssa. 2012.12.

9. Dianov E.M. Amplification in extended transmission bands using Bi-doped optical fibers // *J. Lightwave Technol.* – 2013. – Vol. 31. – P. 681–688.

10. Combined excitation-emission spectroscopy of bismuth active centers in optical fibers / S.V. Firstov, V.F. Khopin, I.A. Bufetov, E.G. Firstova, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Opt. Express.* – 2011. – Vol. 19. – P. 19551–19561.

11. Bufetov I.A., Dianov E.M. Bi-doped fiber lasers // *Laser Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 6. – P. 487–504.

12. Непрерывный висмутовый волоконный лазер / Е.М. Дианов, В.В. Двойрин, В.М. Машинский, А.А. Умников, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов // *Квантовая электроника.* – 2005. – № 35 (12). – С. 1083–1084.

13. Bi-Doped Optical Fibers and Fiber Lasers / I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov, K.E. Riumkin, A.V. Shubin, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics.* – 2014. – Vol. 20. – P. 111–125.

14. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. Efficient Bismuth-Doped Fiber Lasers // *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS.* – 2008. – Vol. 44 (9). – P. 834–840.

15. / Efficient Bi-doped fiber lasers and amplifiers for the spectral region 1300–1500 nm / I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, V.F. Khopin, S.V. Firstov, A.V. Shubin, O.I. Medvedkov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Proc. of SPIE.* – 2010. – Vol. 7580. – P. 758014–758023.

16. High-power cw 1.27 μm Bi-doped fiber laser / I.A. Bufetov, A.V. Shubin, S.V. Firstov, M.A. Melkumov, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Conf. on Lasers and Electro-optics (CLEO/Europe 2011).* – Munich, 2011. – Paper CJ8.2THU.

17. Bismuth-doped silica-based fiber lasers operating between 1389 and 1538 nm with output power of up to 22 W / A.V. Shubin, I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov, O.I. Medvedkov, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Optics Lett.* – 2012. – Vol. 37. – P. 2589–2591.

18. Новый висмутовый волоконный лазер, излучающий в диапазоне 1625–1775 нм / Е.М. Дианов, С.В. Фирстов, С.В. Альшеев, К.Е. Рюмкин, А.В. Шубин, В.Ф. Хопин, А.Н. Гурьянов, О.И. Медведков, М.А. Мелькумов // *Квантовая электроника.* – 2014. – Т. 44, № 6. – С. 503–504.

19. New Bismuth-Doped Fiber Laser Operating at 1625–1775 nm / E.M. Dianov, S.V. Firstov, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin, S.V. Shubin, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, O.I. Medvedkov, M.A. Melkumov // Proc. European Conf. on Optical Communications. – Cannes, 2014. – Paper number R1.5.

20. Laser diode pumped bismuth-doped optical fiber amplifier for 1430 nm band / M.A. Melkumov, I.A. Bufetov, A.V. Shubin, S.V. Firstov, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Optics Lett. – 2011. – Vol. 36, no. 13. – P. 2408–2410.

21. Excited state absorption in various Bi-doped fibers / K.E. Riumkin, M.A. Melkumov, I.A. Varfolomeev, A.V. Shubin, I.A. Bufetov, S.V. Firstov, V.F. Khopin, A.A. Umnikov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Optics Lett. – 2014. – Vol. 39. – P. 2503–2506.

22. Bismuth-doped-glass optical fibers—a new active medium for lasers and amplifiers / V.V. Dvoyrin, V.M. Mashinsky, L.I. Bulatov, I.A. Bufetov, A.V. Shubin, M.A. Melkumov, E.F. Kustov, A.A. Umnikov, V.F. Khopin, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // Optics Lett. – 2006. – Vol. 31, no. 20. – P. 2966–2968.

23. ИК люминесценция в легированных висмутом германатных стеклах и волоконных световодах / А.А. Пыненков, С.В. Фирстов, А.А. Панов, Е.Г. Фирстова, К.Н. Нищев, И.А. Буфетов, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2013. – № 43 (2). – С. 174–176.

24. Influence of the melting conditions of heavy metal oxide glasses containing bismuth oxide on their optical absorption / O. Sanz, E. Haro-Poniatowski, J. Gonzalo, J.M. Fernández Navarro // J. of Non-Crystalline Solids. – 2006. – Vol. 352, iss. 8. – P. 761–768.

References

1. Morioka T. New generation optical infrastructure technologies: “EXAT ‘initiative’ towards 2020 and beyond”. *OptoElectronics and Communications Conference*, 2009, paper FT4.

2. Dianov E.M. Na poroge peta-ery [On the threshold of the peta-era]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2013, vol. 183, no. 5, pp. 511–518.

3. Iannone P.P, Lee H.H., Reichmann K.C., Zhou X., Du M., Palsdottir B, Feder K., Westbrook P., Brar K., Mann J., Spiekman L. Four extended-reach TDM PONs sharing a bidirectional hybrid CWDM amplifier. *J. Lightwave Technol*, 2008, vol. 26, pp. 138–143.

4. Peris S., Madamopoulos N., Antoniadis N., Richards D., Ummey M.A., Dirsinville R. Engineering an extended gain bandwidth hybrid Raman – optical

Parametric amplifier for next generation CWDM PON. *J. Lightwave Technol.*, 2014, vol. 32, iss. 5, pp. 939-946.

5. Fujimoto Y., Nakatsuka M. Infrared Luminescence from Bismuth-Doped Silica Glass. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 40, pp. L279-L281.

6. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. Absorption, Fluorescence and Optical Amplification in MCVD Bismuth-Doped Silica Glass Optical Fibres. *Proc. European Conf. on Optical Communications*. Glasgow, 2005, paper Th 3.3.5.

7. Haruna T., Kakui M., Taru T., Ishikawa Sh., Onishi M. Silica-Based Bismuth-Doped Fiber for Ultra Broad Band Light-Source and Optical Amplification around 1.1 μ m. *Proc. Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting*. Budapest, 2005, paper MC3.

8. Dianov E.M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers. *Light: Science and Applications* 1, 2012, e 12. DOI: 10.1038/lssa. 2012.12.

9. Dianov E.M. Amplification in extended transmission bands using Bi-doped optical fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2013, vol. 31, pp. 681-688.

10. Firstov S.V., Khopin V.F., Bufetov I.A., Firstova E.G., Guryanov A.N. and Dianov E.M. Combined excitation-emission spectroscopy of bismuth active centers in optical fibers. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 19551-19561.

11. Bufetov I.A., Dianov E.M. Bi-doped fiber lasers. *Laser Phys. Lett.*, 2009, vol. 6, pp. 487-504.

12. Dianov E.M., Dvoirin V.V., Mashinskii V.M., Umnikov A.A., Iashkov M.V., Gur'yanov A.N. Nepreryvnyi vismutovyi volokonnyi lazer [CW bismuth fibre laser]. *Kvantovaya elektronika*, 2005, no. 35 (12), pp. 1083-1084.

13. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. Bi-Doped Optical Fibers and Fiber Lasers *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, vol. 20, pp. 111-125.

14. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. Efficient Bismuth-Doped Fiber Lasers. *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, 2008, vol. 44 (9), pp. 834-840.

15. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Khopin V.F., Firstov S.V., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. Efficient Bi-doped fiber lasers and amplifiers for the spectral region 1300–1500 nm. *Proc. of SPIE*, 2010, vol. 7580, pp. 758014-758023.

16. Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Melkumov M.A., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. High-power cw 1.27 μ m Bi-doped fiber laser. *Conf.*

on Lasers and Electro-optics (CLEO/Europe 2011). Munich, 2011, paper CJ8.2THU.

17. Shubin A.V., Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. Bismuth-doped silica-based fiber lasers operating between 1389 and 1538 nm with output power of up to 22 W. *Optics Lett.*, 2012, vol. 37, pp. 2589-2591.

18. Dianov E.M., Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Gur'ianov A.N., Medvedkov O.I., Mel'kumov M.A. Novyi vismutovyi volokonnyi lazer, izluchaiushchii v diapazone 1625–1775 nm [A new bismuth-doped fibre laser, emitting in the range 1625–1775 nm]. *Kvantovaia elektronika*, 2014, vol. 44, no. 6, pp. 503-504.

19. Dianov E.M., Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Shubin S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Medvedkov O.I., Melkumov M.A. New Bismuth-Doped Fiber Laser Operating at 1625–1775 nm. *Proc. European Conf. on Optical Communications*. Cannes, 2014, paper number R1.5.

20. Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. Laser diode pumped bismuth-doped optical fiber amplifier for 1430 nm band. *Optics Lett.*, 2011, vol. 36, no. 13, pp. 2408-2410.

21. Riumkin K.E., Melkumov M.A., Varfolomeev I.A., Shubin A.V., Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M. Excited state absorption in various Bi-doped fibers. *Optics Lett.*, 2014, vol. 39, pp. 2503-2506.

22. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Bulatov L.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Melkumov M.A., Kustov E.F., Umnikov A.A., Khopin V.F., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. Bismuth-doped-glass optical fibers—a new active medium for lasers and amplifiers. *Optics Lett.*, 2006, vol. 31, no. 20, pp. 2966-2968.

23. Pynenkov A.A., Firstov S.V., Panov A.A., Firstova E.G., Nishchev K.N., Bufetov I.A., Dianov E.M. IK liuminestsentsiia v legirovannykh vismutom germanatnykh steklakh i volokonnykh svetovodakh [IR luminescence in bismuth-doped germanate glasses and fibres]. *Kvantovaia elektronika*, 2013, no. 43 (2), pp. 174-176.

24. Sanz O., Haro-Poniatowski E., Gonzalo J., Fernández Navarro J.M. Influence of the melting conditions of heavy metal oxide glasses containing bismuth oxide on their optical absorption. *J. of Non-Crystalline Solids*, 2006, vol. 352, iss. 8, pp. 761-768.

Получено 15.10.2014

УДК 537.872.31

**А.А. Вебер, Ю.Н. Пырков, В.С. Серегин,
С.Я. Русанов, И.Э. Бессарабская, В.Б. Цветков**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Целью работы являлось получение достоверных экспериментальных данных об оптических характеристиках жаропрочной стали при высоких температурах.

Исследование образцов материалов проводилось в нагревательной камере специально разработанной установки. Защита от окисления производилась путем обдува фронтальной поверхности слабым потоком нейтрального газа.

В результате исследований разработана методика измерений и получены температурные зависимости интегральных и спектральных коэффициентов излучения и коэффициентов отражения образцов жаропрочной стали 07X25H16A6ФГ в диапазоне 500–1600 °С (773–1873 К) и спектральном диапазоне 0,65–10,6 мкм.

Спектральные коэффициенты излучения были получены методом прямого измерения мощности теплового излучения.

Ключевые слова: тепловое излучение, спектроскопия.

**A.A. Veber, Iu.N. Pyrkov, V.S. Seregin,
S.Ia. Rusanov, I.E. Bessarabskaia, V.B. Tsvetkov**

A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

EXPERIMENTAL STUDY OF STEEL OPTICAL CHARACTERISTICS AT HIGH TEMPERATURE

The goal of the research was the obtaining the authentic data about optical characteristics of heat resistant steel at heating up to high temperature.

The research of different materials emissivity and reflectivity properties was carried out in the specially designed heating chamber in air. The oxidation protection of the samples surface was provided by the blowing on with a weak flow of neutral gas.

As a result of the research the functions of integral and spectral emissivity and reflectivity of various materials in the temperature range of 500–1600 °С (773–1873 К) and wavelengths range of 0,65–10,6 μm are obtained.

The spectral emissivity values have been received as a method of direct measurement of the thermal radiation power, and also by an indirect method of reflectivity measurement. Comparison of the results obtained by these two methods increases a correctness of the received data.

Keywords: thermal radiation, spectroscopy.

1. Введение

В современной технике для создания модулей и установок, длительно работающих при высоких температурах, широко используются различные металлы и металлические сплавы.

При использовании таких материалов в условиях высоких температур излучение их поверхности вносит значительный вклад в суммарный теплообмен. Зачастую также требуется определить реальную температуру работающего устройства, что может быть осуществлено только бесконтактным способом с использованием пирометрических методов измерений. Для учета лучистого теплообмена и определения температуры нагретой металлической детали необходимы экспериментальные зависимости интегрального и спектрального коэффициентов излучения ϵ от температуры. В технической литературе эти зависимости приведены для ограниченного числа металлов и сплавов, причем, как правило, для полированных образцов в вакууме.

Известно, что даже в идеальном случае твердых веществ с оптически гладкой поверхностью ни одна из современных теорий не может в большинстве случаев обеспечить точность расчетов, необходимую для практики. Поэтому единственным способом получения надежных данных по излучательным и отражательным характеристикам различных конструкционных материалов в настоящее время является эксперимент. Состояние поверхности (окисление, загрязнение) и качество ее обработки оказывают значительное влияние на величину излучательной способности. Поэтому в ряде случаев необходимо производить измерения с образцами, имеющими качество обработки и состояние поверхности, соответствующее условиям их применения.

Целью работы являлось получение достоверных данных об оптических характеристиках некоторых жаропрочных металлов и сплавов при высоких температурах в условиях, приближенных к условиям эксплуатации.

2. Экспериментальные методы

Исследование образцов материалов проводилось в нагревательной камере специально разработанной установки (рис. 1).

В ходе работы проводились исследования влияния температуры, направления излучения и длины волны на излучательные и отражательные характеристики материалов. Выделение длины волны измерения

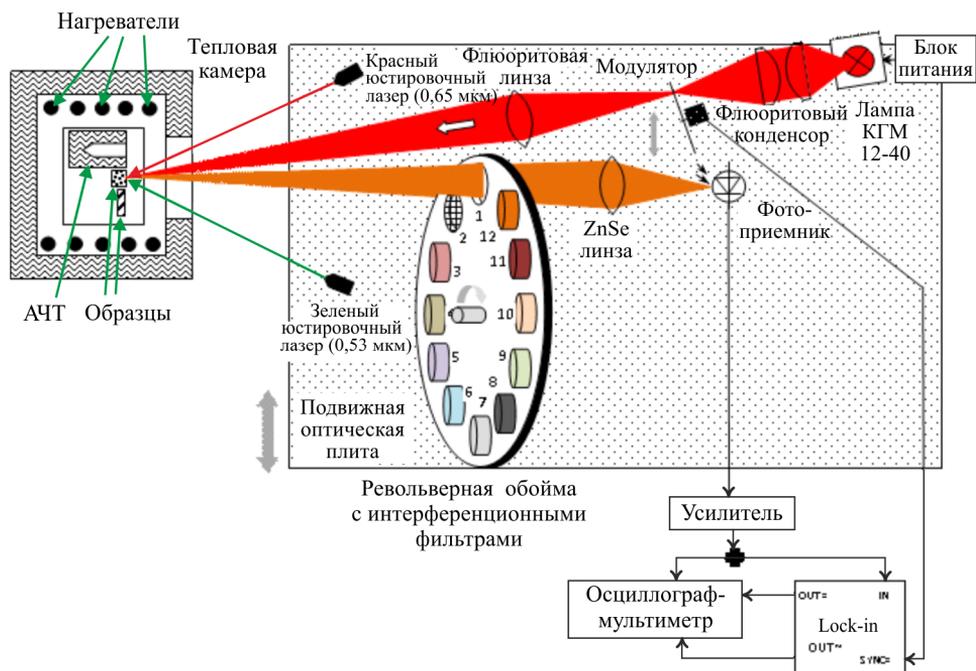


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

осуществлялось с помощью интерференционных фильтров. В дополнение к фильтрам использовались оптические фильтры для отсеки паразитного света во всем диапазоне работы фотоприемника.

Объектом исследования являлись образцы термостойких конструкционных материалов, включающие в себя образцы жаропрочной стали 07X25H16AГ6Ф без покрытия и хромированные.

В результате исследований разработана методика измерений и получены зависимости интегральных и спектральных коэффициентов излучения и коэффициентов отражения различных материалов от температуры в диапазоне 500–1600 °С (773–1873 К) и длины волны (0,65–10,6 мкм).

Спектральные коэффициенты излучения были получены как методом прямого измерения мощности теплового излучения, так и косвенным методом измерения коэффициента отражения.

При прямом измерении излучательной способности спектральный направленный коэффициент излучения в данном методе определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{\lambda 0} = (W_{\lambda s} - W_{\text{помехи}\lambda}) / W_{\lambda \text{АЧТ}}, \quad (1)$$

где W_{λ_s} – спектральная мощность теплового излучения образца, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$ и установленного нормально к линии визирования; $W_{\text{помехи}\lambda}$ – величина спектральной мощности излучения тепловой камеры, отраженного от поверхности исследуемого образца; $W_{\lambda\text{АЧТ}}$ – спектральная мощность теплового излучения модели АЧТ, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$.

Аналогично определяется интегральный коэффициент черноты:

$$\varepsilon_0 = (W_{s0} - W_{\text{помехи}0})/W_{\text{АЧТ}}, \quad (2)$$

где W_{s0} – полная мощность теплового излучения образца, установленного нормально к линии визирования, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$; $W_{\text{помехи}0}$ – величина полной мощности излучения тепловой камеры, отраженного от поверхности исследуемого образца; $W_{\lambda\text{АЧТ}}$ – спектральная мощность теплового излучения модели АЧТ, регистрируемого в телесном угле $\Delta\Omega$.

Величины $W_{\text{помехи}\lambda}$ и $W_{\text{помехи}0}$ определяются в ходе калибровочных экспериментов, проводимых с пробными образцами по этой же методике.

Сравнение результатов, полученных двумя методами, показывает степень корректности установленных данных.

3. Результаты измерений

При определении нормальной излучательной способности методом измерения мощности теплового излучения в тепловую камеру устанавливались два металлических образца и модель АЧТ. Количество устанавливаемых образцов диктовалось размерами области с равномерным распределением температуры.

При каждой температуре проводилось измерение мощности теплового излучения (интегральной и спектральной) всех образцов и модели АЧТ. При этом измерения проводились не менее трех раз для каждой спектральной точки для каждого образца и модели АЧТ. Особое внимание обращалось на поддержание нужного состава атмосферы при исследовании образцов металлов. После эксперимента оценивалось состояние поверхности образцов.

На рис. 2 приведены данные по интегральному коэффициенту черноты для образцов стали 07Х25Н16АГ6Ф без покрытия и хромированных.

Измерения стальных образцов проводились до температуры 1400 °С. При больших температурах происходило размягчение образцов с изменением формы и последующее плавление.

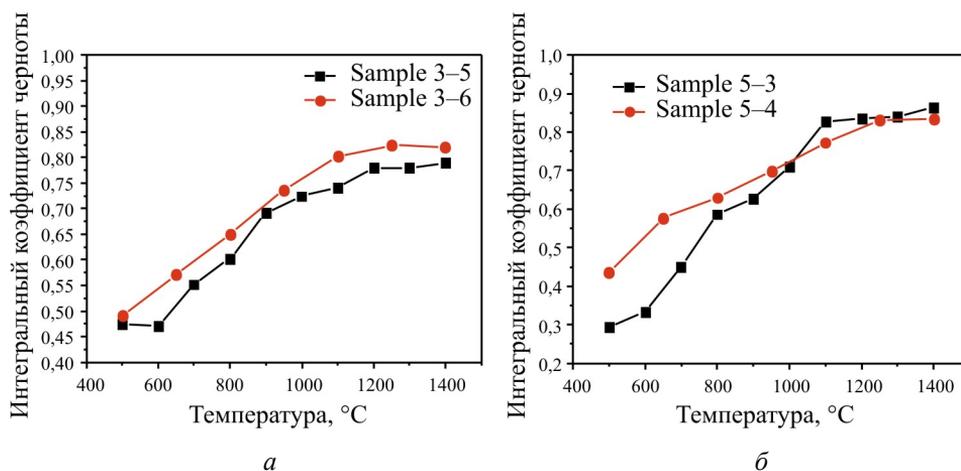


Рис. 2. Интегральный коэффициент черноты для образцов стали 07X25N16AG6F: *а* – без покрытия; *б* – с покрытием хромом

Видно, что интегральный коэффициент черноты хромированных стальных образцов стабильно меньше, чем в случае образцов без покрытия, вплоть до момента, когда происходит полное окисление поверхности и исчезновение хромирования (1300–1400 К). Далее излучательная способность стальных образцов определяется излучательной способностью окислов железа. Общий ход кривых температурной зависимости стали, величина полной нормальной излучательной способности и скорость окисления сходны с опубликованными ранее результатами (см., например, [1]). Столь быстрого окисления поверхности стальных образцов, как указано, например в [2] (20–30 мин до полного, устойчивого окисления поверхности при температуре около 1350 К), в нашем случае не наблюдалось. Это может быть связано с тем, что в нашей работе исследовалась именно жаропрочная сталь, устойчивая к окислению.

При этом характеристики поверхности образцов обоих типов одинаковы: микроцарапины имеют глубину до 0,2 мм и резкие края, среднее значение ширины царапин – 0,025 мм, среднее значение шага царапин – 0,265 мм.

Следует отметить, что при внешнем сходстве температурных зависимостей интегрального коэффициента черноты температурные зависимости спектральных коэффициентов черноты сильно отличаются (рис. 3).

Представленные результаты демонстрируют, что в средней ИК-области спектра все исследованные металлы демонстрируют монотонный

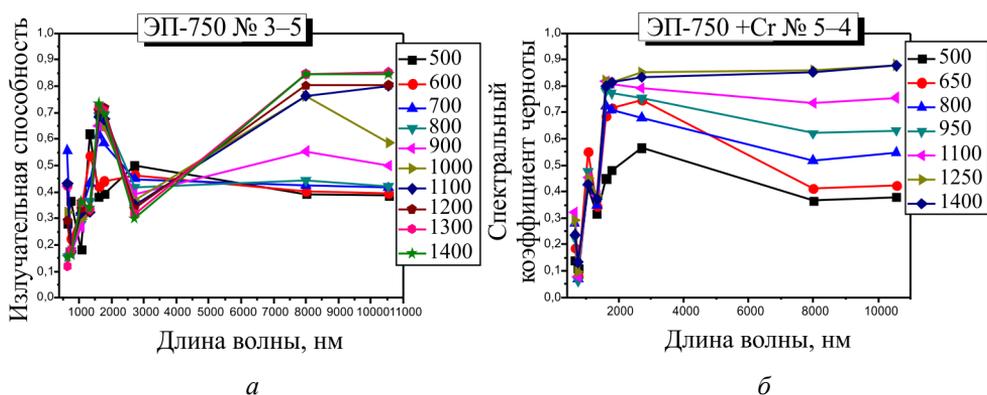


Рис. 3. Спектральный нормальный коэффициенты черноты для образцов сталь 07Х25Н16АГ6Ф: *а* – без покрытия; *б* – с покрытием Cr. Температура измерения указана в табличках справа от графиков

рост нормальной излучательной способности с повышением температуры. При этом излучательная способность хромированной стали, как и следовало ожидать, остается ниже соответствующих значений для стали без покрытия вплоть до момента полного окисления хромированного покрытия (около 1300 К, время достижения данной температуры около 5 ч). Измеренные значения излучательной способности стали и температурная зависимость до начала влияния окисления поверхности примерно соответствуют известным (см., например, [3, 4]). Точное сопоставление не представляется возможным как из-за разного состава исследованных образцов, так и из-за разного состояния их поверхности.

4. Выводы

Проведенные исследования показали, что нормальный интегральный коэффициент черноты хромированных стальных образцов стабильно меньше, чем в случае образцов без покрытия вплоть до момента, когда происходит полное окисление поверхности и исчезновение хромирования (1300–1400 К). При более высоких температурах интегральная излучательная способность стальных образцов определяется излучательной способностью окислов железа и достигает величины около 0,8.

Список литературы

1. Experimental Investigation of Emissivity of Steel / Y.F. Liu, Z.L. Hu, D.H. Shi, K. Yu // *Int. J. Thermophysics*. – 2013. – Vol. 34. – P. 496–506.
2. William R. Wade, Measurements of total hemispherical emissivity of various oxidized metals at high temperatures / National Advisory committee of aeronautics. – 1958. – Technical note 4206.
3. Chang-Da W. Study of Steel Emissivity Characteristics and Application of Multispectral Radiation Thermometry (MRT) // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2011. – Vol. 20 (2). – P. 289.
4. Таймаров М.А. Исследование излучательной способности конструкционных материалов и пылегазовых сред применительно к расчету теплообмена в котлах-утилизаторах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Казань, 1997. – 294 с.

References

1. Liu Y.F., Hu Z.L., Shi D.H., Yu K. Experimental Investigation of Emissivity of Steel. *Int. J. Thermophysics*, 2013, vol. 34, pp. 496-506.
2. William R. Wade, Measurements of total hemispherical emissivity of various oxidized metals at high temperatures. National Advisory committee of aeronautics. 1958. Technical note 4206.
3. Chang-Da W. Study of Steel Emissivity Characteristics and Application of Multispectral Radiation Thermometry (MRT). *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20 (2), 289 p.
4. Taimarov M.A. Issledovanie izluchatel'noi sposobnosti konstruktsionnykh materialov i pylegazovykh sred primenitel'no k raschetu teploobmena v kotlakh-utilizatorakh [The study emissivity of construction materials and dust environments in relation to the calculation of heat exchange in a waste heat boilers]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Kazan', 1997, 294 p.

Получено 16.10.2014

УДК 681.7.068: 621.375

А.В. Леонов¹, О.Е. Наний^{1, 2}, В.Н. Трещиков¹¹ ООО «Т8», Москва, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

УСИЛИТЕЛИ НА ОСНОВЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ

Представлен обзор истории разработки и применения ВКР-усилителей, включая распределенные, дискретные (или точечные) и гибридные ВКР-усилители. Рассмотрен принцип работы ВКР-усилителя, физические механизмы спонтанного комбинационного рассеяния света (КРС) и вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР). Приведены формулы для расчета коэффициента усиления слабого сигнала в процессе ВКР в телекоммуникационном волокне, а также коэффициента усиления с учетом насыщения. Приведена экспериментальная зависимость коэффициента комбинационного усиления материала от разности частот накачки и сигнала для кварцевого волокна. Рассмотрены схемы оптических систем связи с распределенными ВКР-усилителями с разными вариантами накачки, а также ВКР-усилители с полихроматической накачкой. В заключение проанализированы преимущества и недостатки применения ВКР-усилителей в системах связи.

Ключевые слова: ВКР-усилитель, рамановский усилитель, ON/OFF-усиление, двунаправленная накачка, многокаскадная накачка, полихроматическая накачка.

A.V. Leonov¹, O.E. Nanii^{1, 2}, V.N. Treshchikov¹¹ Company "T8", Moscow, Russian Federation² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

RAMAN AMPLIFIERS IN OPTICAL COMMUNICATION SYSTEMS

An overview of the history of development and application of Raman amplifiers is provided (including distributed, discrete and hybrid Raman amplifiers). The principle of Raman amplifier is discussed, as well as physical mechanisms of spontaneous Raman scattering (RS) and stimulated Raman scattering (SRS). The formulas are presented for calculating of the SRS small-signal gain in the telecommunication fiber, and for calculating of the SRS gain taking into account the saturation. The experimental dependence of the Raman gain of the material on the difference between the pumping frequency and signal frequency for quartz fiber is shown. Schemes of optical communication systems with distributed Raman amplifiers with different methods of pumping are discussed, as well as Raman amplifiers with polychromatic pumping. In conclusion, the advantages and drawbacks of implementation of the Raman amplifiers in communication systems are analyzed.

Keywords: Raman amplifier, ON-OFF gain, bidirectional pumping, multi-stage pumping, polychromatic pumping.

ВКР-усиление в оптическом волокне было впервые продемонстрировано в 1973 г. Столеном и Иппеном [1]. В ВКР-усилителях часть излучения накачки преобразуется в излучение на частоте сигнальной волны в результате когерентного процесса, который в отечественной научной литературе получил название вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), а в зарубежной литературе – вынужденного рамановского рассеяния (stimulated Raman scattering, SRS). Соответственно, в зарубежной литературе и технике связи ВКР-усилители называются рамановскими усилителями (Raman amplifier, RA).

В середине 1980-х гг. в литературе обсуждалась перспективность ВКР-усилителей для телекоммуникационных применений, но до практики дело так и не дошло – в определенной мере из-за появления в конце десятилетия высокоэффективных эрбиевых усилителей. В применявшихся тогда системах связи мощность световых сигналов не превышала нескольких милливатт, и эрбиевые усилители существенно превосходили ВКР-усилители по эффективности накачки, а главное – они могли работать с маломощными полупроводниковыми лазерами накачки.

В конце 1990-х гг. интерес к ВКР-усилителям возродился вновь. Это было связано в первую очередь с потребностью в увеличении скорости передачи информации по линиям дальней и сверхдальней связи. Для этого нужны усилители, способные работать во всех спектральных областях, включая область 1300 нм и S-область, открывшуюся в связи с созданием волокон без водородного пика поглощения. ВКР-усилители благодаря широкой полосе усиления и отсутствию привязки к длине волны удовлетворяют этим требованиям. Так, были продемонстрированы полосы усиления шириной до 100 нм [2–4], причем во всем окне прозрачности от 1300 до 1650 нм.

ВКР-усилители могут быть распределенными, дискретными (или точечными) и гибридными [3, 5]. Они могут использоваться либо совместно с эрбиевыми усилителями, либо без них. Интерес к ВКР-усилителям стимулируется развитием технологии спектрального мультиплексирования [6].

Кроме того, в ВКР-усилителях на одном участке волокна можно комбинировать усиление и компенсацию дисперсии [3, 5]. На выходе волокна, компенсирующего дисперсию, усиление превышает потери, благодаря чему растет энергетический запас системы и появляется возможность включать в систему другие элементы, такие как мультиплексоры ввода-вывода (OADM, optical add-drop multiplexers).

Распределенный ВКР-усилитель – это усилитель, в котором в качестве среды усиления выступает само телекоммуникационное волокно. Применение распределенных ВКР-усилителей в волоконно-оптических линиях связи снижает шумы и нелинейные искажения, благодаря чему можно использовать более длинные участки волокна, более высокую скорость передачи, меньшие промежутки между каналами, а также приблизить рабочий диапазон к длине волны нулевой дисперсии.

Множество экспериментов продемонстрировали достоинства распределенных ВКР-усилителей [7–14]. Среди них эксперименты на подводных линиях без использования повторителей [9], демонстрация наземных и подводных систем связи с высокой пропускной способностью [10–12], одноканальных систем из небольших участков со скоростью передачи 320 Гбит/с [13] и солитонных систем [14].

Несмотря на сравнительно долгую историю исследования распределенных ВКР-усилителей, только недавно предложено применять многокаскадную систему накачки. Такая накачка в еще большей степени снижает нежелательные изменения мощности сигнала вдоль оптического волокна [8, 15–19]. Таким образом, ВКР-усилители не только стали неотъемлемой частью современных систем дальней и сверхдальней связи, но и сохраняют потенциал дальнейшего развития.

1. Принцип работы ВКР-усилителя

Комбинационное рассеяние – результат взаимодействия в нелинейной среде между световым излучением и флуктуациями поляризации среды, вызванными колебаниями заряженных частиц. Такое взаимодействие приводит к обмену энергией между световой волной и средой и к возникновению или усилению рассеянных световых волн. Если интенсивность световой волны невелика, то ее влиянием на колебания среды можно пренебречь. В этом случае рассеяние происходит на хаотических тепловых колебаниях заряженных частиц, и данное явление называется спонтанным комбинационным рассеянием света (КРС).

В кварцевом волокне тепловые колебания ионов Si и O на частоте Ω_{AK} приводят к модуляции поляризации среды на комбинациях частот, равных $\omega \pm \Omega_{AK}$, где ω – частота световой волны накачки. Вследствие этого возникает излучение на комбинационных частотах $\omega - \Omega_{AK}$ (стоксова компонента) и $\omega + \Omega_{AK}$ (антистоксова компонента). На языке энергии фотонов стоксова компонента соответствует рассеянию с по-

терей энергии фотонами, а антистоксова компонента – рассеянию с ростом энергии фотонов.

Сдвиги стоксовой и антистоксовой компонент по длине волны различаются и зависят от длины волны накачки. В кварцевых волокнах КРС вызывает сдвиг частоты сигнала на величину примерно ± 13 ТГц от частоты волны накачки, что соответствует сдвигу длины волны примерно на -90 и $+85$ нм для накачки на длине волны 1480 нм.

При вынужденном комбинационном рассеянии (ВКР) в оптическом волокне падающая электромагнитная волна достаточно большой мощности (волна накачки), взаимодействуя с сигнальной волной, когерентно возбуждает колебательную моду молекулы кварца (SiO_2). В процессе распространения по волокну энергия излучения накачки преобразуется в энергию упругих колебаний молекул среды и в энергию сигнальной волны. Сигнальная волна, наоборот, усиливается за счет энергии волны накачки (рис. 1, 2).

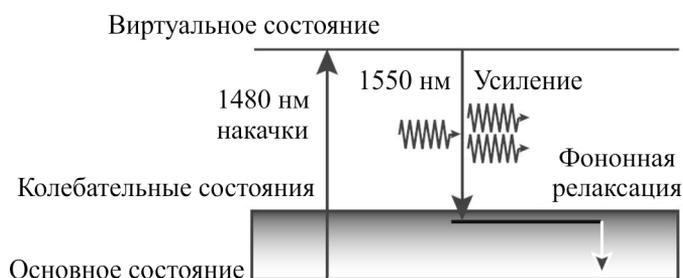


Рис. 1. Механизм ВКР

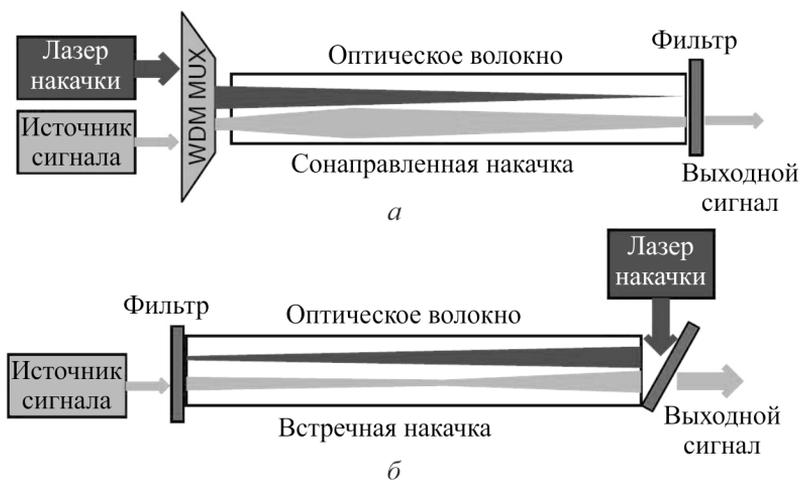


Рис. 2. Оптические схемы ВКР-усилителей с сонаправленной (а) и встречной (б) накачками

2. Коэффициент усиления слабого сигнала ВКР-усилителем (ON/OFF-усиление)

Коэффициент усиления слабого сигнала в процессе ВКР в телекоммуникационном волокне определяют следующим выражением:

$$G_R(\lambda, L) \equiv \frac{P_S(L)}{P_S(0) \exp(-\alpha_S L)} = \exp \int_0^L g_R(\lambda) k_{\text{pol}} P_P(z) dz, \quad (1)$$

где $P_P(z)$ – зависимость мощности накачки от координаты вдоль оси усилителя; $P_S(0)$ – мощность сигнала на входе в усилитель; $P_S(L)$ – мощность сигнала на выходе из усилителя; $g_R(\lambda)$ – коэффициент комбинационного усиления, зависящий от характеристик волокна; k_{pol} – коэффициент, зависящий от поляризации сигнала и накачки ($k_{\text{pol}} = 1$ при совпадающих поляризациях и $k_{\text{pol}} = 0,5$ для полностью деполяризованной накачки; для ортогональных поляризаций $k_{\text{pol}} \ll 1$).

Поскольку $G_R(\lambda, L)$ – это отношение мощности сигнала на выходе волокна при включенном усилителе к мощности сигнала на выходе при выключенном ВКР-усилителе, его называют ON/OFF-усилением.

Подставим значение для $P_P(z) = \exp(-\alpha_P z) P_{0P}$ в формулу (1):

$$\begin{aligned} G_R(\lambda, L) &= \exp \int_0^L g_R k_{\text{pol}} P_P(z) dz = \\ &= \exp(g_R k_{\text{pol}} \exp \int_0^L P_{0P} \exp(-\alpha_P z) dz) = \exp(g_R k_{\text{pol}} P_{0P} L_{\text{eff}}), \end{aligned}$$

где

$$L_{\text{eff}} = \int_0^L \exp(-\alpha_P z) dz = \frac{1 - \exp(-\alpha_P L)}{\alpha_P}. \quad (2)$$

Итоговая короткая формула для коэффициента ON/OFF-усиления слабого сигнала:

$$G_{R,\text{ON/OFF}} = \exp(g_R k_{\text{pol}} P_{0P} L_{\text{eff}}). \quad (3)$$

Коэффициент комбинационного усиления волокна g_R может быть связан с эффективностью комбинационного усиления материала g_M и эффективной площадью сечения волокна A_{eff} :

$$g_R = g_M / A_{\text{eff}}. \quad (4)$$

Экспериментальная зависимость коэффициента комбинационного усиления материала g_M^{ref} на референсной длине волны накачки $\lambda_{\text{ref}} = 1$ мкм от разности частот накачки и сигнала для кварцевого волокна приведена на рис. 3 [20]. Максимум коэффициента усиления достигается на частоте, смещенной относительно частоты накачки примерно на 13 ТГц. Форма кривой не зависит от длины волны накачки, а эффективность комбинационного усиления материала g_M на другой длине волн накачки λ_p связана с g_M^{ref} следующим выражением:

$$g_M = g_M^{\text{ref}} \frac{\lambda_{\text{ref}}}{\lambda_p} = g_M^{\text{ref}} \frac{v_p}{v_{\text{ref}}}. \quad (5)$$

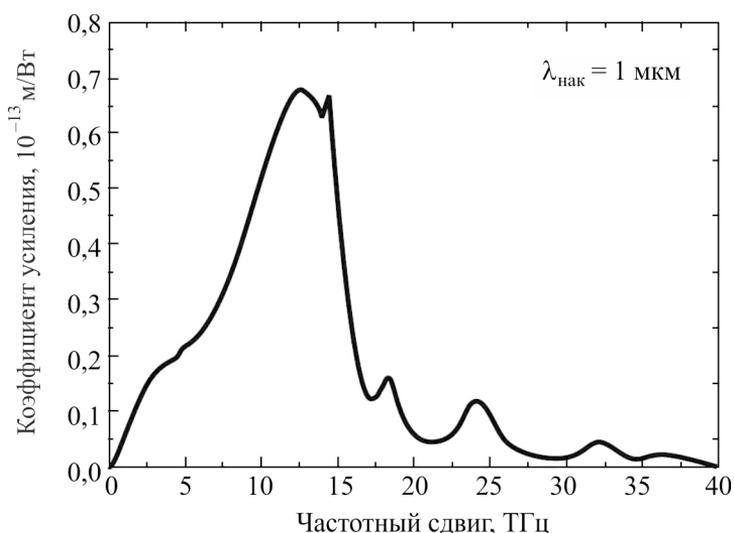


Рис. 3. Спектр ВКР-усиления. Экспериментальная зависимость коэффициента комбинационного усиления материала g_M^{ref} на референсной длине волны накачки $\lambda_{\text{ref}} = 1$ мкм от разности частот накачки и сигнала для кварцевого волокна [20]

Строго говоря, выражения (4) и (5) можно применять только для волокон одинакового состава (такого же, как у волокон, использованных в работе [20]). В общем случае форма спектра усиления и материальный коэффициент могут отличаться, например, из-за разной концентрации германия и/или других примесей. Результаты экспериментальных измерений спектров ВКР-усиления в разных типах волокон приведены на рис. 4 [21].

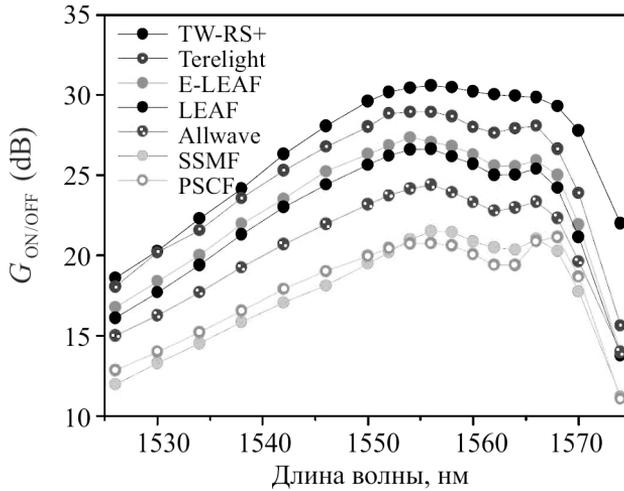


Рис. 4. Экспериментальные спектры ВКР-усиления $G_{R,ON/OFF}$ в 100 км волокна разных типов при мощности накачки 700 мВт на 1455 нм; мощность входного сигнала 1 мВт [21]

Коэффициент усиления в волокнах G.655 выше, чем в волокнах G.652 и G.654, из-за меньшего размера модового пятна (эффективной площади) и более высокой концентрации примеси GeO_2 в сердцевине [22, 23]. Наличие германия изменяет также форму спектра усиления, в частности сглаживается провал на длине волны 1562 нм (рис. 4).

Различные физические параметры волокон для длины волны сигнала 1555 нм и длины волны накачки 1455 нм приведены в таблице.

Параметры волокна при длине волны сигнала 1555 нм

Тип волокна	$A_{eff,2}$, мкм ²	D , пс/нм/км	α_p , дБ/км	$G_{R,ON/OFF}$, дБ	P_{OP} , мВт	$OSNR_{DRS}$, дБ	k_R , $10^{-8} м^{-1}$
Truewave-RS TM	55	4,4	0,25	21	383	40,0	8,0
TeraLight TM	65	8	0,27	21	502	39,0	8,6
E-LEAF	72	4,3	0,25	21	510	39,6	8,3
LEAF TM	72	3,8	0,25	21	518	40,3	7,6
Allwave TM	80	17	0,24	20	582	41,5	7,2
SSMF	80	17	0,25	20	633	43,0	6,0
PSCF	80	20	0,22	18	620	46,4	4,9

Здесь A_{eff} – эффективная площадь сечения волокна; D – дисперсия; α_p – затухание на длине волны накачки; $G_{R,ON/OFF}$ – коэффициент

ВКР-усиления (ON/OFF); P_{0P} – мощность накачки; $OSNR_{DRS}$ – отношение мощности сигнала к мощности двойного релеевского рассеяния; k_R – коэффициент релеевского рассеяния.

3. Коэффициент усиления с учетом насыщения

В общем случае, когда влиянием усиливаемого сигнала на накачку пренебрегать нельзя, необходимо описывать одновременно эволюцию сигнала и накачки с помощью следующей системы связанных уравнений:

$$\frac{dP_S}{dz} = -\alpha_S P_S + g_R k_{\text{pol}} P_P P_S, \quad (6)$$

$$\frac{dP_P}{dz} = -\alpha_P P_P - \frac{v_P}{v_S} g_R k_{\text{pol}} P_P P_S, \quad (7)$$

где P_P, P_S – средние мощности сигнальной (стоксовой) волны и волны накачки.

Система уравнений (6), (7) может быть решена аналитически, если пренебречь истощением мощности излучения накачки. Это решение корректно только для случая, когда P_S относительно невелика и длина взаимодействия относительно мала. Предполагая, что излучение накачки не истощается, для мощности излучения накачки имеем:

$$P_P(z) = P_P(0) \exp(-\alpha_P z). \quad (8)$$

Подставляя (8) в уравнение (6), легко получить выражение (1).

В общем случае необходимо решать уравнения (6), (7) численно.

4. Распределенные ВКР-усилители

В распределенном ВКР-усилителе усиление сигнала происходит в самом телекоммуникационном волокне, используемом для передачи информации. Слабое поглощение света на длине волны накачки обеспечивает проникновение накачки на большую глубину, т.е. усиление оказывается распределенным вдоль волокна [7–19]. В этом случае удастся достичь более равномерного распределения мощности сигнала вдоль направления распространения, при этом энергия сигнала не опускается до уровня шумовых компонент и в то же время не достигает уровня энергии, при котором становятся существенными нелиней-

ные искажения сигналов вследствие как самовоздействия, так и кросс-взаимодействия между различными спектральными каналами.

Свойство распреденности ВКР-усиления позволяет существенно увеличить отношение сигнал/шум при усилении сигнала в волоконных линиях связи. По сравнению с усилителями точечного типа применение распреденных усилителей оптического сигнала обеспечивает восстановление уровня сигнала на более ранних участках линии связи (рис. 5). Это позволяет одновременно увеличить и отношение сигнал/шум, и протяженность оптических линий связи.

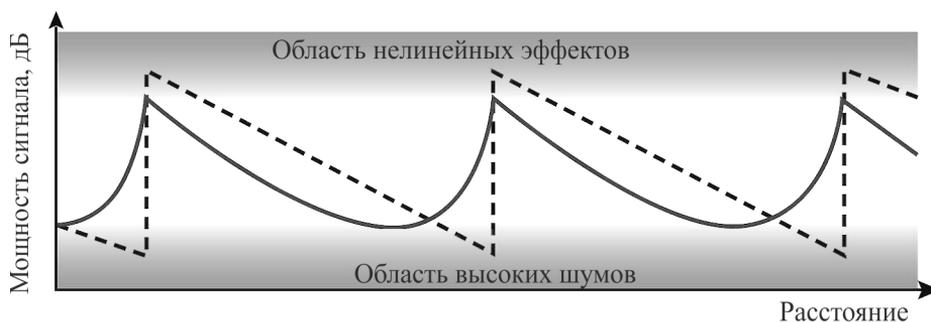


Рис. 5. Эволюция мощности оптического сигнала в волоконной линии связи при использовании распреденного (сплошная кривая) и точечного (пунктир) усилителя сигнала. Восстановление сигнала начинается на более ранних участках линии связи, а колебания мощности вдоль линии снижаются [3]

Интуитивно понятно, а также подтверждено экспериментально и теоретически, что чем более равномерно распредена мощность сигнала вдоль линии, тем большее отношение сигнал/шум достигается на приемнике. Применение двунаправленной накачки путем объединения сонаправленной и встречной накачек обеспечивает более равномерное распределение мощности сигнала вдоль волокна. Схема двунаправленной накачки показана на рис. 6.

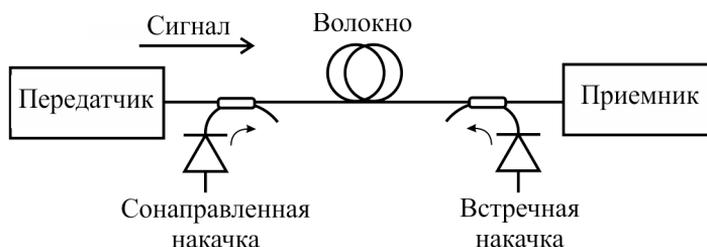


Рис. 6. Схема оптической системы связи с распреденным ВКР-усилителем, использующим двунаправленную накачку

Пример эволюции мощности сигнала при двунаправленной накачке приведен на рис. 7 (кривая 4). В данном примере мощности накачек, вводимых с двух сторон волокна, были равны. Шум-фактор усилительного участка при двунаправленной накачке был улучшен на 4 дБ по сравнению со случаем лишь встречной накачки.

В еще большей степени сгладить распределение мощности сигнала вдоль линии связи позволяет более сложная двухкаскадная схема накачки, рис. 7. В двухкаскадном ВКР-усилителе излучение накачки первого каскада, которое и усиливает сигнал, само усиливается излучением накачки второго каскада. При использовании встречной двухкаскадной накачки (рис. 8, а) в линии связи длиной 80 км шум-фактор уменьшается на 14 дБ по сравнению со случаем эрбиевого усилителя в конце линии связи [16].

Наибольшей равномерности сигнала вдоль волокна можно достигнуть при объединении двух идей: 1) двусторонняя накачка; 2) накачка высокого порядка.

При двунаправленной двухкаскадной накачке (рис. 8, б) можно получить практически равномерное распределение мощности сигнала

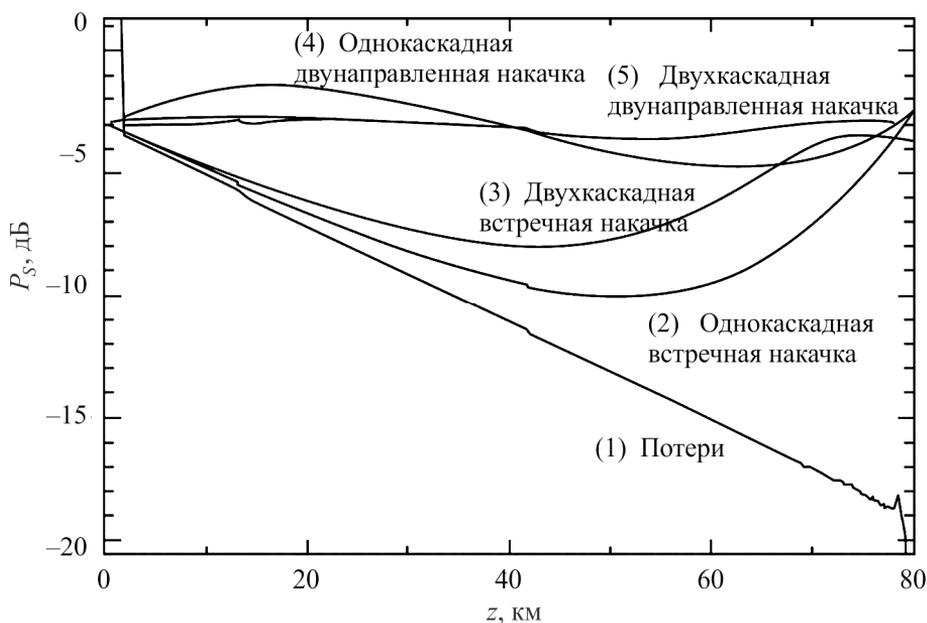


Рис. 7. Результаты экспериментального измерения эволюции мощности сигнала вдоль оптической линии связи длиной 80 км при использовании различных схем накачки [18]

вдоль линии связи на участках длиной до 80 км (см. рис. 7). В этом случае необходимо использовать минимум четыре источника накачки – по два с каждой стороны линии связи. Две первичные волны накачки вводятся в волокно на длине волны 1365 нм, вдоль распространения сигнала и навстречу ему. Энергия первичных фотонов передается вторичной волне на длине волны 1455 нм. На этой длине волны (1455 нм) в начале и в конце волокна используются отражающие брэгговские решетки, которые играют роль зеркал, запирая эти фотоны. Поэтому, когда вторичная волна передает свою энергию сигналу, усиление получается равномерным по длине волокна.

Исследования, проведенные в работе [17], показали, что трехкаскадная встречная накачка позволяет еще несколько улучшить характеристики линии связи, однако ценой введения мощной (3 Вт) накачки на длине волны третьего каскада накачки (в цитируемой работе 1276 нм). Третий каскад сдвинут на 13 ТГц относительно второго каскада или на 39 ТГц относительно сигнала.

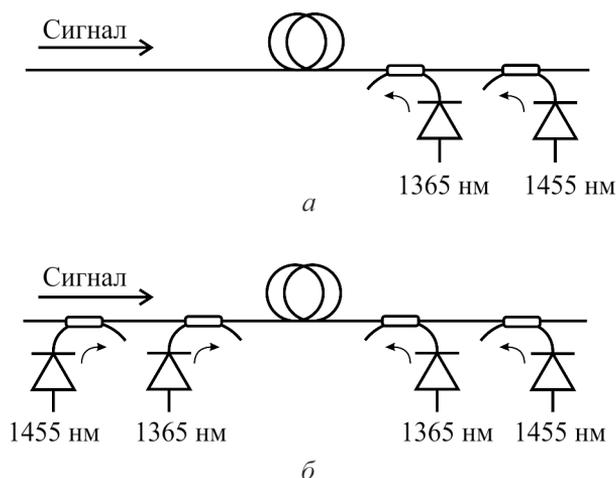


Рис. 8. Схемы оптической системы связи с распределенным ВКР-услителем, использующим двухкаскадную накачку:
а – встречную; *б* – двунаправленную

Интересный вариант двухкаскадной накачки рассмотрен в работах [24, 25]. Для усиления сигнала используется сверхдлинный (длиной около 50 км) лазер, накачиваемый излучением накачки второго каскада. Такая схема позволяет создать передающую оптоволоконную среду, в которой сигнал распространяется практически без затухания.

Схема распределенного усилителя на основе лазерного преобразования излучения второго каскада приведена на рис. 9.

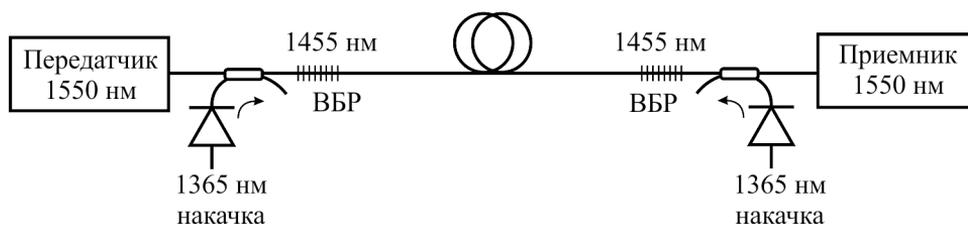


Рис. 9. Модифицированная схема рамановского усилителя

Предложенная схема позволяет повысить энергоэффективность сверхдлинного рамановского усилителя с сохранением высокого качества сигнала при передаче на большие расстояния. В работе [25] выполнено теоретическое исследование новой схемы распределенного рамановского усилителя с двумя каскадами ВКР-преобразования излучения. С помощью математического моделирования показана возможность уменьшения энергозатрат в такой системе свыше 50 % при сохранении высокого качества передачи сигнала. Картина изменения мощности сигнала в телекоммуникационном волокне, в котором созданы условия лазерной генерации на длине волны накачки (1455 нм), приведена на рис. 10.

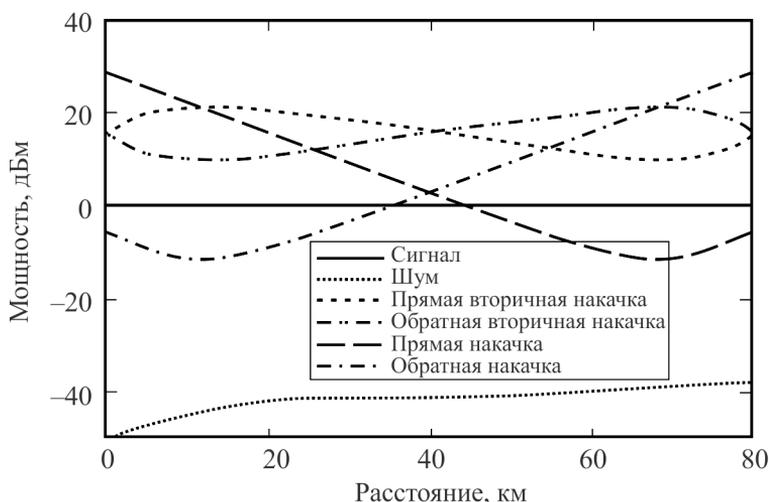


Рис. 10. Изменение мощности сигнала в телекоммуникационном волокне, в котором созданы условия лазерной генерации на длине волны накачки (1455 нм)

В работе [15] исследована оптимальная спектральная область работы линий связи с одно- и двухкаскадными ВКР-усилителями. Установлено, что оптимальная длина волны для передачи сигнала сдвинута в длинноволновую область относительно минимума затухания сигнала.

5. ВКР-усилители с полихроматической накачкой

Характерная ширина полосы ВКР-усиления, которую обеспечивает один монохроматический источник излучения накачки, составляет около 5 нм. Для расширения спектральной полосы усиления и одновременного сглаживания неравномерности контура ВКР-усиления в заданной области требуется комбинированная накачка на нескольких длинах волн с соответствующими мощностями излучения [26–31].

Одна из первых реализаций ВКР-усилителя с накачкой набором узкополосных источников излучения была представлена в работе [26]. Проведена оптимизация спектра усиления 25-километрового ВКР-усилителя с накачкой 12 диодными лазерами в диапазоне длин волн 1412,5–1504,5 нм. В результате достигнута неравномерность контура усиления, не превышающая 0,1 дБ в спектральной полосе 80 нм (1527–1607), при этом среднее значение усиления слабого сигнала составило 10,5 дБ. В результате контур усиления, перекрывающий два основных коммуникационных диапазона и неравномерность контура, в перспективе позволяет использовать данный ВКР-усилитель для многоканальной передачи оптического сигнала на относительно большие расстояния.

Следует отметить, что теоретическое предсказание и оптимизация ВКР-усиления затруднены для случая относительно большого числа независимых источников накачки. Результат ВКР-усиления не является простой суперпозицией стоксовых компонент, поскольку спектральные компоненты накачки оказывают взаимное влияние друг на друга при распространении по волокну. Влияние взаимодействия компонент накачки иллюстрируют рис. 11 и 12. Как видно из рис. 11, реальное ВКР-усиление распределенного усилителя превышает сумму индивидуальных коэффициентов усиления от монохроматических компонент накачки в длинноволновой области и, наоборот, меньше в коротковолновой области. Причина этого эффекта в том, что коротковолновые компоненты накачки усиливают длинноволновые компоненты, а сами при этом истощаются. Эволюция мощности компонент накачки вдоль волокна показана на рис. 12. На входе в волокно пять спектральных компонент имеют равные

мощности (по 100 мВт). Длинноволновая компонента (1495 нм) на первом этапе усиливается благодаря ВКР-взаимодействию с более коротковолновыми компонентами.

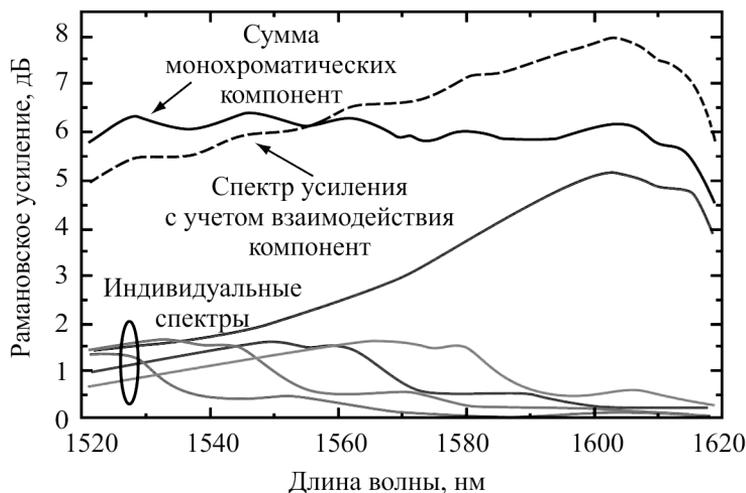


Рис. 11. Спектр ВКР-усиления распределенного усилителя с полихроматической накачкой. Для сравнения приведены спектральная кривая – сумма спектров составляющих монохроматических компонент – и индивидуальные спектры компонент (индивидуальные спектры получены для монохроматических накачек)

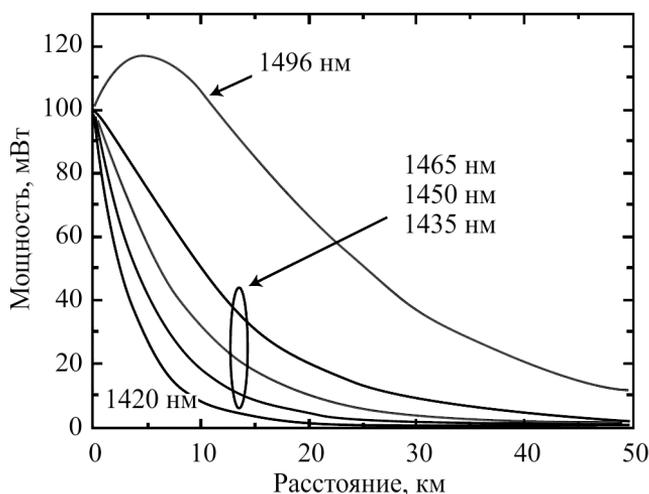


Рис. 12. Результаты численного моделирования распространения спектральных компонент накачки вдоль волокна

Расширение спектральной полосы ВКР-усиления одновременно с минимизацией неравномерности контура усиления внутри этой полосы и увеличением расстояния передачи оптического сигнала за счет применения схем полихроматической накачки узкополосными источниками излучения – не единственный путь для создания высокоэффективных ВКР-усилителей оптического сигнала. Ведется интенсивный поиск альтернативных схем накачки ВКР-усилителей, способных уменьшить количество источников излучения накачки при сохранении необходимых параметров ВКР-усиления. Это возможно при использовании широкополосных источников накачки. В данном случае спектр усиления ВКР-усилителя в первом приближении является сверткой спектра ВКР-усиления волокна со спектром источника накачки.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны алгоритмы численных расчетов, позволяющие достаточно точно моделировать характеристики ВКР-усилителей с полихроматической накачкой¹.

6. Преимущества и недостатки ВКР-усилителей

ВКР-усилители перспективны в силу следующих принципиальных преимуществ:

1. ВКР-усиление существует в волокнах любого типа, поэтому активной средой усилителя может быть волокно для передачи оптического сигнала либо используемое в компенсаторах дисперсии.

2. Усиление не привязано к резонансным спектрам примесей и может быть получено практически на любой длине волны в области прозрачности (для кварца диапазон прозрачности составляет примерно от 0,3 до 2 мкм) при наличии источника в нужном спектральном диапазоне.

3. Спектр усиления зависит от спектра накачки, поэтому подбор формы спектра полихроматичной накачки позволяет формировать очень широкую (более 100 нм) полосу усиления с низкой неравномерностью контура усиления.

4. Низкий уровень шумов и распределенность усиления при встречной накачке, когда излучение накачки распространяется навстречу сигналу.

Однако ряд недостатков ВКР-усилителей на первом этапе препятствовал их практическому применению. Самый существенный недоста-

¹ Материалы сайтов www.vpiphotonics.com, www.rsoftdesign.com.

ток – относительно низкая эффективность накачки по сравнению с эрбиевыми усилителями (EDFA) для сигналов малой мощности. Вторым недостатком состоит в том, что для ВКР-усиления требуются длинные отрезки волокна. Но этот недостаток может стать преимуществом, если ВКР-усилитель совмещен с передающим телекоммуникационным волокном или с волоконным компенсатором дисперсии. Третий недостаток ВКР-усилителей связан с их быстрым временным откликом, приводящим к трансформации шумов накачки в шумы усиливаемого сигнала. Четвертый недостаток – наличие избыточных шумов, связанных с двойным рэлеевским рассеянием (DRS). И наконец, пятый недостаток связан с наличием нелинейных искажений в ВКР-усилителе при усилении сигналов множества каналов WDM.

Относительно невысокая эффективность усиления приводит к необходимости использовать довольно мощную непрерывную накачку (~1 Вт), чтобы получить усиление около 30 дБ (типичная величина для систем оптической связи). Поэтому особенно сильным препятствием к внедрению ВКР-усилителей на первом этапе стало отсутствие достаточно мощных полупроводниковых источников накачки. Позднее их практическое использование стало возможным благодаря следующим техническим достижениям:

- ◆ разработка мощных малощумящих полупроводниковых лазеров накачки, а также высокоэффективных волоконных ВКР-лазеров, генерирующих практически на любой длине волны в диапазоне 1,2–1,5 мкм;
- ◆ создание волокон с высоким значением ВКР-усиления благодаря большому содержанию германия;
- ◆ создание доступных волоконных компонентов (брэгговские решетки, волоконные разветвители/соединители, спектральные мультиплексоры и др.);
- ◆ широкое внедрение многоканальных систем связи со спектральным уплотнением (систем WDM).

Особенно перспективно использование ВКР-усилителей в системах дальней связи с плотным спектральным мультиплексированием (DWDM). Такие усилители особенно хороши тем, что позволяют получить широкополосное усиление практически в любом спектральном диапазоне. Они могут использоваться либо как предусилители в комбинации с эрбиевыми усилителями, либо самостоятельно.

В то же время, поскольку с увеличением числа спектральных каналов в системах WDM растет суммарная мощность передаваемых сиг-

налов, в системах с большим числом каналов эффективность ВКР-усилителей может оказаться не только не меньше, но даже больше, чем у традиционно используемых эрбиевых усилителей. Так, при суммарной мощности усиливаемого сигнала 20 мВт и коэффициенте усиления 25 дБ эффективность использования мощности накачки ВКР-усилителем становится больше, чем у эрбиевого усилителя [3].

7. Использование ВКР-усилителей в сверхдлинных однопролетных линиях

Одна из областей, где ярко проявляются преимущества ВКР-усилителей, – это сверхдлинные однопролетные линии связи, работающие без использования активных элементов вне конечных узлов. Такие линии могут использоваться для соединения островов, создания отводов от подводных магистральных линий связи, соединения нефтегазодобывающих скважин с материком. Для многих российских регионов актуальна разработка однопролетных линий связи со сверхдлинными пролетами (от 300 до 500 км) для прокладки по малонаселенной и труднодоступной территории, когда построение промежуточных усилительных или регенерационных пунктов невозможно или экономически нецелесообразно.

Для достижения максимальной дальности передачи необходимо использовать волокно с минимальным затуханием и оптимальное сочетание распределенных усилителей с удаленно накачиваемыми усилителями, причем рекордная дальность достигается при использовании дополнительных волокон для накачки ROPA.

Для экспериментальной проверки возможностей передачи DWDM-сигналов с канальной скоростью 100 Гбит/с в сверхдлинных однопролетных линиях связи была собрана установка, схема которой приведена на рис. 13 [32]. Максимальное число DWDM-каналов в ней равно 8, канальная скорость передачи информации 100 Гбит/с, битовая скорость с учетом FEC 120 Гбит/с, длина линии 502 км. Тестирование работоспособности сверхдлинной линии проводилось при одновременной передаче 100G трафика на 8 DWDM-каналах с 22 по 28 (несущие частоты от 192,2 до 192,8 ТГц с шагом 100 ГГц). Линия стабильно работала в течение 12 ч. Данный результат является текущим рекордом дальности для канальной скорости 100 Гбит/с и суммарной скорости передачи данных в однопролетной линии [32].

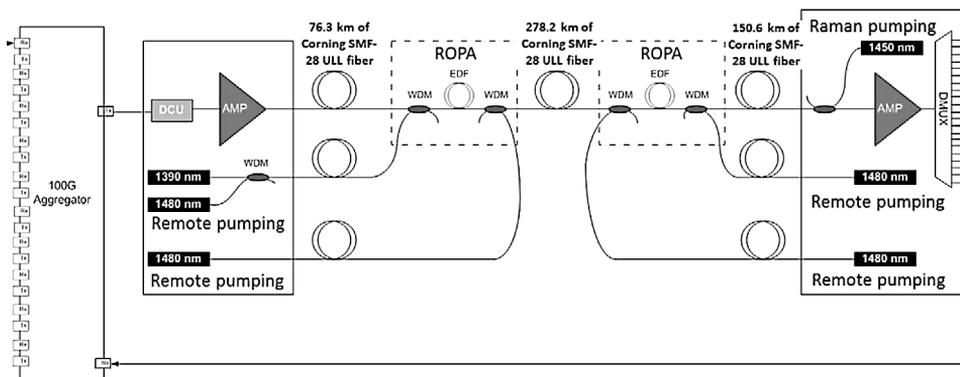


Рис. 13. Схема сверхдлинной однопролетной линии связи с рекордной дальностью передачи: DCU – настраиваемый модуль компенсации дисперсии; AMP – оптический усилитель; ROPA – оптический усилитель с удаленной накачкой; EDF – волокно, легированное эрбием; DMUX – демультиплексор [32]

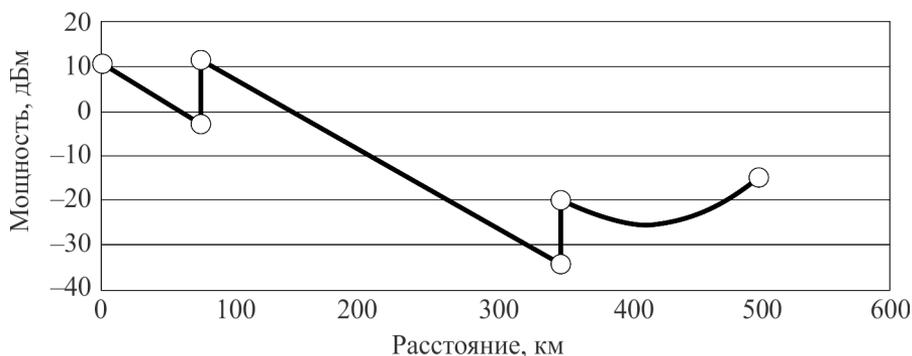


Рис. 14. Зависимость мощности сигнала от расстояния (кружки – экспериментально измеренные значения; линия – теоретический расчет) [32]

В реализованной схеме важную роль играет распределенный ВКР-усилитель, накачка которого осуществляется со стороны приемника. Именно ВКР-усиление со стороны приемника позволило достичь рекордной дальности передачи. На рис. 14 приведен график зависимости мощности сигнала от расстояния, на котором хорошо виден вклад ВКР-усиления на участке 350–500 км от начала линии.

Список литературы

1. Stolen R.H., Ippen E.P. Raman gain in glass optical waveguides // *Applied Physics Letters*. – 1973. – Vol. 22, № 6. – P. 276–278.
2. Gapontsev D.V., Chernikov S.V., Taylor J.R. Fibre Raman amplifiers for operation at 1,3 μm // *Optics Communications*. – 1999. – Vol. 166. – P. 85–88.
3. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications // *IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 8, № 3. – P. 548–559.
4. Pump interactions in 100 nm bandwidth Raman amplifier / H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, E. Rabarijaona // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1999. – Vol. 11, № 5. – P. 530–532.
5. Raman amplification in fiber optical communication systems / Ed. by H. Clifford, Govind P. Agrawal. – Elsevier Academic Press, 2005. – 374 p.
6. Наний О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) // *Lightwave Russian Edition*. – 2004. – № 2. – С. 47–52.
7. Bromage J. Raman amplification for fiber communication systems // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2004. – Vol. 22, no.1. – P. 79–93.
8. Турицын С.К. Распределенное усиление с использованием сверхдлинных волоконных лазеров: передающая среда с незатухающим сигналом // *Lightwave Russian Edition*. – 2007. – № 2. – С. 8–10.
9. 442 km repeaterless transmission in a 10 Gbit/s system experiment / P.B. Hansen, L. Eskildsen, S.G. Grubb [et al.] // *Electronics Letters*. – 1996. – Vol. 32, no.11. – P. 1018–1019.
10. 3.28Tb/s transmission over 3 \times 100 km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification / T.N. Nielsen, A.J. Stentz, K. Rottwitt [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2000. – Vol. 12, no. 8. – P. 1079–1081.
11. 3.2Tb/s (80 \times 42,7Gb/s) transmission over 20 \times 100 km of non-zero dispersion fiber with simultaneous C + L-band dispersion compensation / B. Zhu, L. Leng, L.E. Nelson [et al.] // *Proc. OFS 2002. Postdeadline paper FC8*. – 2002. – P. FC8-1–FC8-3.
12. 100 Gb/s (10 \times 10Gb/s) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification / M. Nissov, C.R. Davidson, K. Rottwitt [et al.] // *Proc. of IOOC – ECOC'1997*. – Edinburgh, Scotland, 1997. – P. 9–12.

13. 320-Gb/s single-channel pseudolinear transmission over 200 km of nonzero-dispersion fiber / B. Mikkelsen, G. Raybon, R.-J. Essiambre [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2000. – Vol. 12, no. 10. – P. 1400–1402.

14. Comparison of Return-to-Zero Differential Phase- Shift Keying and On-Off Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission / C. Xu, X. Liu, L.F. Mollenauer, X. Wei // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2003. – Vol. 15. – P. 617–619.

15. Казанцева Н.А., Наний О.Е. Оптимальная спектральная область работы ВОЛС с одно- и двухкаскадным рамановским усилителем // *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика, астрономия*. – 2004. – Т. 45, № 5. – С. 70–71.

16. Transparent 80 km bi-directionally pumped distributed Raman amplifier with second-order pumping / K. Rottwitt, A. Stentz, T. Nielson [et al.] // *Proc of ECOC'1999*. – Nice, France, 1999. – P. 144–145.

17. Papernyi S.B., Karpov V.J., Clements W.R.L. Third-order cascaded Raman amplification // *Proc. OFS'2002*. – Anaheim, CA. 2002. Postdeadline paper FB4.

18. Bouteiller J.-C., Brar K., Headley C. Quasiconstant signal power transmission // *Proc. of ECOC'2002*. – Copenhagen, Denmark, 2002. Paper S3.04.

19. Analysis of bidirectional and second order pumping in long-haul systems with distributed Raman amplification / C. Martinelli [et al.] // *Proc. of ECOC'2002*. – Copenhagen, Denmark, 2002. Paper P3.30.

20. Raman response function of silica core fibers / R.H. Stolen, J.P. Gordon, W.J. Tomlinson [et al.] // *Journal of Optical Society of America B*. – 1989. – Vol. 6, no. 6. – P. 1159–1166.

21. Full characterization of modern transmission fibers for Raman amplified-based communication systems / S. Jiang, B. Bristiel, Y. Jaouën [et al.] // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, no. 8. – P. 4883–4892.

22. An analysis of the improvement in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibers / C.R.S. Fludger, A. Maroney, N. Jolley, R. Mears // *Proc. OFC'2000*. – Baltimore, OSA, FF2, 2000. – P. 100–102.

23. Bromage J., Rottwitt K., Lines M.E. A method to predict the Raman gain spectra of Germanosilicate fibers with arbitrary index profiles // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2002. – Vol. 14, no. 1. – P. 24–26.

24. Ultralong Raman fiber lasers as virtually lossless optical media / J.D. Ania-Castanon [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2006. – Vol. 96. – P. 023902–023905.

25. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Harper P., Turitsyn S.K. Hybrid gain-flattened and reduced power excursion scheme for distributed Raman amplification // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, no. 24. – P. 29140–29144.

26. Emory Y., Tanaka K., Namiki S. 100-nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength channel WDM laser diode unit // *Electronics Letters*. – 1999. – Vol. 35. – P. 1355–1356.

27. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier / H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1999. – Vol. 11, no. 5. – P. 530–532.

28. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward pumped Raman amplifier / X. Zhou, C. Lu, P. Shum, T.H. Cheng // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2001. – Vol. 13, no. 9. – P. 945–947.

29. Perlin V., Winful H. Optimal design of flatgain wide-band fiber Raman amplifiers // *Journal of Lightwave Technology*. – 2002. – Vol. 20, iss. 2. – P. 250–254.

30. Grant A.R. Calculating the Raman pump distribution to achieve minimum gain ripple // *Quantum Electronics*. – 2002. – Vol. 38, no. 11. – P. 1503–1509.

31. Mollenauer L.F., Grant A.R., Mamyshev P.V. Time-division multiplexing of pump wavelengths to achieve ultrabroadband, flat, backward-pumped Raman gain // *Optics Letters*. – 2002. – Vol. 27, no. 8. – P. 592–594.

32. Record 500 km unrepeated 100 Gb s⁻¹ transmission / V.V. Gainov, N.V. Gurkin, S.N. Lukin [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10, no. 7. – P. 075107.

References

1. Stolen R.H., Ippen E.P. Raman gain in glass optical waveguides. *Applied Physics Letters*, 1973, vol. 22, no. 6, pp. 276-278.

2. Gapontsev D.V., Chernikov S.V., Taylor J.R. Fibre Raman amplifiers for operation at 1.3 μm . *Optics Communications*, 1999, vol. 166, pp. 85-88.

3. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications. *IEEE Journal of Selected topics in Quantum Electronics*, 2002, vol. 8, no. 3, pp. 548-559.

4. Kidorf H., Rottwitt K., Nissov M., Ma M., Rabarijaona E. Pump interactions in 100 nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, no 5, pp. 530-532.

5. Raman amplification in fiber optical communication systems. Ed. C. Headley, G.P. Agrawal. Elsevier Academic Press, 2005, 374 p.

6. Nanii O.E. Osnovy tekhnologii spektral'nogo multipleksirovaniia kanalov peredachi (WDM) [Fundamentals of the WDM technology]. *Lightwave Russian Edition*, 2004, no. 2, pp. 47-52.

7. Bromage J. Raman amplification for fiber communication systems. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2004, vol. 22, no.1, pp. 79-93.

8. Turitsyn S.K. Raspredelenoie usileniie s ispolzovaniem sverkh-dlinnykh volokonnykh lazerov: peredaiushchaia sreda s nezatukhayushchim signalom [Distributed amplification with the use of extra-long haul fiber lasers: transmitting medium with zero-decrement signal]. *Lightwave Russian Edition*, 2007, no. 2, pp. 8-10.

9. Hansen P.B., Eskildsen L., Grubb S.G. [et al.] 442 km repeaterless transmission in a 10 Gbit/s system experiment. *Electronics Letters*, 1996, vol. 32, no.11, pp. 1018-1019.

10. Nielsen T.N., Stentz A.J., Rottwitt K. [et al.] 3.28Tb/s transmission over 3×100 km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 8, pp. 1079-1081.

11. Zhu B., Leng L., Nelson L.E. [et al.] 3.2Tb/s (80 × 42.7Gb/s) transmission over 20×100 km of non-zero dispersion fiber with simultaneous C + L-band dispersion compensation. *Proc. OFS 2002*. Postdeadline paper FC8, 2002, pp. FC8-1-FC8-3.

12. Nissov M., Davidson C.R., Rottwitt K. [et al.] 100 Gb/s (10×10Gb/s) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification. *Proc. of IOOC – ECOC'1997*. Edinburgh, Scotland, 1997, pp. 9-12.

13. Mikkelsen B., Raybon G., Essiambre R.-J. [et al.] 320-Gb/s single-channel pseudolinear transmission over 200 km of nonzero-dispersion fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, vol. 12, no. 10, pp. 1400-1402.

14. Xu C., Liu X., Mollenauer L.F., Wei X. Comparison of Return-to-Zero Differential Phase- Shift Keying and On-Off Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, vol. 15, pp. 617-619.

15. Kazantseva N.A., Nanii O.E. Optimal'naia spektral'naia oblast' raboty VOLS s odno- i dvukhkaskadnym ramanovskim usilitelem [Optimal spectral range of OFCL with one- and two-stage Raman amplifiers]. *Moscow University Physics Bulletin*, 2004, vol. 59, pp. 67-69.

16. Rottwitt K., Stentz A., Nielson T. [et al.] Transparent 80 km bi-directionally pumped distributed Raman amplifier with second-order pumping. *Proc of ECOC'1999*, Nice, France, 1999, pp. 144-145.
17. Papernyi S.B., Karpov V.J., Clements W.R.L. Third-order cascaded Raman amplification. *Proc OFS'2002*. Anaheim, CA. 2002. Post-deadline paper FB4.
18. Bouteiller J.-C., Brar K., Headley C. Quasiconstant signal power transmission. *Proc. of ECOC'2002*. Copenhagen, Denmark, 2002. Paper S3.04.
19. Martinelli C. [et al.] Analysis of bidirectional and second order pumping in long-haul systems with distributed Raman amplification. *Proc. of ECOC'2002*. Copenhagen, Denmark, 2002. Paper P3.30.
20. Stolen R.H., Gordon J.P., Tomlinson W.J. [et al.] Raman response function of silica core fibers. *Journal of Optical Society of America B*, 1989, vol. 6, no. 6, pp. 1159-1166.
21. Jiang S., Bristiel B., Jaouën Y. [et al.] Full characterization of modern transmission fibers for Raman amplified-based communication systems. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 4883-4892.
22. Fludger C.R.S., Maroney A., Jolley N., Mears R. An analysis of the improvement in OSNR from distributed Raman amplifiers using modern transmission fibers. *Proc. OFC'2000*. Baltimore, OSA, FF2, 2000, pp. 100-102.
23. Bromage J., Rottwitt K., Lines M.E. A method to predict the Raman gain spectra of Germanosilicate fibers with arbitrary index profiles. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2002, vol. 14, no. 1, pp. 24-26.
24. Ania-Castanon J.D. [et al.] Ultralong Raman fiber lasers as virtually lossless optical media. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, pp. 023902–023905.
25. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Harper P., Turitsyn S.K. Hybrid gain-flattened and reduced power excursion scheme for distributed Raman amplification. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 24, pp. 29140-29144.
26. Emory Y., Tanaka K., Namiki S. 100-nm bandwidth flat-gain Raman amplifiers pumped and gain-equalized by 12-wavelength channel WDM laser diode unit. *Electronics Letters*, 1999, vol. 35, pp. 1355-1356.
27. Kidorf H., Rottwitt K., Nissov M. [et al.] Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, vol. 11, pp. 530-532.
28. Zhou X., Lu C., Shum P., Cheng T.H. A simplified model and optimal design of a multiwavelength backward pumped Raman amplifier. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 9, pp. 945-947.

29. Perlin V., Winful H. Optimal design of flatgain wide-band fiber Raman amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, vol. 20, iss. 2, pp. 250-254.

30. Grant A.R. Calculating the Raman pump distribution to achieve minimum gain ripple. *Quantum Electronics*, 2002, vol. 38, no. 11, pp. 1503-1509.

31. Mollenauer L.F., Grant A.R., Mamyshev P.V. Time-division multiplexing of pump wavelengths to achieve ultrabroadband, flat, backward-pumped Raman gain. *Optics Letters*, 2002, vol. 27, no. 8, pp. 592-594.

32. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukinih S.N. [et al.] Record 500 km unrepeated 100 Gb s⁻¹ transmission. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 7, pp. 075107.

Получено 17.10.2014

УДК 535

А.С. Смирнов^{1,2}, В.В. Бурдин^{1,2}, Ю.А. Константинов²¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия²Лаборатория фотоники Пермского научного центра
Уральского отделения РАН, Пермь, Россия

ОБ ОЦЕНКЕ h -ПАРАМЕТРА В СОХРАНЯЮЩЕМ ПОЛЯРИЗАЦИЮ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Рассматривается возможность оценки h -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне исходя из данных поляризационной рефлектометрии.

Ключевые слова: сохраняющие поляризацию волокна, поляризационная рефлектометрия, экстинкция, h -параметр.

A.S. Smirnov^{1,2}, V.V. Burdin^{1,2}, Yu.A. Konstantinov²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation²Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

EVALUATION OF POLARIZATION MAINTAINING FIBER h -PARAMETER WITH POLARIZATION REFLECTOMETRY

This paper describes a technique of the h -parameter estimating of polarization-maintaining optical fiber with the polarization OTDR data.

Keywords: polarization-maintaining fibers, P-OTDR, extinction, h -parameter.

1. Введение

Для применения оптических волокон, сохраняющих состояние введенного линейно-поляризованного излучения, важно знать распределение поляризационных параметров по длине волокна. В работах [1, 2] приводится описание метода, основанного на поляризационной рефлектометрии, который позволяет осуществлять локализацию областей связи поляризационных мод, а также производить оценку величины этой свя-

зи. Часто величину связи поляризационных мод определяют через так называемый h -параметр, который устанавливает относительную долю мощности (или интенсивности), перешедшую из одной поляризационной моды в ортогональную на единице длины волокна [3]. В настоящей работе рассматривается возможность оценки h -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне на основе данных поляризационной рефлектометрии.

2. Эксперимент

Для реализации метода, описанного в работах [1, 2], необходимо записать поляризационные рефлектограммы при возбуждении линейно-поляризованным излучением только одной поляризационной моды, а также и при равномерном возбуждении обеих поляризационных мод в световоде (рис. 1).

В измерительной схеме был применен рефлектометр Photon Kinetics PK8000 (используемая длина волны 1550 нм, спектральная ширина источника излучения 4,7 нм, динамический диапазон 30 дБ). Для ориентирования линейно-поляризованного излучения, полученного после прохождения поляризатора, был применен измеритель поляризационной экстинкции (Santec PEM-330, спектральный диапазон 1260–1630 нм, ошибка определения коэффициента поляризационной экстинкции не превышает 0,3 дБ), размещенный на другом конце исследуемого волокна.

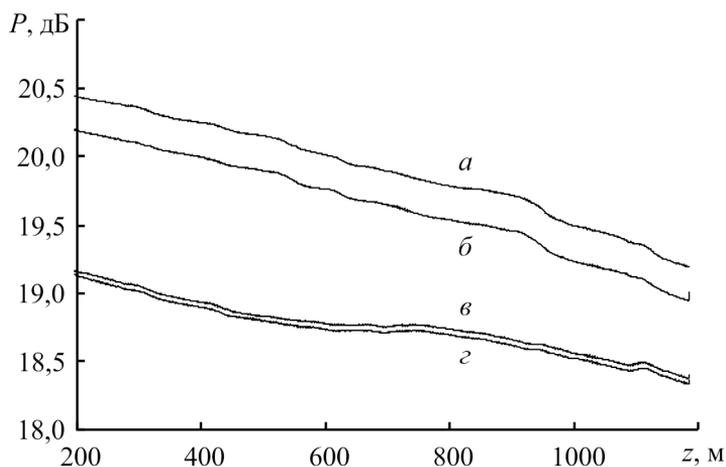


Рис. 1. Поляризационные рефлектограммы, снятые при возбуждении только одной поляризационной моды (a , b) и при равномерном возбуждении обеих мод ($в$, $г$)

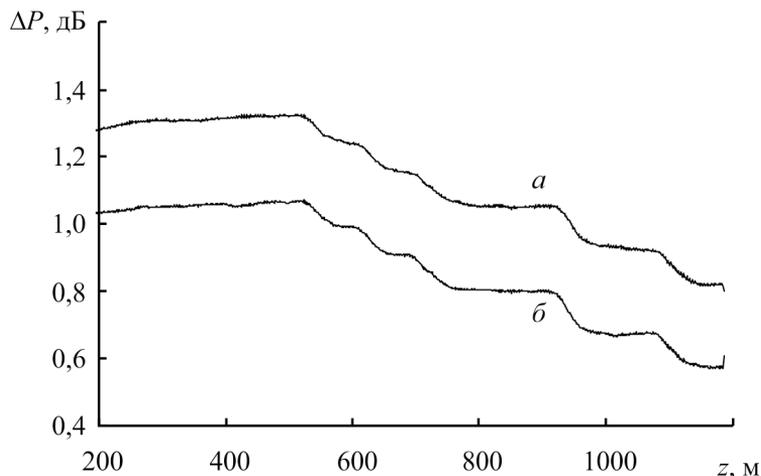


Рис. 2. Разность поляризационных рефлектограмм

Сам коэффициент поляризационной экстинкции образца волокна определяется как величина максимального отношения интенсивностей поляризационных компонент на выходе волокна при возбуждении на входе только одной поляризационной моды волокна широкополосным источником и поляризатором [4]. В качестве входного поляризатора использовался поляризатор интегрально-оптического типа на подложке из ниобата лития с клееными волоконными концами (коэффициент поляризационной экстинкции 32,5 дБ), широкополосный источник – Exfo FLS-2300B (эффективная ширина спектра 20 нм).

3. Теоретическое обоснование

Обозначим α и α_0 – измеряемые рефлектометром распределенные коэффициенты затухания при возбуждении одной поляризационной моды (рис. 1, *а, б*) и при равномерном возбуждении обеих поляризационных мод в световоде (рис. 1, *в, г*) соответственно. Тогда $\alpha < \alpha_0$ (в случае одинаковых условий ввода излучения), так как в случае ввода излучения, поляризованного вдоль одной из осей двулучепреломления, поляризатор на входе волокна не пропускает ту часть отраженного излучения, которая перекачалась в ортогональную моду. Этим объясняются дополнительные потери $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$, экспериментально регистрируемые рефлектометром (рис. 2).

Если дополнительные потери $\Delta\alpha$ связаны с перекачкой мощности между ортогональными модами, то они должны коррелировать

с h -параметром волокна. Рассмотрим это подробнее. Пусть в оптическое волокно введено линейно-поляризованное излучение с ориентацией вектора напряженности электрического поля вдоль одной из осей двулучепреломления x . Мощность излучения на входе световода длины $L - P_0$, мощность излучения на выходе из световода – P . Тогда

$$10\lg \frac{P_0}{P} = \alpha_0 L, \quad (1)$$

где α_0 – коэффициент затухания, дБ/км.

Поскольку часть излучения перекачивается в моду с ориентацией вектора напряженности вдоль оси y , мощность излучения на выходе $P = P_x + P_y$. Тогда из формулы (1) следует:

$$10\lg \frac{P_0}{P_x + P_y} = 10\lg \left(\frac{P_0}{P_x} \cdot \frac{P_x}{P_x + P_y} \right) = 10\lg \frac{P_0}{P_x} + 10\lg \frac{P_x}{P_x + P_y} = \alpha_0 L. \quad (2)$$

Величина $10\lg P_0/P_x$ представляет собой величину αL , где α – коэффициент затухания, измеряемый рефлектометром, поскольку поляризатор на входе волокна не пропускает отраженное излучение, поляризованное вдоль оси y . Из формулы (2) получаем:

$$\alpha L + 10\lg \frac{P_x}{P_x + P_y} = \alpha_0 L \quad (3)$$

или

$$\Delta\alpha L = -10\lg \frac{P_x}{P_x + P_y}, \quad (4)$$

где $\Delta\alpha$ – дополнительные потери при возбуждении одной поляризационной моды относительно потерь при равномерном возбуждении обеих мод, $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$.

Из (4) следует:

$$\Delta\alpha L = -10\lg \left(1 - \frac{P_y}{P_x + P_y} \right).$$

Отсюда получаем:

$$\frac{P_y}{P_x + P_y} = 1 - 10^{-\frac{\Delta\alpha \cdot L}{10}}. \quad (5)$$

Как известно, величина h -параметра определяется из уравнения [5]

$$\frac{P_y}{P_x + P_y} = \frac{1}{2}(1 - e^{-2hL}). \quad (6)$$

Таким образом,

$$1 - 10^{-\frac{\Delta\alpha L}{10}} = \frac{1}{2}(1 - e^{-2hL}). \quad (7)$$

Решая уравнение (7), находим величину h -параметра.

В таблице представлены значения h -параметра, определенные и рассчитанные по формуле (7).

Характеристики исследованных образцов

Образец	Длина L , м	Разность затуханий $\Delta\alpha L$, дБ	h -параметр, определенный стандартным* методом, 10^{-5} м^{-1}	h -параметр, рассчитанный из (7), 10^{-5} м^{-1}
1	1186	0,56	7,34	10,20
2	1190	0,36	5,42	6,69
3	1086	0,11	1,79	2,30
4	1194	0,45	6,65	8,24
5	1092	0,08	1,74	1,67

*Из величины поляризационной экстинкции и длины L по формуле (6).

В большинстве случаев значения h -параметра, рассчитанные исходя из величины $\Delta\alpha L$, регистрируемой рефлектометром на основании обратно рассеянного излучения, превышают реальные значения h -параметра на 20–40 %. Это свидетельствует о том, что отраженное назад излучение содержит большую долю мощности P_y поляризационной моды с ориентацией вдоль оси y по сравнению с излучением, распространяющимся по световоду в прямом направлении. Возможно, изменение степени поляризации излучения связано с дефектами, имеющими френелевскую природу. Таким образом, при отражении излучения от различных неоднородностей часть мощности из одной поляризационной моды переходит в ортогональную поляризационную моду, хотя в целом излучение остается преимущественно поляризованным вдоль оси x .

4. Выводы

Установлена связь между величиной дополнительных поляризационных потерь $\Delta\alpha$ и h -параметром световода. Проведена оценка

h -параметра световода исходя из поляризационных рефлектометрических измерений. Показано, что при отражении от неоднородностей световода поляризованное излучение остается преимущественно поляризованным в той же моде. Предложенный метод можно рассматривать как альтернативный стандартному методу измерения h -параметра, т.е. без измерения величины поляризационной экстинкции, вводя линейно поляризованное излучение в исследуемое волокно методом, предложенным в работе [6]. Несмотря на меньшую точность, метод имеет явное преимущество – сведения о распределении связи поляризационных мод.

Список литературы

1. Детектирование и локализация дефектов сохранения поляризации в анизотропном волоконном световоде / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, А.С. Смирнов // Квантовая электроника. – 2013. – № 43. – С. 531–534.
2. Рефлектометрический метод оценки взаимодействия поляризационных мод в анизотропных оптических волокнах / В.В. Бурдин, Ю.А. Константинов, В.П. Первадчук, А.С. Смирнов // Фотон-экспресс-наука 2013 № 6: тез. докл. 4-й Всерос. конф. по волоконной оптике (Пермь, 16–18 октября 2013 г.). – Пермь, 2013. – С. 173.
3. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. – Artech House Optoelectronics Library, 1993.
4. Sezerman O., Best G. Accurate alignment preserves polarization // Laser Focus World. – 1997.
5. Дмитриев А.Л. Оптические системы передачи информации: учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 96 с.
6. Константинов Ю.А. Солдатов П.Н., Смирнов А.С. Методика ввода поляризованного излучения в оптическое волокно типа «Панда» для исследования методами поляризационной рефлектометрии // Фотон-экспресс-наука 2013 № 6: тез. докл. 4-й Всерос. конф. по волоконной оптике (Пермь, 16–18 октября 2013 г.). – Пермь, 2013. – С. 308.

References

1. Burdin V.V., Konstantinov Iu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. Detektirovanie i lokalizatsiia defektov sokhraneniia poliarizatsii v anizotropnom volokonnom svetovode [A technique for detecting and locat-

ing polarisation nonuniformities in an anisotropic optical fibre]. *Kvantovaya elektronika*, 2013, no. 43, pp. 531-534.

2. Burdin V.V., Konstantinov Yu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. Reflektometricheskii metod otsenki vzaimodeystviia polarizatsionnykh mod v anizotropnykh opticheskikh voloknakh [A reflectometric technique for estimation polarization-crosstalk in anisotropic optical fiber]. *Tezisy dokladov chetvertoi Vserossiiskoi konferentsii po volokonnoi optike "Foton-ekspress-nauka" 2013 no. 6*. Perm, 2013, pp. 173.

3. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. Artech House Optoelectronics Library, 1993.

4. Sezerman O., Best G. Accurate alignment preserves polarization. *Laser Focus World*, 1997.

5. Dmitriiev A.L. Opticheskiye sistemy peredachi informatsii [Optical systems for data transmission]. St-Petersburg: Sankt-Peterburgskii natsional'nyi issledovatel'skii universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2007.

6. Konstantinov Yu.A., Soldatov P.N., Smirnov A.S. Metodika vvoda poliarizovannogo izlucheniia v opticheskoye volokno tipa "Panda" dlia issledovaniia metodami poliarizatsionnoi reflektometrii [A technique for coupling polarized radiation into Panda-type optical fiber for P-OTDR]. *Tezisy dokladov chetvertoi Vserossiiskoi konferentsii po volokonnoi optike "Foton-ekspress-nauka" 2013 no. 6*. Perm, 2013, pp. 308.

Получено 15.10.2014

УДК 621.373.862.038.825.2

**А.А. Ляпин¹, П.А. Рябочкина¹, А.Н. Чабушкин¹,
С.Н. Ушаков², П.П. Федоров²**

¹ Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия

² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

ВИЗУАЛИЗАТОР ДВУХМИКРОННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ $\text{CaF}_2:\text{Ho}$

В настоящей работе исследовалась возможность использования монокристаллов и керамики $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ для визуализации двухмикронного лазерного излучения в видимый спектральный диапазон (635–670 нм). Также произведена оценка энергетической эффективности преобразования кристаллом $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ двухмикронного лазерного излучения в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм.

Ключевые слова: визуализатор, монокристалл, керамика, CaF_2 , гольмий.

**A.A. Liapin¹, P.A. Riabochkina¹, A.N. Chabushkin¹,
S.N. Ushakov², P.P. Fedorov²**

¹ Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

² A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

VISUALISER OF TWO-MICRON LASER RADIATION BASED ON $\text{CaF}_2:\text{Ho}$

In the present paper we investigated the possibility of using single crystals and ceramics $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ to visualize two-micron laser radiation in the visible spectral range (635–670 nm). Also energy efficiency of the conversion of two-micron laser radiation to glow in red spectral range 620–680 nm by $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ crystal was estimated.

Keywords: visualizer, single crystal, ceramics, CaF_2 , holmium.

1. Введение

Визуализаторы лазерного излучения являются необходимым элементом для лазеров, генерирующих излучение, находящееся в спектральном диапазоне за пределами видимого излучения. Коммерческие визуализаторы лазерного излучения, существующие в настоящее время, обеспечивают диапазон визуализации до 1700 нм (таблица).

Коммерческие модели визуализаторов

Компания ¹	Модель визуализатора	Диапазон поглощения, нм
Thorlabs Inc	VRC2	800–1700
ООО «Полироник»	FID-C, FID-CD	760–1600
НТЦ ООО «Кобра-Оптикс»	IRV-R	1470–1600
ROITHNER LASERTECHNIK GmbH	ISC-4-ALL	800–1700
Newport	F-IRC2-F	700–1700

На сегодняшний день активно разрабатываются лазеры (твердотельные, волоконные, полупроводниковые), генерирующие излучение в двухмикронном диапазоне спектра. Двухмикронные лазеры представляют интерес для медицины и разработки лидарных систем [1–4]. В соответствии с этим актуальной является задача визуализации излучения в видимый свет ИК-излучения в спектральном диапазоне выше 1,7 мкм.

Цель настоящей работы – выявление возможности использования монокристаллов и керамики $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ для визуализации лазерного излучения в ближнем ИК-диапазоне спектра 1800–2150 нм в видимый спектральный диапазон (635–670 нм).

2. Методика эксперимента

Монокристаллы $\text{CaF}_2-\text{HoF}_3$ были выращены методом вертикальной направленной кристаллизации (метод Бриджмена) в вакуумированной камере в графитовых тиглях с графитовым нагревателем сопротивления и графитовыми тепловыми экранами [5].

Спектры поглощения ионов Ho^{3+} в кристалле $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ были зарегистрированы с помощью сканирующего двулучевого спектрофотометра с двойным монохроматором Perkin Elmer Lambda 950.

Для возбуждения на уровень $^5\text{I}_7$ ионов Ho^{3+} в кристаллах $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ использовался непрерывный твердотельный лазер на кристалле $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ с длиной волны излучения 1912 нм. Диаметр пучка падающего лазерного излучения, сфокусированного на кристалл, составил 230 мкм. Антистоксовая люминесценция на переходе $^5\text{F}_5 \rightarrow ^5\text{I}_8$ ионов Ho^{3+} в кристалле $\text{CaF}_2:\text{Ho}$, возникающая при возбуждении излучением лазером $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$, регистрировалась с использованием автоматизированной установки на базе монохроматора МДР-23. Синхронное детектирование сигнала при регистрации спектров люминесценции осуще-

¹ См. официальные сайты компаний: www.thorlabs.de; www.polironik.ru; www.scitc.ru; www.roithner-laser.com; www.newport.com

ствлялось с помощью синхронного усилителя SR-810. В качестве приемника излучения использовался ФЭУ-79. Измерения проводились при комнатной температуре.

Спектральная плотность мощности излучения люминесценции в красном диапазоне спектра (620–680 нм) измерялась с использованием интегрирующей сферы OL IS-670-LED и спектрометра OL-770 UV/VIS (Gooch&Housego). Мощность двухмикронного излучения, поглощенного в кристалле CaF₂:Ho, определялась с помощью измерителя мощности 11 PMK-30H-H5 (Standa).

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 представлен спектр поглощения кристаллов CaF₂:Ho для перехода ⁵I₈→⁵I₇ ионов Ho³⁺. Регистрация антистоксовой люминесценции осуществлялась возбуждением на уровень ⁵I₇ ионов Ho³⁺ излучением LiYF₄:Tm лазера на длине волны 1912 нм. На рис. 1 длина волны возбуждения показана стрелкой.

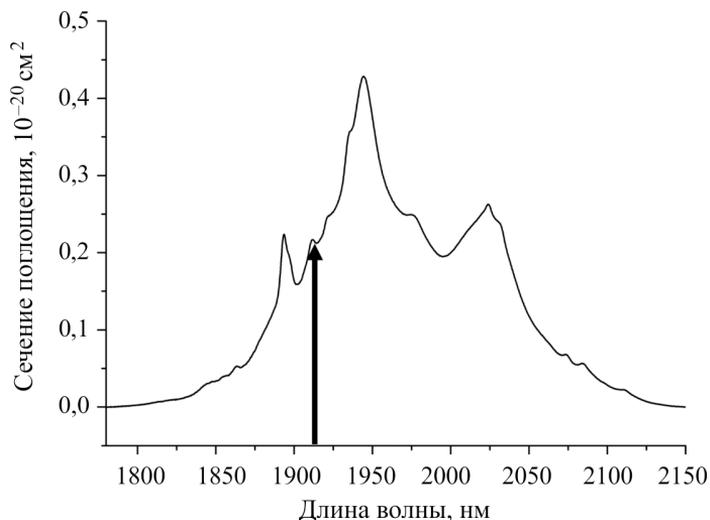


Рис. 1. Спектр поглощения кристаллов CaF₂:Ho

Спектр антистоксовой люминесценции, соответствующий переходу ⁵F₅→⁵I₈, зарегистрированный при данном способе возбуждения, показан на рис. 2.

Наличие для кристаллов CaF₂:Ho интенсивной антистоксовой люминесценции в области 630–670 нм позволило нам предложить способ визуализации ИК-излучения в двухмикронной области спектра. Возможность визуализации двухмикронного излучения продемонстри-

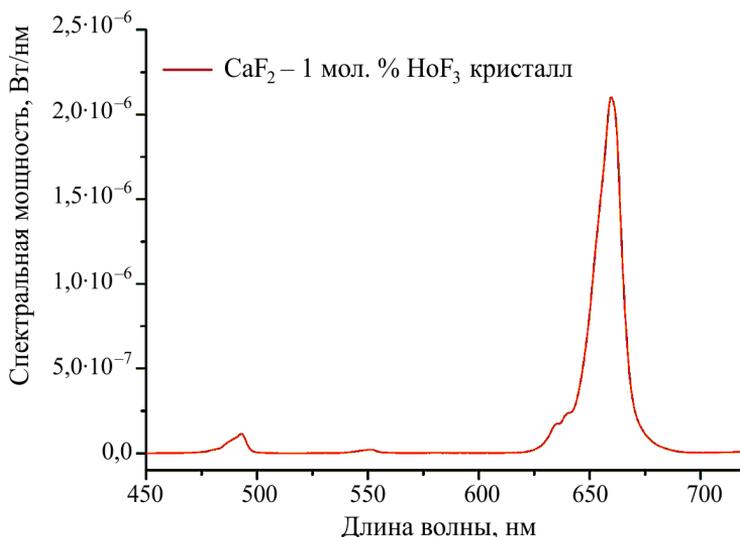


Рис. 2. Спектральная плотность мощности $P_{^5F_3 \rightarrow ^5I_8}$ антистоксовой люминесценции ионов Ho^{3+} для монокристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ ($C_{\text{Ho}} = 1$ мол. %) в диапазоне 450–725 нм

рована нами с помощью транспаранта, представляющего собой алюминиевую подложку, на которую с помощью связующего нанесен порошок из размолотого кристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$. При освещении данного транспаранта излучением $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ лазером наблюдалось пятно ярко-красного цвета. Фотография установки, с помощью которой продемонстрирована возможность визуализации излучения $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ лазера, показана на рис. 3. Предложенный способ визуализации позволяет наблюдать без разрушения экрана двухмикронное излучение с плотностью мощности ИК-излучения от $0,4 \text{ Вт/см}^2$ до 340 кВт/см^2 .

В настоящей работе проведена оценка энергетической эффективности преобразования кристаллом CaF_2 -1 мол. % HoF_3 излучения лазера $\text{LiYF}_4:\text{Tm}$ в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм.

Энергетическая эффективность преобразования монокристаллом и керамикой $\text{CaF}_2:\text{Ho}$ двухмикронного лазерного излучения в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм определялась по формуле

$$\eta = \frac{P_{^5F_3 \rightarrow ^5I_8}}{P_{^5I_8 \rightarrow ^5I_7}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $P_{^5F_3 \rightarrow ^5I_8}$ – плотность мощности излучения люминесценции в красном диапазоне спектра (620–680 нм); $P_{^5I_8 \rightarrow ^5I_7}$ – мощность излучения, поглощенного в исследованных образцах.

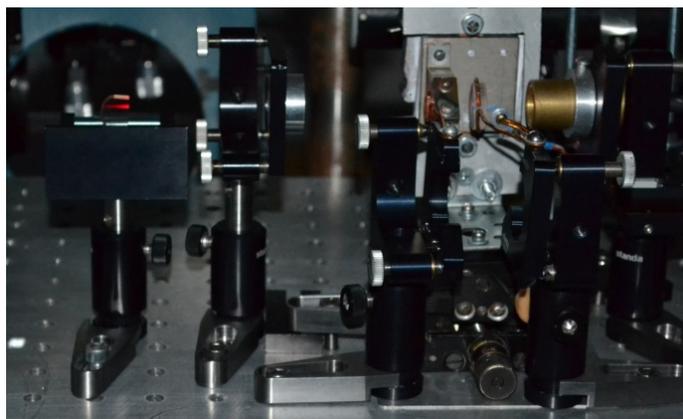


Рис. 3. Визуализатор двухмикронного лазерного излучения с использованием объемного образца монокристалла $\text{CaF}_2:\text{Ho}$

Излучение двухмикронного лазера YLF4:Tm фокусировалось на образец кристалла CaF_2 -1 мол. % HoF_3 , расположенного в интегрирующей сфере OL IS-670-LED (см. рис. 3). Спектральная плотность мощности антистоксовой люминесценции ионов Ho^{3+} в диапазоне 620–680 нм измерялась с помощью спектрорадиометра OL-770 UV/VIS и составила $2 \cdot 10^{-5}$ Вт (рис. 4). Мощность излучения, поглощенного в кристалле, определялась с помощью измерителя мощности 11 РМК-30Н-Н5 и составила 0,1 Вт. Энергетическая эффективность преобразования кристаллом CaF_2 -1 мол. % HoF_3 двухмикронного лазерного излучения в свечение красного диапазона спектра 620–680 нм не превышает 0,02 %.

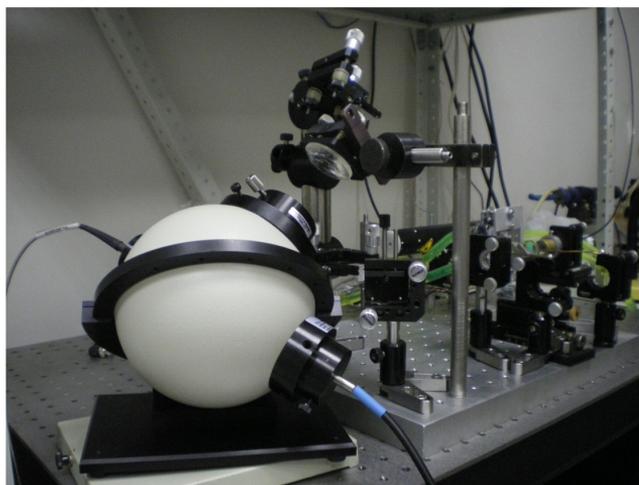


Рис. 4. Внешний вид установки для определения эффективности преобразования кристаллом $\text{CaF}_2:\text{Ho}^{3+}$ двухмикронного излучения в излучение видимого диапазона спектра (620–680 нм)

Предложенный нами способ визуализации двухмикронного излучения апробирован учеными (руководитель группы О.В. Палашов) Института прикладной физики РАН (г. Н.Новгород). В ходе эксперимента ими было установлено, что визуализатор на основе CaF₂:Ho эффективно преобразует излучение с длиной волны 2064 нм в красное свечение. В качестве источника излучения в данном случае использовался твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой на основе керамики Lu₂O₃:Tm.

4. Заключение

В настоящей работе показано, что с использованием CaF₂:Ho можно обеспечить простой, безинерционный способ визуализации ИК-излучения в широком диапазоне плотности мощности ИК-излучения от 0,4 Вт/см² до 340 кВт/см² и в диапазоне длин волн ИК-излучения от 1800 до 2150 нм при высоком контрасте наблюдаемой картины распределения ИК-излучения и высокой разрешающей способности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект №. 3.384.2014/К и проект № 07080210059611).

Список литературы

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhberg P. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications // INTECH. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. – 2010. – February 1. DOI: 10.5772/39538.
2. Генерация суперконтинуума в оптических волокнах, легированных ионами тулия / А.С. Курков, В.А. Камынин, В.Б. Цветков, Я.Э. Садовникова, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, № 9. – С. 778–780.
3. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm // Laser Physics Letters. – 2013. – Vol. 10, no. 12. DOI:10.1088/16122011/10/12/125106.
4. Spectroscopic, luminescent and laser properties of nanostructured CaF₂:Tm materials / A.A. Lyapin, P.P. Fedorov, E.A. Garibin, A.V. Malov, V.V. Osiko, P.A. Ryabochkina, S.N. Ushakov // Optical Materials. – 2013. – Vol. 35, № 10. – P. 1859–1864.

5. Fedorov P.P., Osiko V.V. Crystal Growth of Fluorides // In: Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials / Ed. P.Capper. Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. – John Wiley&Son, Ltd., 2005. – P. 339–356.

6. Визуализатор двухмикронного лазерного излучения на основе кристаллов CaF₂:Ho / А.А. Ляпин, П.А. Рябочкина, С.Н. Ушаков, П.П. Федоров // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44, № 6. – С. 602–605.

References

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhberg P. 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications. *INTECH. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, 2010, February 1. DOI: 10.5772/39538.

2. Kurkov A.S., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B., Sadovnikova Ia.E., Marakulin A.V., Minashina L.A. Generatsiia superkontinuuma v opticheskikh voloknakh, legirovannykh ionami tuliia [Supercontinuum generation in thulium-doped fibres]. *Kvantovaiia elektronika*, 2012, vol. 42, no. 9, pp. 778-780.

3. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 12. DOI: 10.1088/16122011/10/12/125106.

4. Lyapin A.A., Fedorov P.P., Garibin E.A, Malov A.V., Osiko V.V., Ryabochkina P.A., Ushakov S.N. Spectroscopic, luminescent and laser properties of nanostructured CaF₂:Tm materials. *Optical Materials*, 2013, vol. 35, no. 10, pp. 1859-1864.

5. Fedorov P.P., Osiko V.V. Crystal Growth of Fluorides. *Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials*. Ed. P.Capper. Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. John Wiley&Son, Ltd., 2005, pp. 339-356.

6. Liapin A.A., Riabochkina P.A., Ushakov S.N., Fedorov P.P. Vizualizator dvukhmikronnogo lazernogo izlucheniia na osnove kristallov CaF₂:Ho [Visualiser of two-micron laser radiation based on Ho:CaF₂ crystals]. *Kvantovaiia elektronika*, 2014, vol. 44, no. 6, pp. 602–605.

Получено 16.10.2014

УДК 621.373

**А.А. Белоусов^{1,2}, Ю.Н. Вольхин¹, А.В. Гамиловская^{1,2},
А.А. Дубровская¹, Е.В. Тихонов^{1,2}**

¹ ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики», Омск, Россия

² Омский государственный технический университет, Омск, Россия

О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РАДИОФОТОНИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЕЦИМЕТРОВОГО, САНТИМЕТРОВОГО И МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН

Данная статья является вводной к серии статей по тематике радиофотоники, в которых будут описаны результаты обзорно-реферативных, теоретических и экспериментальных работ, проведенных сотрудниками и аспирантами ОАО «Центральное конструкторское бюро автоматики» и Омского государственного технического университета. Рассмотрены наиболее яркие и наиболее типичные примеры использования методов и средств радиофотоники для решения некоторых острых проблем техники СВЧ, которые практически не поддаются решению в рамках «традиционной» радиоэлектроники.

Ключевые слова: фотоника, радиофотоника, микроволновая фотоника, радиофотонные аналоговые устройства, радиофотонные аналоговые тракты, радиофотонные аналоговые процессоры, радиофотонные автогенераторы гармонических сигналов, радиофотонные аналого-цифровые преобразователи, радиофотонные линии задержки, радиофотонные преобразователи частоты – смесители, радиофотонные амплитудные детекторы, радиофотонные умножители частоты, радиофотонные фазовые манипуляторы, электрооптический модулятор, модулятор Маха – Цандера, электропоглощающий модулятор, фотодетектор, оптоволоконный тракт, прямая модуляция, внешняя модуляция.

**A.A. Belousov^{1,2}, Yu.N. Volkhin², A.V. Gamilovskaia^{1,2},
A.A. Dubrovskaja¹, E.V. Tikhonov^{1,2}**

¹JSC “Central Design Bureau of Automatics”, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

RADIOPHOTONICAL METHODS AND TOOLS USED FOR MICROWAVE ANALOG AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING

This article is an introduction to a series of articles on the radiophotonics which will describe the results of an overview and abstracts, theoretical and experimental works that have been done staff and postgraduate students of “Central Design Bureau of Automatics” and Omsk State Technical University. This article will address the most striking and the most typical examples of the use of the methods and

means of radiophotonics for solving some critical problems of microwave technology, which are almost impossible to solve within "traditional" electronics.

Keywords: photonics, radiophotonics, microwave photonics, radiophotonical analog devices, radiophotonical analog tracts, radiophotonic analog processor, radiophotonic active oscillator, radiophotonical analog to digital converters, radiophotonic delay line, radiophotonic mixer, radiophotonic amplitude detector, radiophotonic frequency multiplier, radiophotonical phase-shift modulator, electro-optical modulator, Mach-Zehnder modulator, electroabsorption modulator, photodetector, fiber-optic line, direct modulation, external modulation

1. Введение

В настоящий момент фотонные и, в частности, лазерные технологии широко применяются в промышленности и медицине, системах передачи и хранения информации, в изделиях военной и специальной техники (ВСТ), а также в быту и шоу-бизнесе. Информацию о таких приложениях фотоники можно найти не только в многочисленных научно-популярных и специализированных изданиях, но и в средствах массовой информации. Однако существуют и другие, менее известные, но не менее значимые для некоторых отраслей науки и техники фотонные технологии: например, фотонные технологии обработки высокочастотных радиосигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн (ДДВ). К сожалению, эти технологии неизвестны не только аудитории научно-популярных изданий, но и представителям даже тех отечественных профессиональных сообществ, которые имеют непосредственное отношение к разработке и исследованиям как в области фотоники, так и в области радиоэлектронных средств (РЭС) дециметрового, сантиметрового и миллиметрового ДДВ (ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ соответственно). Отдельные попытки ученых [1, 2] привлечь внимание специалистов отечественной радиоэлектронной промышленности к этой перспективной тематике буквально до самого последнего времени каких-либо ощутимых результатов не давали. Поэтому основной целью данной вводной статьи будет ознакомление – хотя бы в общих чертах – читателей журнала «Прикладная фотоника» с некоторыми из известных авторам примерами использования фотонных технологий в трактах РЭС ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ. Кроме того, в процессе изложения материала будет «волевыми» решениями вводиться некоторая терминология. Последнее обусловлено прежде всего тем, что нормативно утвержденная и даже общепринятая в профессиональном сообществе терминология по этой тематике отсутствует, а кроме того, эта терминология необходима для удобства изложения и восприятия излагаемого материала.

2. О причинах появления новой области науки и техники – радиопhotоники

Разработка перспективных РЭС ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ для ВСТ – систем радиосвязи (РС), радионавигации (РН), радиоэлектронной борьбы (РЭБ), радиоэлектронной разведки (РЭР) и радиоэлектронного противодействия (РЭП), а также радиолокационных систем (РЛС) – практически всегда велась с использованием тех или иных элементов фотонной техники. При этом практически до самого конца XX в. эти элементы использовались только для создания различных устройств индикации и подсветки. Редкие попытки использования фотонных технологий для обработки высокочастотных сигналов, например применение акустооптических Фурье-преобразователей [3, 4], какого-либо существенного влияния на развитие РЭС для ВСТ не оказали. Последнее было обусловлено прежде всего тем, что такие устройства, по большому счету, так и не вышли за рамки «лабораторных» конструкций, которые плохо «сочетались» с теми конструктивными решениями, которые использовались – и до сих пор используются – при проектировании высокочастотных узлов и блоков РЭС для ВСТ. Кроме того, эти акустооптические устройства были и до сих пор остаются относительно низкочастотными. И даже такая авторитетная организация, как DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), судя по всему, не предпринимала каких-либо особо акцентированных усилий для того, чтобы фотоника «шагнула» в высокочастотные тракты РЭС для ВСТ.

Однако положение дел кардинально изменилось после того, как были разработаны надежные и серийно воспроизводимые сверхширокополосные электрооптические модуляторы (ЭОМ), лазерные диоды с прямой модуляцией (ЛДПМ) и фотодетекторы (ФД), предназначенные для создания высокоскоростных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП¹). При этом, в отличие от вышеупомянутых акустооптических Фурье-преобразователей, данные ЭОМ, ЛДПМ и ФД (рис. 1–3) были реализованы в виде герметизируемых гибридных интегральных схем (ГИС) с использованием практически тех же самых конструктивных и технологических решений, что и традиционные ГИС ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ. В настоящий момент верхняя граница диапазона рабочих частот (ДРЧ) по электрическим входам/выходам у мелкосерий-

¹ ГОСТ 26599–85. Системы передачи волоконно-оптические. Термины и определения.

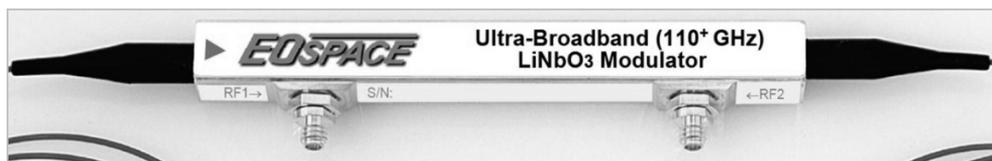


Рис. 1. ГИС сверхширокополосного ЭОМ

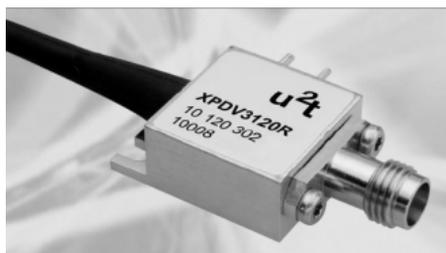


Рис. 2. ГИС сверхширокополосного ФД



Рис. 3. ГИС ЛДПМ

ных коммерческих ГИС ЭОМ достигает 100–110 ГГц², у ГИС ФД – 75 ГГц и выше³, а у ЛДПМ⁴ – 30 ГГц и выше.

Для разработки таких ГИС потребовались универсальные специалисты, которые должны были обладать профессиональной подготовкой в области фотоники, полупроводниковой техники, техники СВЧ и еще ряда научных и технических дисциплин. Или, другими словами, потребовались специалисты в новой, «гибридной» области науки и техники, в рамках которой исследуются взаимодействия оптических и высокочастотных электрических полей (сигналов, волн), а также создаются технические устройства, принцип работы которых основан на таких взаимодействиях. В нашей стране эта область науки и техники какого-либо нормативно утвержденного наименования до сих пор не имеет, а в профессиональном сообществе она иногда называлась радиооптикой [2, 5], иногда – СВЧ-оптикой [6], иногда сверхвысокочастотной оптоэлектроникой [1]. Однако в последнее время все чаще используется термин «радиофотоника», который, в частности, фигурировал в выступлении Председателя Правительства РФ Д.М. Медведева на заседании президиума Совета при Президенте РФ по модернизации

² www.gigoptix.com, www.eospace.com.

³ www.u2t.com.

⁴ www.hhi.fraunhofer.de.

экономики и инновационному развитию России, которое состоялось 9 июля 2014 г. в Екатеринбурге, а также в принятых по итогам этого заседания поручениях Правительства РФ⁵. В зарубежной англоязычной литературе – в подавляющем большинстве случаев – используется термин *Microwave Photonics* (микроволновая фотоника) и аббревиатура MWP⁶.

Введем еще несколько терминов. Упомянутые выше ГИС ЭОМ, ЛДПМ и ФД содержат в своем составе как «электрические» тракты, по которым распространяются электромагнитные волны ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ, так и оптические – фотонные – тракты, по которым распространяются электромагнитные волны оптического, а точнее, инфракрасного ДДВ. Поэтому такую элементную базу, в отличие от электронной компонентной базы (ЭКБ), будем в дальнейшем называть радиопотонной компонентной базой (РКБ). Также для удобства изложения и восприятия приведенного ниже текста введем еще один термин – фотонная компонентная база (ФКБ). Так предлагается называть те компоненты, которые содержат только оптические – фотонные – тракты.

С появлением вышеупомянутой РКБ, а также широкой номенклатуры активной и пассивной ФКБ возникла возможность реализации целой серии радиопотонных аналоговых устройств.

В целом все эти аналоговые радиопотонные устройства можно разделить на четыре группы: радиопотонные аналоговые тракты, радиопотонные аналоговые процессоры, радиопотонные автогенераторы гармонических сигналов, радиопотонные аналого-цифровые преобразователи.

3. Радиопотонные аналоговые тракты

В настоящий момент основным объектом приложения методов и средств радиопотоники являются радиопотонные аналоговые тракты (РФАТ). Типичный РФАТ содержит (рис. 4) модуль электрооптического преобразования (МЭП), оптоволоконный тракт (ОВТ) и модуль оптоэлектронного преобразования (МОП).

В МЭП может осуществляться либо прямая модуляция оптического сигнала электрическим сигналом $U_{вх}(t)$, либо внешняя модуляция. В случае реализации прямой модуляции МЭП состоит из одного

⁵ Решения по итогам заседания президиума совета по модернизации экономики и инновационному развитию [Электронный ресурс]. – URL: www.government.ru/orders/13808.

⁶ www.mwp2014.com.

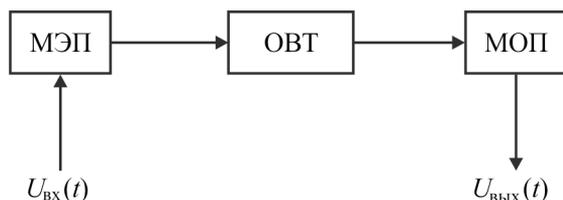


Рис. 4. Схема структурная РФАТ: МОП – модуль оптоэлектронного преобразования, МЭП – модуль электрооптического преобразования, ОВТ – оптоволоконный тракт

ЛДПМ (рис. 5, а). В случае реализации внешней модуляции (рис. 5, б) в состав МЭП входит источник оптического излучения (ИОС) и электрооптический модулятор (ЭОМ). Как правило, в качестве ИОС используются лазерные диоды (ЛД), а в качестве ЭОМ – либо электропоглощающие модуляторы (ЭПМ), либо «интерференционные» ЭОМ. Принцип действия ЭПМ основан на эффекте Франца – Келдыша [7]. «Интерференционные» ЭОМ, как правило, реализованы по принципу интерферометра Маха-Цандера, а воздействие электрического сигнала на оптический осуществляется с использованием эффекта Поккельса [8]. Такие ЭОМ называют модуляторами Маха – Цандера (ММЦ). В качестве МОП, как правило, используются ФД (рис. 5, в), на электрическом выходе которых выделяется протектированный сигнал $U_{\text{вых}}(t)$. В качестве ОВТ в подавляющем большинстве случаев может использоваться обычное «коммерческое» одномодовое волокно типа SMF-28⁷.

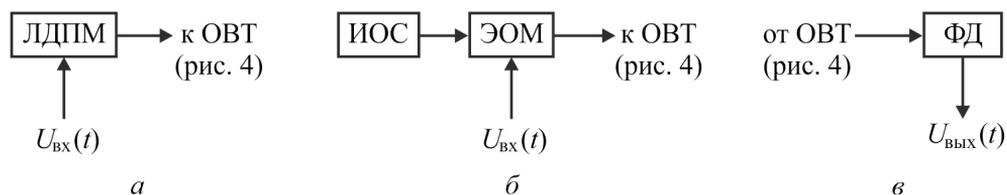


Рис. 5. Схемы структурные МЭП и МОП (см. рис. 4): а – МЭП с прямой модуляцией; б – МЭП с внешней модуляцией; в – МОП: ИОС – источник оптического сигнала, ЛДПМ – лазерный диод с прямой модуляцией, ФД – фотодетектор, ЭОМ – электрооптический модулятор

⁷ www.corning.com.

В последующих статьях авторы рассмотрят особенности, достоинства и недостатки прямой и внешней модуляции, а также ЭПМ, ММЦ и других видов ЭОМ. А сейчас мы можем констатировать следующее: оптимальным вариантом при реализации широкополосных и сверхширокополосных РФАТ является использование МЭП с внешним видом модуляции и ЭОМ в виде ММЦ. Последнее обусловлено тем, что такая реализация РФАТ позволяет получить максимальную широкополосность: от постоянного тока до 70 ГГц и выше⁸; минимальные коэффициенты шума: ниже 10 дБ [9]; максимальные коэффициенты передачи ($K_{\Pi} = 20\lg(U_{\text{вых}}(t)/U_{\text{вх}}(t))$): до 0 дБ и выше [9, 10] – и это без использования каких-либо малозумящих высокочастотных усилителей на входах и выходах РФАТ, а также оптических усилителей между МЭП и МОП. Поэтому в большинстве случаев мы будем рассматривать РФАТ, которые реализованы так, как показано на рис. 6.

Такие РФАТ могут использоваться вместо обычных высокочастотных коаксиальных кабелей (КК). Эффект от замены одного из самых лучших и самых высокочастотных на настоящий момент КК типа LL160 фирмы Harbour Industries⁹ длиной 30 м на РФАТ с такой же длиной ОВТ (см. рис. 6) проиллюстрирован на рис. 7.

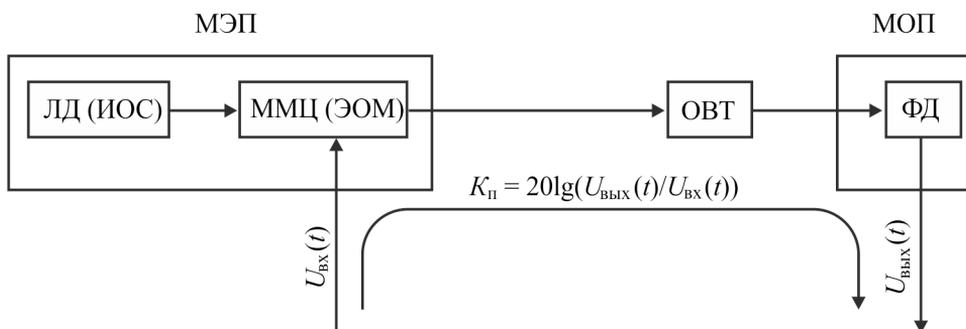


Рис. 6. Типичная схема структурная РФАТ (см. рис. 4) с внешней модуляцией: ИОС – источник оптического сигнала; ЛД – лазерный диод; ММЦ – модулятор Маха – Цандера; МОП – модуль оптоэлектронного преобразования; МЭП – модуль электрооптического преобразования; ОВТ – оптоволоконный тракт; ФД – фотодетектор; ЭОМ – электрооптический модулятор

⁸ www.gigoptix.com, www.eospace.com, www.u2t.com.

⁹ www.harbourind.com.

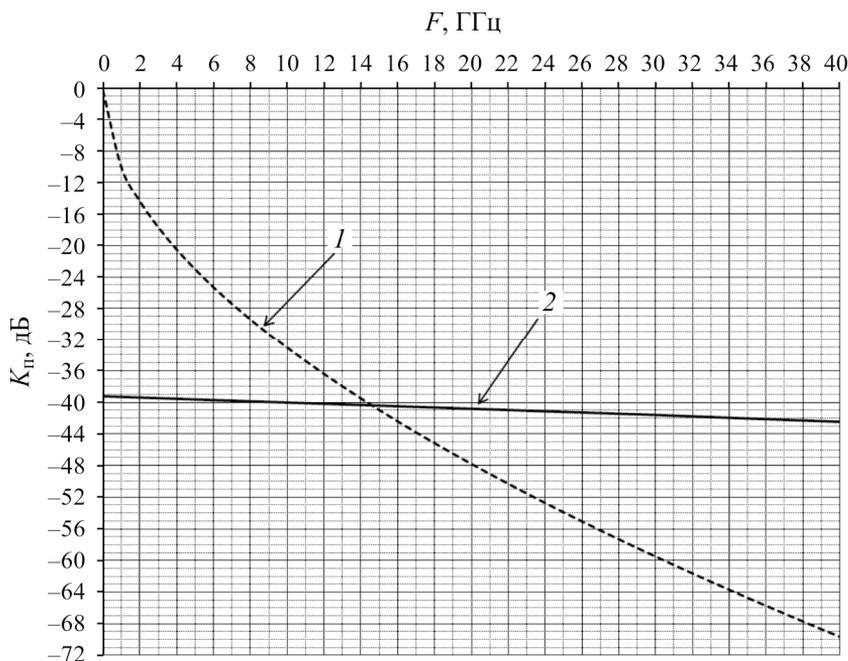


Рис. 7. Частотные зависимости K_n высокочастотного коаксиального кабеля (кривая 1) и сверхширокополосного РФАТ (кривая 2)

Из рис. 7 видно, при переходе от КК к РФАТ мы увеличиваем минимальный K_n почти на 30 дБ (!), но главным преимуществом в данном случае является не увеличение K_n , а уменьшение неравномерности K_n в указанном ДРЧ: с ~ 70 до ~ 3 дБ. Это означает, что по РФАТ, в отличие от КК, можно передавать сверхширокополосные сигналы с минимальными искажениями спектра, в частности, субнаносекундные радиоимпульсы от удаленных относительно простых и компактных антенных постов (АП), расположенных по периметру, например, «большого» самолета (рис. 8) к центральному посту (ЦП).

Этот ЦП можно расположить в относительно комфортных условиях внутри фюзеляжа, при этом не особо ограничивая габариты. Поэтому появляется возможность создать в ЦП мощнейшее устройство обработки принятых сигналов и тем самым возможность увеличить эффективность РЭС (РЭБ, РЭП, РЭР или РЛС), для реализации которой был использован вышеупомянутый сверхширокополосный РФАТ. Также с большой долей уверенности можно утверждать, что аналоговые РФАТ найдут широкое применение при создании перспективных образцов различных фазированных антенных решеток [11–13].

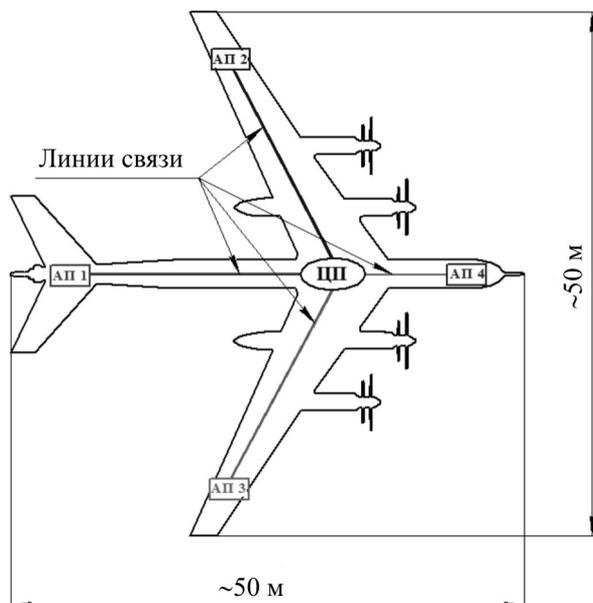


Рис. 8. Размещение АП и ЦП на «большом» самолете

Необходимо отметить, что приведенную на рис. 7 АЧХ будет иметь РФАТ, изготовленный с применением общедоступной «коммерческой» РКБ. В случае использования «специальной» РКБ коэффициент передачи РФАТ, как было сказано выше [9, 10], может быть увеличен на несколько порядков – вплоть до положительных значений.

Одними из лидеров на этом рынке РКБ является фирма Photonic Systems, которая в настоящий момент серийно производит, например, так называемые фотонные линки (*photonic links*) – пары МЭП и МОП (см. рис. 4) – серии PSI-2600¹⁰ с ДРЧ до 20 ГГц (рис. 9), а в 2013 г. сотрудники этой фирмы сообщили о создании линка с ДРЧ до 100 ГГц [14].

Необходимо отметить, что рассказ об аналоговых РФАТ будет не полным, если не рассмотреть один из наиболее оригинальных вариантов реализации такого тракта, который был предложен в [15]. В данном случае мы имеем дело с внешней модуляцией (рис. 10), но осуществляется она и не в ЭПМ, и не в ММЦ, а в так называемой электрооптической антенне. Здесь, как и в ММЦ, воздействие электрического сигнала на оптический осуществляется с использованием эффекта Поккельса, но при этом модулирующий электрический сигнал, в отличие

¹⁰ www.photonicsinc.com.



Рис. 9. Фотонные линки производства Photonic Systems

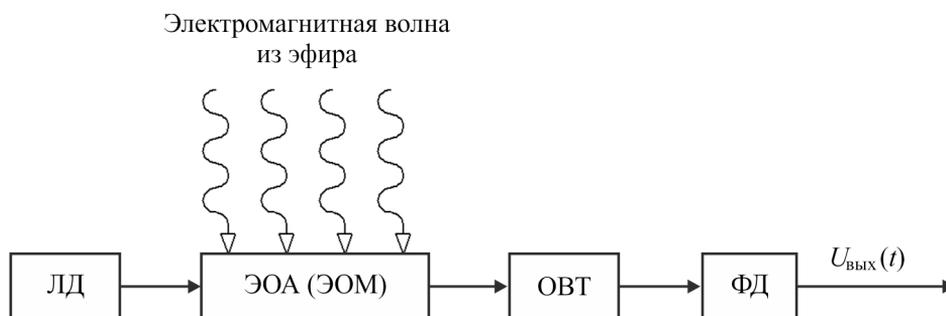


Рис. 10. РФАТ с ЭОМ в виде электрооптической антенны: ЛД – лазерный диод; ОВТ – оптоволоконный тракт; ФД – фотодетектор; ЭОА – электрооптическая антенна; ЭОМ – электрооптический модулятор

от ММЦ, представляет собой «неканализованную» электромагнитную волну. Предложенное техническое решение позволяет создавать так называемые полностью неэлектронные входные каскады, в которых отсутствует гальваническая связь между металлическими элементами антенны (которые вообще могут отсутствовать) и входными клеммами полупроводниковых малошумящих усилителей, которые, как правило, устанавливаются на входах высокочувствительных РЭС для ВСТ. Поэтому такие РФАТ (см. рис. 10) могут выполнять функцию защитных устройств входных трактов РЭС от воздействия мощных электромагнитных излучений. В настоящий момент эти защитные устройства становятся крайне актуальными из-за появления так называемых

мого электромагнитного или радиочастотного оружия [16], действующие образцы которого были разработаны, например, в рамках Counter-electronics High-powered Microwave Advanced Missile Project (CAMP), проводимого корпорацией Boeing по заказу Air Force Research Laboratory (AFRL)¹¹. К сожалению, пока такие защитные устройства, вероятнее всего, являются относительно узкополосными.

Очевидно, что потенциальный рынок РФАТ, в том числе широкополосных и сверхширокополосных, огромен, даже несмотря на то, что применяться эти РФАТ будут в подавляющем большинстве случаев для создания ВСТ. Поэтому можно утверждать, что и в настоящий момент, и в ближайшем будущем основным объектом приложения методов и средств радиопhotоники будут именно сверхширокополосные РФАТ ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ.

4. Радиопhotонные аналоговые процессоры

Функции различных радиопhotонных аналоговых процессоров (РАП) могут выполнять РФАТ. При определенном подборе РКБ и ФКБ, а также энергетических режимов их эксплуатации РФАТ могут выполнять функции сверхширокополосных усилителей [9, 10], умножителей частоты на 2 [10], фазовых манипуляторов 0–180° [17] и высокочувствительных амплитудных детекторов [17], ДРЧ которых полностью перекрывает ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и часть ММ-ДДВ.

Изменяя длину ОВТ (см. рис. 4, 6), можно изменять время прохождения модулированного оптического сигнала между МЭП и МОП и, как следствие, время прохождения высокочастотного электрического сигнала от входа МЭП до выхода МОП. Поэтому РФАТ может выполнять функцию сверхширокополосной радиопhotонной линии задержки, время задержки (τ) в которой будет довольно слабо зависеть от частоты электрического сигнала в широком диапазоне частот. При этом величина τ может достигать нескольких десятков микросекунд¹².

В [18] предложено между МЭП и МОП разместить еще один ММЦ так, как показано на рис. 11. Такой РФАТ может выполнять функцию сверхширокополосного радиопhotонного преобразователя частоты – смесителя. Рассмотрим принцип работы такого смесителя.

¹¹ www.fbo.gov.

¹² www.centervospi.ru.

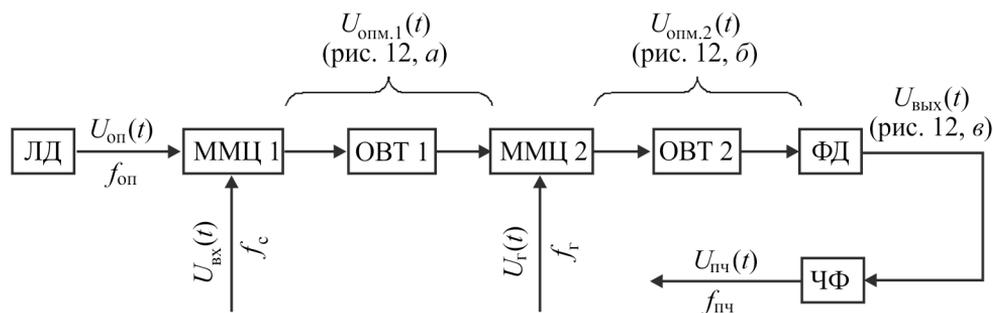


Рис. 11. Схема структурная сверхширокополосного радиофотонного смесителя: ЛД – лазерный диод; ММЦ 1, ММЦ 2 – модуляторы Маха – Цандера; ОВТ 1, ОВТ 2 – оптоволоконные тракты; ФД – фотодетектор; ЧФ – частотный фильтр

Сначала входным электрическим сигналом $U_{\text{вх}}(t)$ с частотой f_c в ММЦ 1 осуществляется амплитудная модуляция оптического сигнала от ЛД $U_{\text{оп}}(t)$ с частотой $f_{\text{оп}}$. Продуктом этой модуляции является амплитудно-модулированный оптический сигнал $U_{\text{опм.1}}(t)$, в спектре которого присутствуют три основные спектральные составляющие (рис. 12, а): $(f_{\text{оп}})$, $(f_{\text{оп}} + f_c)$ и $(f_{\text{оп}} - f_c)$. Далее (см. рис. 11) этот оптический сигнал с выхода ММЦ 1 через ОВТ 1 поступает на оптический вход ММЦ 2, на СВЧ-вход которого поступает сигнал гетеродина $U_r(t)$ с частотой f_r . В ММЦ 2 осуществляется вторичная модуляция оптического сигнала, и продуктом этой модуляции является также модулированный оптический сигнал $U_{\text{опм.2}}(t)$, спектр которого содержит уже девять основных спектральных составляющих (рис. 12, б): $(f_{\text{оп}})$, $(f_{\text{оп}} + f_c)$, $(f_{\text{оп}} - f_c)$, $(f_{\text{оп}} + f_r)$, $(f_{\text{оп}} - f_r)$, $(f_{\text{оп}} + f_c - f_r)$, $(f_{\text{оп}} + f_c + f_r)$, $(f_{\text{оп}} - f_c - f_r)$ и $(f_{\text{оп}} - f_c + f_r)$. Данный оптический сигнал с выхода ММЦ 2 через ОВТ 2 поступает на оптический вход ФД, на электрическом выходе которого формируется электрический выходной сигнал $U_{\text{вых}}(t)$. Спектр последнего содержит четыре основные спектральные составляющие (рис. 12, в): (f_c) , (f_r) , $(f_c + f_r)$, $(f_c - f_r)$. Требуемая спектральная составляющая – выходной сигнал $U_{\text{пч}}(t)$ с частотой $f_{\text{пч}}$ – может быть выделена соответствующим частотным фильтром (ЧФ, см. рис. 11).

Можно предположить, что такие радиофотонные смесители могут иметь ДРЧ по входам $U_c(t)$ и $U_r(t)$ до 100–110 ГГц, а по выходу $U_{\text{вых}}(t)$ – до 70 ГГц и выше.

Однако наиболее типичная схема структурная РАП будет выглядеть так, как показано на рис. 13. В данном случае между МЭП и МОП включен модуль аналоговой фотонной обработки (МАФО).

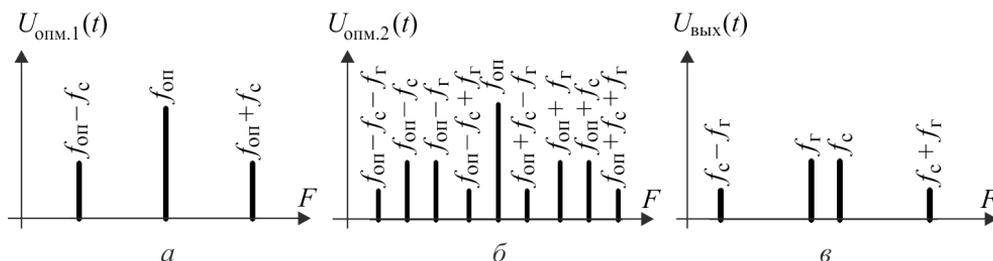


Рис. 12. Спектры сигналов в различных точках тракта сверхширокополосного радиопhotонного смесителя (см. рис. 11)

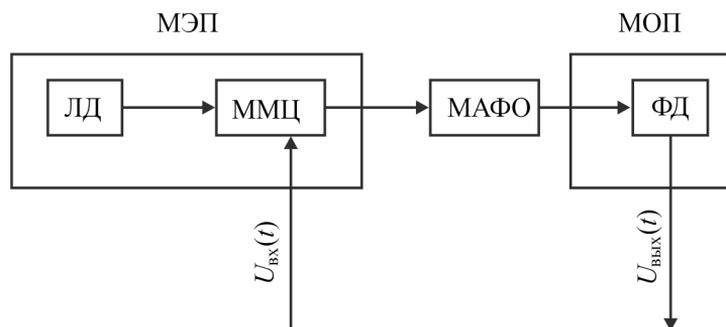


Рис. 13. Типичная структурная РАП: ЛД – лазерный диод; МАФО – модуль аналоговой фотонной обработки; ММЦ – модулятор Маха-Цандера; ФД – фотодетектор

В качестве МАФО может использоваться самая различная ФКБ. Так, например, в [18] описан радиопhotонный приемник, схема структурная которого приведена на рис. 14.

На выходе данного приемника при помощи 16-канального оптического разветвителя, 16 оптических фильтров Фабри – Перо и 16 фотодетекторов из входного потока сигналов СВЧ ($U_{вх}(t)$) формируется 16 выходных квази-НЧ сигналов ($U_{вых1}(t) - U_{вых16}(t)$), амплитуда которых прямо пропорциональна уровню мощности спектральных составляющих в том или ином фрагменте спектра $U_{вх}(t)$. Фактически данный приемник выполняет функцию относительно грубого радиопhotонного Фурье-преобразователя с разрешающей способностью 1 ГГц в полосе частот 16 ГГц. Необходимо отметить, что в настоящий момент существуют такие оптические фильтры, которые позволяют обеспечить разрешающую способность до 200 МГц и менее [19].

В настоящий момент существующая ФКБ, в том числе серийно выпускаемая, позволяет создавать широкую номенклатуру архитектур МАФО, предназначенных для аналоговой обработки модулированных

в МЭП оптических сигналов и в частотной, и во временной области. Возможные варианты реализации таких МАФО будут рассматриваться в последующих статьях.

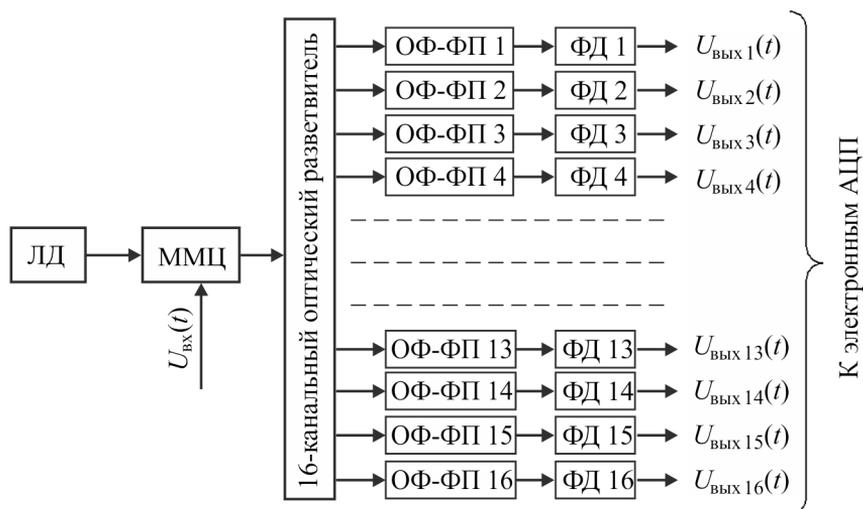


Рис. 14. Структурная схема радиофотонного многоканального приемника: ЛД – лазерный диод; ММЦ – модулятор Маха – Цандера; ОФ-ФП 1 – ОФ-ФП 16 – оптические фильтры Фабри – Перо; ФД 1 – ФД 16 – фотодетекторы

В заключение разговора об РАП необходимо отметить следующее. В настоящий момент на рынке предлагаются пакеты систем автоматизированного проектирования (САПР), предназначенных для проектирования различных радиофотонных устройств, в том числе РАП, например пакет САПР фирмы Optiwave Systems¹³. Появление таких САПР на рынке, а также перечень пользователей этих САПР – от General Electric и Boeing до Alcatel-Lucent и Hitachi, от Lockheed Martin и Photonic Systems до Sony и Intel – говорит об актуальности разработки радиофотонных аналоговых устройств вообще и РАП в частности.

5. Радиофотонные автогенераторы гармонических сигналов

В некоторых источниках [20] описаны так называемые оптоэлектронные генераторы (ОЭГ) или, иначе, радиофотонные автогенераторы

¹³ www.optiwave.com.

гармонических сигналов (РАГС). На рис. 15 приведена упрощенная схема такого РАГС.

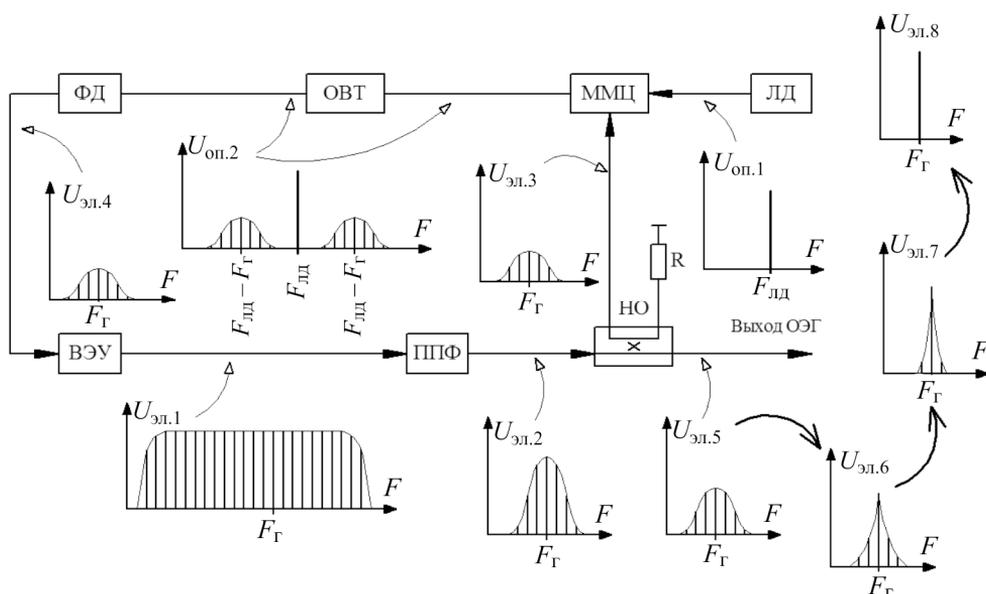


Рис. 15. Структурная схема простейшего РАГС: ВЭУ – высокочастотный электронный усилитель; ЛД – лазерный диод; ММЦ – модулятор Маха – Цандера; НО – направленный ответвитель; ОВТ – оптоволоконный тракт; ППФ – полоснопропускающий фильтр; ФД – фотодетектор

Принцип работы РАГС можно описать следующим образом. Широкополосный шумовой сигнал ($U_{эл.1}$) с выхода высокочастотного электронного усилителя (ВЭУ) поступает на вход полосно-пропускающего фильтра (ППФ). Этот ППФ формирует узкополосный шумовой сигнал ($U_{эл.2}$). Часть этого шумового сигнала ($U_{эл.3}$) ответвляется направленным ответвителем (НО) и поступает на электрический вход ММЦ. На оптический вход ММЦ поступает сигнал от ЛД ($U_{оп.1}$). На выходе ММЦ формируется модулированный сигналом $U_{эл.3}$ оптический сигнал ($U_{оп.2}$), который через отрезок ОВТ поступает на вход ФД. На выходе фотодетектора формируется электрический сигнал $U_{эл.4}$, который поступает на вход ВЭУ. Таким образом формируется цепь положительной обратной связи и создаются условия для самовозбуждения автогенератора. В роли «резонансного» элемента этой обратной связи выступает отрезок ОВТ. Если напряжение питания на ВЭУ подаётся после того, как поданы напряжения питания на ЛД и ММЦ, то в первый момент времени ширина спектра сигнала на выходе прямого

плеча НО ($U_{эл.5}$) будет равна ширине полосы пропускания ППФ, но после каждого цикла прохождения электрических и оптических сигналов по трактам между выходом ВЭУ и его входом ширина спектра на выходе прямого плеча НО – и собственно на выходе РАГС – будет все уже и уже, а амплитуда спектральных составляющих в окрестностях требуемой частоты генерации F_G – все больше ($U_{эл.6}$, $U_{эл.7}$, $U_{эл.8}$).

Используя такое схемотехническое решение, можно получать гармонические сигналы, параметры спектра которых в ДД-ДДВ, СМ-ДДВ и даже ММ-ДДВ могут быть соизмеримы с параметрами низкочастотных автогенераторов метрового ДДВ, частоты которых стабилизируются кварцевыми резонаторами. А если в цепи обратной связи использовать более добротные, чем отрезки ОВТ, фотонные элементы, то параметры спектра выходных сигналов могут быть улучшены на порядок.

Необходимо отметить, что, используя приведенное на рис. 15 схемотехническое решение, можно создавать не только РАГС с фиксированной F_G , но и перестраиваемые РАГС. Перестройка частоты в таких РАГС может осуществляться, например, при помощи перестраиваемого ППФ, а также с использованием некоторых других способов [21].

Одним из лидеров на рынке таких высокостабильных РАГС ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ является фирма OEwaves¹⁴.

Результаты экспериментальных и теоретических работ по данной тематике авторы планируют представить в последующих статьях.

6. Радиофотонные аналого-цифровые преобразователи

С высокой долей уверенности можно утверждать, что наибольший эффект применения методов и средств радиофотоники в трактах РЭС для ВСТ может быть достигнут в том случае, если будут созданы сверхширокополосные радиофотонные аналого-цифровые преобразователи (РАЦП) с ДРЧ, которые перекрывают часть ДМ-ДДВ, весь СМ-ДДВ и часть ММ-ДДВ. При этом речь идет о таких АЦП, в которых дискретизация входного электрического сигнала осуществляется в соответствии с требованиями теоремы Котельникова [22]. На уровне физического эксперимента это уже возможно [23]. Также авторам известно о попытках создания полупроводниковых РКБ и ЭКБ, а также ФКБ [24], необходимых для создания дееспособных промышленных

¹⁴ www.oewaves.com.

образцов РАЦП. К сожалению, данная тематика является для отечественных ученых и инженеров абсолютно новой, а решение проблем, которые могут возникнуть при создании РАЦП, возможно только на таком уровне развития науки техники, на который отечественным специалистам еще только предстоит выйти. Поэтому в данный момент мы можем только обозначить в самых общих чертах перечень возможных схмотехнических решений, а также перечень тех проблем, которые придется решить в самых различных областях науки и техники. В рамках одной статьи это сделать невозможно, и потому авторы планируют посвятить тематике РАЦП серию обзорных статей.

7. Заключение

Приведенные выше примеры реализации различных радиофотонных устройств наглядно показывают, что радиофотоника в большей степени является разделом радиоэлектроники ДМ-ДДВ, СМ-ДДВ и ММ-ДДВ или, как принято это назвать в отечественном профессиональном сообществе, техники СВЧ (что является абсолютно «ненормативным» термином¹⁵). Однако для решения проблем техники СВЧ методами и средствами радиофотоники необходимо создать высокотехнологичную и наукоемкую РКБ, а также весьма «эксклюзивную» ФКБ. Все это потребует проведения широкого спектра научно-исследовательских работ в самых различных областях науки и техники. Для проведения таких работ придется привлекать значительные финансовые и, что самое главное, высококвалифицированные кадровые ресурсы. И если с первым в последнее время дела у нас обстоят все лучше и лучше, то со вторым – все хуже и хуже. И потому мы не можем себе позволить незначительное использование наших весьма скудных кадровых ресурсов. В то же время одной из важнейших задач на данном этапе развития радиофотоники в нашей стране является даже не решение каких-то конкретных научных и технических проблем, а формирование перечня тех проблем, которые являются актуальными для развития радиофотоники. Авторы статьи надеются, что сотрудничество с журналом «Прикладная фотоника» будет способствовать решению данной задачи.

¹⁵ ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения.

Список литературы

1. Белкин М.Е., Сигов А.С. Новое направление фотоники – сверх-высокочастотная оптоэлектроника // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54, № 8. – С. 901–914.
2. Червяков Г.Г., Роздобудько В.В. Введение в радиооптику. – М.: Учебная литература, 2009. – 260 с.
3. Акустооптические анализаторы спектра радиосигналов / А.П. Белошицкий, В.М. Комаров, Б.П. Кречотень, Б.Т. Сапожников // Зарубежная радиоэлектроника. – 1979. – № 3. – С. 51–70.
4. Патент РФ № 213019. Акустооптический измеритель параметров радиосигналов / В.В. Роздобудько, Г.С. Крутччинский; опубл. 10.05.1999.
5. Зверев В.А. Радиооптика. Преобразование сигналов в радио и оптике. – М.: Сов. радио, 1975.
6. Корнблит С. СВЧ оптика. Оптические принципы в приложении к конструированию СВЧ антенн: пер. с англ. / под. ред. О.П. Фролова. – М.: Связь, 1980. – 360 с.
7. Исследование параметров модуляторов лазерного излучения на эффекте Франца-Келдыша / А.Н. Георгобидани [и др.] // Квантовая электроника. – 1980. – Т. 7, № 3. – С. 624–626.
8. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – 3-е изд. – Т. IV. Оптика. – М.: Физматлит, 2002. – 792 с.
9. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques / E. Ackerman, G. Betts, W. Burns, J. Campbell, C. Cox, N. Duan, J. Prince, M. Regan, H. Rousell // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Honolulu, Hawaii. – June 2007. – P. 51–54.
10. Вольхин Ю.Н., Гамиловская А.В. О возможности реализации сверхширокополосных аналоговых радиофотонных трактов диапазона СВЧ с положительными коэффициентами передачи // Материалы XVIII координационного научно-технического семинара по СВЧ-технике (Нижегородская область, п. Хахалы). – Хахалы, 2013.
11. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. – М.: Радиотехника, 2004. – 488 с.
12. Optical techniques to feed and control GaAs MMIC modules for phased array antenna applications / K.B. Bhasin, G. Anzic, R.R. Kunath, D.J. Connolly // Proc. AIAA 11th Communication Satellite Systems Conf. – New York, 1986. – P. 506–513.

13. Lee J.J. RF Photonics for Beamforming and Array Applications // Paper presented at the RTO SET Lecture Series on "Optics Microwave Interactions". Held in Jouli en Josas. France, 2–3 September 2002; Duisburg Germany, 5–6 September 2002; Budapest, Hunganu, 9–10 September 2002, and published in RTO-EN-028.

14. Cox C.H., Ackerman E.I. A Path to Realizing High-Performance 100-GHz Analog Links // IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP). – 2013.

15. Patent № US 7 450 790 B1. Non-electronic radio frequency front-end with immunity to electromagnetic pulse damage / Bahram Jalali, Chia-Jen Hsu, Bijan Houshmand.

16. Прищепенко А. Электромагнитное оружие: аннибал у ворот // Мир Оружия. – 2005. – № 2.

17. Белоусов А.А., Вольхин Ю.Н., Дубровская А.А. Обзор и исследование возможных вариантов реализации сверхширокополосных детекторов, смесителей и других аналоговых процессоров диапазона СВЧ с использованием методов и средств радиопотоники // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: материалы науч.-техн. конф. – Омск: ЦКБА, 2014. – С. 37–61.

18. Manka M.E. Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications // Microwave photonics, 2008. Jointly held with the 2008 asia-pasific microwave photonics conference. DOI: 10.1109/MWP.2008.4666690.

19. Chan E.H.W., Minasian R.A. Tuneable High-Q Microwave Photonic Bandpass Filter Without Coherent Interference Limitations // The 40th European Microwave Conference (EuMC 2010). EuMC Poster18: New and Emerging Technologies and Materials. – 2010.

20. Opto-electronic Oscillator: Applications to Sensors / N.L. Duy, B. Journet, I. Ledoux-Rak, J. Zyss, L.V. Hai Nam, V.V. Luc // IEEE International Meeting on Microwave Photonics. – 2008.

21. Ultra-Broadband and Low Phase Noise Photonic Millimeter-Wave Generation / S. Fedderwitz, V. Rymanov, M. Weiß, A. Stöhr, D. Jäger, A.G. Steffan, A. Umbach // IEEE International Meeting on Microwave Photonics. – 2008.

22. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: – М.: Высшая школа, 1983. – 536 с.

23. Optically Sampled Analog-to-Digital Converters / P.W. Juodawlkis, J.C. Twitchell, G.E. Betts, J.J. Hargreaves, R.D. Younger, J.L. Wasserman,

F.J. O'donnell, K.G. Ray, R.C. Williamson // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – Vol. 49, № 10, part 2. – P. 1840–1853.

24. Patent 6,326,910 B1, USA. Photonic analog-to-digital conversion using light absorbers / Hayduk [et al.]. 2001.

References

1. Belkin M.E., Sigov A.S. Novoe napravlenie fotoniki – sverkhvysokochastotnaia optoelectronika [The new direction of photonics – the ultra-high frequency optoelectronics]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2009, vol. 54, no. 8, pp. 901-914.

2. Chervyakov G.G., Rozdobudko V.V. Vvedenie v radiooptiku [Introduction to radio optics]. Moscow: Uchebnaia literatura, 2009, 260 p.

3. Beloshitskii A.P., Komarov V.M., Krekoten' B.P., Sapozhnikov B.T. Akustoopticheskie analizatory spektra radiosignalov [Acoustooptical radio signal spectrum analyzers]. *Zarubezhnaia radioelektronika*, 1979, no. 3, pp. 51-70.

4. Rozdobudko V.V., Krutchinskii G.S. Acustoopticheskkii izmeritel' parametrov radiosignalov [Acoustooptical radio signal meter]. *RU Patent No. 2130192*, published on 10.05.1999.

5. Zverev V.A. Radiooptika. Preobrazovanie signalov v radio i optike [Radio optics. Signal conversion in radio and optic areas]. Moscow: Sovetskoe radio, 1975.

6. Kornblit S. SVCh-optika. Opticheskie printsipy v prilozhenii k konstruirovaniiu SVCh-antenn [Microwave Optics. The Optics of Microwave Antenna Design]. Ed. O.P. Frolov. Moscow: Sviaz', 1980, 360 p.

7. Georgobiani A.N. [et. al.] Issledovanie parametrov modulatorov lasernogo izlucheniia na effekte Franca-Keldisha [Parameter analysis of laser emission modulators on the basis of Frants-Keldysh effect]. *Kvantovaia elektronika*, 1980, vol. 7, no. 3, pp. 624-626.

8. Sivukhin D.V. Sivukhin D.V. Obshchii kurs fiziki. Tom IV. Optika [General course of physics. Vol. IV. Optics]. Moscow: Fizmatlit, 2002. – 792 p.

9. Ackerman E., Betts G., Burns W., Campbell J., Cox C., Duan N., Prince J., Regan M., Roussell H. Signal-to-noise performance of two analog photonic links using different noise reduction techniques. *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* Honolulu, Hawaii, 2007, pp. 51-54.

10. Vol'khin Iu.N., Gamilovskaia A.V. O vozmozhnosti realizatsii sverkhshirokopolosnykh analogovykh radiofotonnykh traktov diapazona SVCh

s polozhitel'nymi koeffitsientami peredachi [Ability to implement ultra-wideband microwave analog radiophotonic transmission lines with positive coefficients]. *Materialy XVIII koordinatsionnogo nauchno-tekhnicheskogo seminaru po SVCh-tekhnikе*. Nizhny Novgorod region, Hahali, 2013.

11. Voskresenskogo D.I., Kanashchenkova A.I. Aktivnye fazirovannye antennye reshetki [Active phased array antennas]. Moscow: Radiotekhnika, 2004, 488 p.

12. Bhasin K.B., Anzic G., Kunath R.R., Connolly D.J. Optical technique to feed and control GaAs MMIC modules for phased array antenna applications. *Proc. AIAA 11th Communication Satellite Systems Conf., March 1986*. New York, 1986, pp. 506-513.

13. Lee J.J. RF Photonics for Beamforming and Array Applications. Paper presented at the RTO SET Lecture Series on "Optics Microwave Interactions". Held in Jouli en Josas. France, 2–3 September 2002; Duisburg Germany, 5–6 September 2002; Budapest, Hunganu. 9–10 September 2002, and published in RTO-EN-028.

14. Cox C.H., Ackerman E.I. A Path to Realizing High-Performance 100-GHz Analog Links. *IEEE Avionics, Fiber-Optics and Photonics Conference (AVFOP)*, 2013.

15. Bahram Jalali, Chia-Jen Hsu, Bijan Houshmand. Non-electronic radio frequency front- end with immunity to electromagnetic pulse damage. *Patent № US 7 450 790 B1*.

16. Prishchepenko A. Elektromagnitnoe oruzhie: annibal u vorot [Electromagnetic arms: Annibal at gate]. *Mir Oruzhiia*, 2005, no. 2.

17. Belousov A.A., Vol'khin Iu.N., Dubrovskaya A.A. Obzor i issledovanie vozmozhnykh variantov realizatsii sverkhshirokopolosnykh detektorov, smesitelei i drugikh analogovykh protsessorov diapazona SVCh s ispol'zovaniem metodov i sredstv radioponiки [Possible implementation on of ultra-wideband microwave detectors, mixers and other analog processors using methods and means of radiophotonics]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Obmen opytom v oblasti sozdaniia sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh system"*. Omsk, 2014.

18. Manka M.E. Microwave Photonics for Electronic Warfare Applications. *Microwave photonics*, 2008. Jointly held with the 2008 asia-pasific microwave photonics conference. DOI: 10.1109/MWP.2008.4666690.

19. Chan E.H.W., Minasian R.A. Tuneable High-Q Microwave Photonic Bandpass Filter Without Coherent Interference Limitations. *The 40th*

European Microwave Conference (EuMC 2010). EuMC Poster18: New and Emerging Technologies and Materials, 2010.

20. Duy N.L., Journet B., Ledoux-Rak I., Zyss J., Hai Nam L.V., Luc V.V. Opto-electronic Oscillator: Applications to Sensors. *IEEE International Meeting on Microwave Photonics, 2008.*

21. Fedderwitz S., Rymanov V., Weiß M., Stöhr A., Jäger D., Steffan A.G., Umbach A. Ultra-Broadband and Low Phase Noise Photonic Millimeter-Wave Generation. *IEEE International Meeting on Microwave Photonics, 2008.*

22. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio engineering circuits and signals]. Moscow: Visshaia shkola, 1983, 536 p.

23. Juodawlkis P.W., Twitchell J.C., Betts G.E., Hargreaves J.J., Younger R.D., Wasserman J.L., O'donnell F.J., Ray K.G., Williamson R.C. Optically Sampled Analog-to-Digital Converters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, vol. 49, no. 10, part 2, pp. 1840-1853.*

24. Hayduk [et al.]. Photonic analog-to-digital conversion using light absorbers. *Patent 6,326,910 B1, USA. 2001.*

Получено 17.10.2014

УДК 681.7.068.4

В.П. Первадчук, А.Р. Давыдов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Предлагается имитационная модель процесса вытяжки кварцевых оптических волокон и на основе модели анализируется управление процессом.

Ключевые слова: вытяжка оптических волокон, имитационная модель процесса, управление процессом вытяжки.

V.P. Pervadchuk, A.R. Davydov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

SIMULATION MODEL OF QUARTZ OPTICAL FIBERS EXTRACTION PROCESS

Simulation model of quartz optical fibers extraction process is offered in this article and managing of the process is analyzing, basing on this model.

Keywords: fiber optic extract, simulation model of a process, managing of extraction process.

В статье рассматриваются вопросы анализа и управления процессом вытяжки оптических волокон из кварцевой заготовки с использованием имитационной модели процесса. Под имитационной моделью процесса вытяжки будем понимать его компьютерную модель, позволяющую при заданных условиях получать численные реализации необходимых характеристик готового волокна, а также параметров технологического процесса. Объект моделирования будем рассматривать как систему, состоящую из заготовки волокна, печи, приемного устройства и собственно волокна. Соответственно, параметрами процесса будут геометрическая форма заготовки, скорость ее подачи в печь, скорость вытяжки и диаметр кварца готового волокна. Последний параметр является целевым, поскольку удержание диаметра в требуемом

диапазоне является необходимым условием получения качественного волокна [1].

Анализ реальных технологических процессов показывает, что изменение диаметра волокна обусловлено несколькими составляющими. Детерминированное изменение диаметра происходит вследствие контролируемого изменения геометрии заготовки, скорости ее подачи и скорости вытяжки волокна и может быть рассчитано на основании закона сохранения массы. Автокорреляционная составляющая изменения диаметра волокна отражает инерционность процесса, влияние его предыдущих значений. Статистический анализ показывает, что значимыми являются коэффициенты авторегрессии, рассчитанные со сдвигом в несколько десятков наблюдений. Стохастическая составляющая изменения диаметра кварца обусловлена наличием случайных, неконтролируемых причин: неоднородность свойств заготовки, колебания температуры печи, неконтролируемые колебания скорости подачи заготовки и скорости вытяжки. Эта составляющая может быть описана как система некоррелированных нормально распределенных величин со средним, равным нулю, и постоянной дисперсией, определенной при анализе данных реальных процессов.

Таким образом, принята следующая модель изменения диаметра волокна:

$$d_t = \sqrt{\frac{D_t^2 V_t}{v_t}} - \mu + \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i d_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где d_t – величина диаметра кварца в момент времени t ; D_t – диаметр заготовки в момент времени t ; V_t – скорость подачи заготовки в момент времени t ; v_t – скорость вытяжки в момент времени t ; μ – номинальное значение диаметра кварца; d_{t-i} – величина диаметра кварца в момент времени $t-i$; α_i – коэффициенты авторегрессии; k – порядок модели авторегрессии; ε_t – стохастическая составляющая изменения диаметра кварца.

Для имитации процесса вытяжки оптического волокна необходимо задать форму и размеры заготовки, скорость подачи заготовки и рассчитать скорость вытяжки, соответствующую номинальному диаметру кварца. Коэффициенты авторегрессии и параметры распределения стохастической составляющей рассчитываются по данным реаль-

ных выборок. Моделирование стохастической составляющей представляет собой задачу статистического моделирования случайной величины с заданным законом и параметрами распределения. Для моделирования нормального распределения используется «метод полярных координат» [2]. Моделирование процесса ведется по времени. С использованием взаимосвязи длины волокна со скоростью и временем вытяжки диаметр кварца пересчитывается на длину волокна. В результате для заданного набора входных параметров получаем значения диаметра кварца по длине волокна и скорости вытяжки во времени, соответствующие процессу вытяжки волокна. Различные прогоны модели соответствуют независимым повторениям процесса при заданных условиях. Адекватность результатов моделирования проверяется путем сравнения выборок модельных значений диаметра с реальными данными. Наблюдается хорошее соответствие по средним значениям дисперсии, а также по величинам коэффициентов автокорреляции [3].

В компьютерной программе реализовано управление процессом вытяжки с использованием принципа обратной связи. При отклонении значений диаметра от номинального значения на величину, больше допустимой, производится соответствующая корректировка скорости вытяжки. При этом возможно использование временной задержки реакции системы на изменение диаметра. В качестве управляющего контура выбран пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД) [4], функцию управления которого $u(t)$ можно представить в виде

$$u(t) = K_p \left(e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (2)$$

где K_p , K_{ip} , K_{dp} – коэффициенты соответственно пропорционального, интегрального и дифференциального звеньев; $e(t)$ – разность между номинальным и текущим значением диаметра. Поскольку диаметр волокна измеряется дискретно, функция также используется в дискретном виде:

$$U(n) = K_p E(n) + K_p K_{ip} T \sum_{k=0}^n E(k) + \frac{K_p K_{dp}}{T} (E(n) - E(n-1)), \quad (3)$$

где T – время дискретизации сигнала; $E(n)$ – дискретная функция ошибки.

При программной реализации ПИД-регулятора использована рекуррентная формула расчета управляющей функции $U(n)$:

$$U(n) = U(n-1) + K_p(E(n) - E(n-1)) + K_p K_{ip} T E(n) + \frac{K_p K_{dp}}{T} (E(n) - 2E(n-1) + E(n-2)), \quad (4)$$

с начальными условиями:

$$U(0) = E(0) = E(-1) = 0.$$

Для эффективной работы регулятора должны быть определены оптимальные значения коэффициентов K_p , K_{ip} , K_{dp} . Для их нахождения используется следующий алгоритм:

- 1) приближенно определяются предельные значения коэффициентов, при которых регулирующая функция принимает большие значения и процесс переходит в неуправляемое состояние;
- 2) полученная область изменения значений коэффициентов разбивается сеткой с малым шагом;
- 3) с использованием значений коэффициентов в узловых точках моделируется процесс и рассчитывается дисперсия значений диаметра;
- 4) по сетке определяются значения коэффициентов, при которых дисперсия минимальна.

На основе имитационной модели проведен анализ эффективности работы контура управления технологического процесса вытяжки кварцевых оптических волокон. Были рассчитаны значения стандартных отклонений диаметра кварца десяти реальных процессов [5]. Затем для этих процессов были подобраны оптимальные значения параметров и наложено управление (4). В табл. 1 приведены значения стандартных отклонений диаметра кварца для реальных и соответствующих модельных процессов.

Из табл. 1 видно, что управление модельным процессом с оптимально подобранными коэффициентами не привело к значительному уменьшению стандартного отклонения диаметра. В некоторых случаях «улучшения» процесса и не потребовалось. Можно сделать вывод, что контур управления технологического процесса вытяжки оптических волокон настроен практически оптимально.

Таблица 1

Значения стандартных отклонений диаметра кварца для реальных процессов вытяжки и модельных процессов с оптимальными коэффициентами управления

Номер процесса	K_p	K_{ip}	K_{dp}	Стандартное отклонение реального процесса	Стандартное отклонение модельного процесса
1	0,0007	0,6	0	0,165	0,163
2	0,0002	1,8	1	0,201	0,199
3	0,0001	5,2	0	0,239	0,230
4	0	0	0	0,198	0,198
5	0,0007	1	0	0,165	0,156
6	0,0002	2	1	0,183	0,182
7	0,0001	3	0	0,181	0,180
8	0,0006	1	0	0,162	0,159
9	0,0001	2	0	0,221	0,220
10	0	0	0	0,194	0,194

Вместе с тем при появлении в процессе особых причин изменчивости управление может не удовлетворять требованиям качества изделия, а кроме того, способствовать ухудшению качества изделия. Низкочастотные возмущения сигнала быстро гасятся регулятором, но часть возмущений имеют период, существенно меньший относительно времени реакции управления. Анализ модельных результатов показывает, что если управление сигналом производится без его предварительной обработки, то из-за запаздывания управляющего воздействия амплитуда высокочастотных колебаний нарастает, как бы точно ни была настроена система ПИД-регулирования. Отнесем к неуправляемым те возмущения, частота которых ν_0 превышает значение

$$\nu_0 = \alpha_0 \frac{1}{T}, \quad (5)$$

где α_0 – константа, не превосходящая единицы; T – время запаздывания.

Отнесем к неуправляемым также те составляющие сигнала d_t , амплитуда отклонения которых меньше погрешности измерительного прибора диаметра E_0 .

К повышению эффективности управления использовано несколько подходов. В первом случае применяется следующий алгоритм. Изменяемая величина диаметра волокна d_t представляется в виде ортогональной системы функций:

$$d_t = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \varphi_n(t). \quad (6)$$

Это возможно, поскольку для любых моментов времени t_1 и t_2 выполняется условие

$$\int_{t_1}^{t_2} [d_t]^2 dt < \infty. \quad (7)$$

Коэффициенты ряда (6) определяются из следующих соотношений:

$$C_n = \frac{1}{\|\varphi_n\|^2} \int_{t_1}^{t_2} d_t \varphi_n(t) dt, \quad (8)$$

$$\|\varphi_n\|^2 = \int_{t_1}^{t_2} \varphi_n^2(t) dt. \quad (9)$$

Определим интервал времени, необходимый для идентификации сигнала d_t , с целью построения функции управления $U(t)$. Для этого воспользуемся анализом автокорреляционной составляющей временного ряда d_t . Автокорреляционный анализ показывает, что статистически значимые изменения значений автокорреляционной функции наблюдаются в диапазоне сдвига до 100 с. Этот период времени используется для преобразования измеряемой величины диаметра в виде (6).

Используем вейвлет-преобразование [6] для представления величины диаметра волокна в виде (6):

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{+\infty}^{-\infty} d_t \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (10)$$

Здесь $W_s(a, b)$ – масштабно временной спектр, являющийся функцией двух аргументов a и b . Параметр a соответствует периоду колебаний, а параметр b – смещению сигнала по оси времени. Функция ψ называется материнским вейвлетом. При вычислениях использован вейвлет Добеши [6].

Численный анализ показал, что для представления диаметра в виде (6) не требуется значительного числа слагаемых. Произведем декомпозицию сигнала d_t на 10 уровней:

$$d_t = a_{10} + \sum_{n=0}^{10} d_n(t). \quad (11)$$

На рис. 1 представлены графики составляющих сигнала d_i .

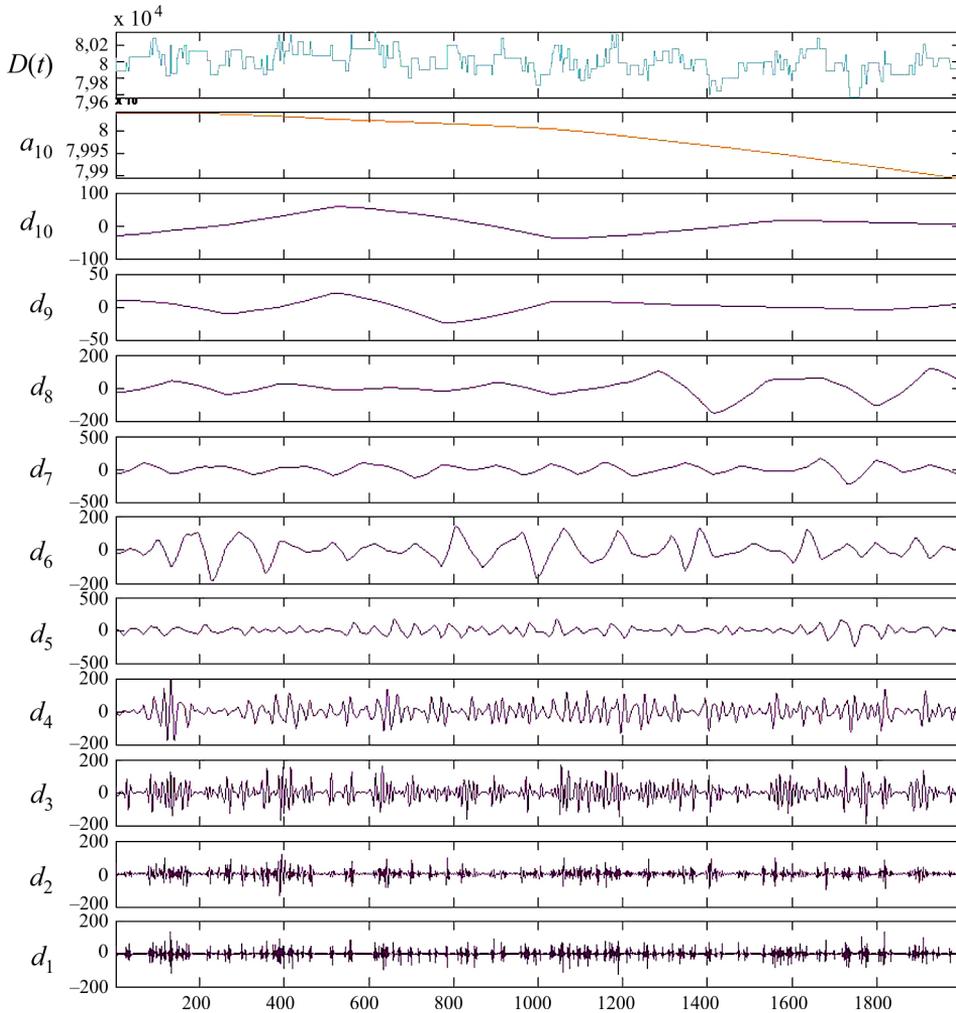


Рис. 1. Декомпозиция сигнала d_i

Для каждого слагаемого ряда определяем амплитуду и частоту колебаний. В соответствии с описанными выше ограничениями на амплитуду и частоту сигнала из дальнейшего анализа исключены пять составляющих диаметра – $d_1(t)$ – $d_5(t)$. С использованием остальных функций $d_6(t)$ – $d_{10}(t)$, a_{10} построим новый сигнал $\tilde{D}(t)$, на который и настраивается ПИД-регулятор:

$$\tilde{D}(t) = a_{10} + \sum_{n=6}^{10} d_n(t). \quad (12)$$

Модельные расчеты показывают, что при таком подходе использование управления приводит к улучшению характеристик сигнала на выходе.

Для фильтрации шумов при моделировании вытяжки также применяется метод Савицкого – Голея, реализованный в пакете MATLAB. Здесь используется аппроксимация последовательности исходных данных линейной комбинацией неких функций, при этом минимизируется сумма квадратов отклонений исходных данных от аппроксимирующих значений. Применительно к дискретной обработке сигнала аппроксимирующие полиномы в окрестности каждой точки строятся для выборки из исходного массива данных (окно аппроксимации). Ширина этого окна – число точек в выборке. Численно определен размер окна – 41 значение. Фильтр с такими параметрами имеет минимальную дисперсию при необходимом уровне фильтрации шума.

На рис. 2 представлен исходный сигнал – величина измеряемого диаметра кварца. Последовательность значений сигнала подается на сглаживающий фильтр. Фильтр с использованием предшествующих значений вычисляет аппроксимирующие значения сглаженного сигнала (рис. 3). Сглаженные значения диаметра подаются на ПИД-регулятор. Подчеркнем, что в этом случае производится управление исходным сигналом, а траектория управления выстраивается по обработанному фильтром сигналу. На рис. 4 приведен график значений сигнала на выходе.

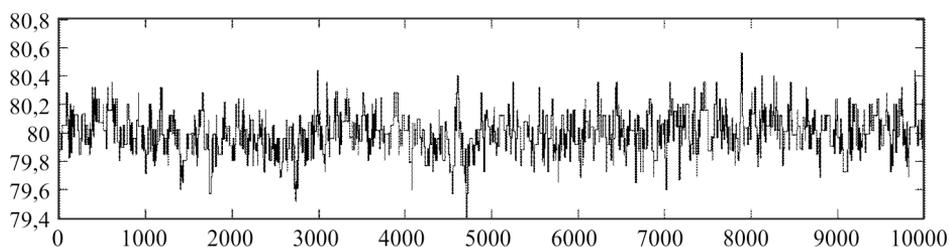


Рис. 2. Исходные значения диаметра кварца

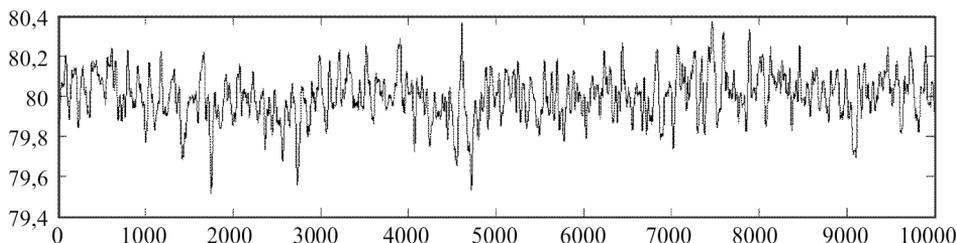


Рис. 3. Сигнал после предобработки

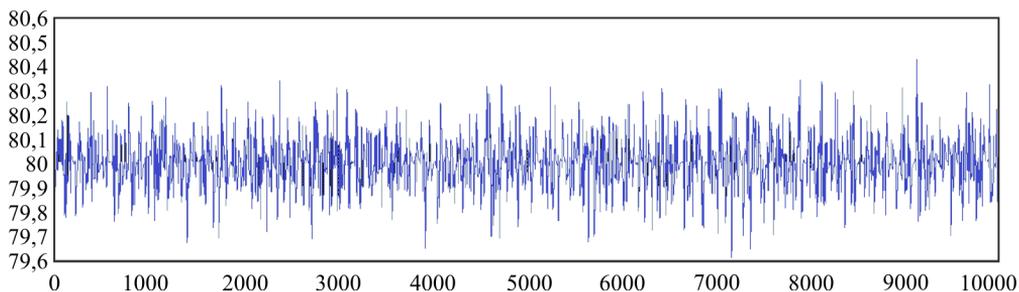


Рис. 4. Изменение диаметра кварца в результате действия управляющего контура

В табл. 2 представлены статистические параметры исходного и итоговых сигналов, полученных с использованием разных подходов к предварительной обработке измеряемых значений. Отметим, что управление процессом способствует улучшению характеристик изделия – среднее квадратическое отклонение и размах значений диаметра уменьшаются. Вместе с тем использование фильтра, реализованного в пакете MATLAB, по аналогичным характеристикам дает результаты более предпочтительные по сравнению с первым представленным алгоритмом.

Таблица 2

Статистики значений диаметра кварца при вытяжке волокна,
полученные с использованием различных подходов
к предварительной обработке сигнала

Статистики	Исходный сигнал	Итоговый сигнал (Алгоритм 1)	Итоговый сигнал (Алгоритм 2)
Среднее	80,06	80,14	80,1
Стандартное отклонение	0,1424	0,1221	0,1094
Минимальное значение	79,4	79,56	79,6
Максимальное значение	80,44	80,44	80,39
Размах значений	1,04	0,88	0,79

Предложенная имитационная модель процесса вытяжки оптических волокон позволяет без существенных затрат анализировать влияние изменений параметров процесса и производить оптимальную настройку параметров управляющего контура.

Список литературы

1. Первадчук В.П., Крюков И.И., Давыдов А.Р. Имитационное моделирование процесса вытяжки кварцевых оптических волокон // Фотон-Экспресс. – 2011. – № 6. – С. 226–227.

2. Михайлов Г.А., Войтишек А.В. Численное статистическое моделирование. Методы Монте-Карло. – М.: Академия, 2006. – 367 с.

3. Давыдов А.Р., Баянов К.Н. Исследование процесса вытяжки оптических волокон на основе его имитационной модели // Глобальный научный потенциал. – 2013. – № 8. – С. 54–57.

4. Туманов М.П. Теория управления. Теория линейных систем автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГИЭМ, 2005. – 82 с.

5. Давыдов А.Р., Баянов К.Н. Статистическое управление процессом вытяжки кварцевых оптических волокон на основе его имитационной модели // Перспективы науки. – 2013. – № 3. – С. 78–82.

6. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

References

1. Pervadchuk V.P., Krukov I.I., Davydov A.R. Imitatsionnoe modelirovanie protsessa vytyazhki kvartsevykh opticheskikh volokon [Simulation modeling of quartz optical fibers extraction process]. *Foton-ekspress*, 2011, no. 6, pp. 226-227.

2. Michailov G. A., Voytishek A.V. Chislennoe statisticheskoe modelirovanie. Methody Monte Karlo [Numerical statistical modeling. Methods of Monte Karlo]. Moscow, 2006, 367 p.

3. Davydov A.R., Baianov K.N. Issledovaniie protsessa vytyazhki opticheskikh volokon na osnove iego imitatsionnoi modeli [The research of optical fibers extraction process, based on its simulation model]. *Globalnyi nauchnyi potentsial*, 2013, no.8, pp. 54-57.

4. Tumanov M.P. Teoriia upravleniia. Teoria lineinykh system avtomaticheskogo upravleniia [Theory of managing. Theory of automatic management lining system]. Moscow, 2005, 82 p.

5. Davydov A.R., Baianov K.N. Statistic management of quartz optical fibers extraction process, based on its simulation model [Statisticheskoe upravlenie protsessom vytyazhki kvartsevykh opticheskikh volokon na osnove iego imitatsionnoi modeli]. *Perspektivy nauki*, 2013, no. 3, pp. 78-82.

6. Iakovlev A.N. Vvedenie v veivlet-preobrasovanie [Introduction in the wavelet transform]. Novosibirsk, 2003, 104 p.

Получено 15.10.2014

УДК 681.7.068: 539.376

А.Н. Труфанов, Н.А. ТруфановПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**О МОДЕЛЯХ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
В АНИЗОТРОПНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ**

Обсуждаются вопросы построения математических моделей на основе уравнений механики деформируемого твердого тела для прогнозирования наведенных механических напряжений и двулучепреломления в анизотропных оптических волокнах. Отмечено, что получившие широкое распространение термоупругие модели появления остаточных напряжений связывают исключительно с несовместностью температурных деформаций материалов силовых элементов и температурных деформаций чистого кварца, из которого изготовлено волокно. В такой постановке величины прогнозируемых напряжений не зависят от скорости охлаждения и закона изменения температуры во времени, а оказываются прямо пропорциональны разности температур: конечной (комнатной) и начальной, в качестве которой в разных источниках выбираются температура разогрева заготовки при вытяжке, температура стеклования легированного кварцевого стекла, некоторая «фиктивная» температура, соответствующая появлению упругих свойств при охлаждении расплава, а в ряде публикаций эта температура вообще не конкретизирована и, по сути, может выступать в качестве «подгоночного» параметра. На конкретных примерах иллюстрируется применение релаксационных механических моделей максвелловского типа, рассматривающих материал анизотропного волокна как неоднородно легированную среду, обладающую неоднородными реологическими свойствами и релаксационными переходами, которые происходят в различных температурных диапазонах, причем положение температурного диапазона зависит от скорости изменения температуры. Установлено количественное отличие прогнозируемого двулучепреломления на основе двух данных подходов на примере волокна типа Panda.

Ключевые слова: анизотропные оптические волокна, внутренние механические напряжения, двулучепреломление, релаксационные явления.

A.N. Trufanov, N.A. Trufanov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**MODELS OF THE FORMATION OF THE STRESS STATE
IN PM OPTICAL FIBERS**

The problems of mathematical modeling of induced stresses and birefringence in anisotropic optical fibers were studied. Noted that found wide spread thermoelastic models associate the formation of residual stresses exclusively with the incompatibility of thermal deformations of the structural elements of the fiber. In this formulation, the value of the predicted stresses do not depend on the cooling rate and the law of temperature change over time, and are directly proportional to the temperature difference: the final (ambient temperature) and initial, as in different sources which are selected heating temperature of the preform during drawing, the glass transition temperature of doped silica glass or some "fictive" temperature, which corresponding to the appearance of the elastic properties of the cooled melt, and in a number of publications, this temperature is not at all focused and in fact can act as

a "fitting" parameter. Were shown a some examples of the application of the relaxation mechanical models of Maxwell type for modeling of the anisotropic optical fibers with non-uniform doping of light-guide core and stress applying parts, which has a non-uniform rheological properties and relaxation transitions that occur in different temperature ranges, and the position of the temperature range depends on the rate of cooling. Identified the quantitative difference between the predicted birefringence on the basis of these two approaches on the example of Panda type optical fiber.

Keywords: anisotropic optical fibers, internal stresses, birefringence relaxation phenomena.

В последние годы интенсивно разрабатываются волоконные световоды, способные сохранять состояние поляризации вводимого в него излучения, так называемые анизотропные одномодовые световоды, находящие широкое применение в волоконно-оптических датчиках различных физических величин [1, 2]. Анизотропное кварцевое оптическое волокно получается по технологии высокотемпературной вытяжки из заготовки с последующим охлаждением [3–5]. В таком волокне с использованием известных фотоупругих эффектов для поддержания поляризации светового сигнала в светопроводящей жиле искусственно, путем введения в конструкцию волокна специальных силовых элементов с отличным от остального материала коэффициентом термического расширения, создается анизотропия поля внутренних напряжений. Напряженное состояние анизотропного световода определяется совокупностью факторов, связанных со свойствами материалов и условиями технологических процессов: неоднородностью температурных полей при охлаждении после высокотемпературной обработки, несовместностью температурных деформаций неоднородно легированных элементов, терморелаксационными переходами (стеклование-размягчение), происходящими из-за неоднородного легирования в различных температурных диапазонах.

Многие исследования посвящены построению математических моделей на основе уравнений механики деформируемого твердого тела для прогнозирования наведенных механических напряжений в анизотропных волокнах и, как следствие, двулучепреломления световода [6–17]. Большинство авторов используют в этих целях уравнения термоупругости, соответствующие случаю плоской или обобщенной плоской деформации. При этом предполагается, что в процессе охлаждения после вытяжки можно пренебречь градиентами температур по радиусу волокна (что подтверждается расчетами), а появление остаточных напряжений связано исключительно с несовместностью температурных деформаций материалов силовых элементов, представляющих, как правило, кварц, легированный оксидом бора B_2O_3 и фосфорным ан-

гидридом P_2O_5 , и температурных деформаций чистого кварца SiO_2 , из которого изготовлено волокно. В такой постановке величина прогнозируемых напряжений не зависит от скорости охлаждения и закона изменения температуры во времени, а оказывается прямо пропорциональной разности температур: конечной (комнатной) и начальной, в качестве которой в разных источниках выбираются температура разогрева заготовки при вытяжке, температура стеклования кварца, легированного оксидом бора [7], некоторая «фиктивная» температура, соответствующая появлению упругих свойств при охлаждении расплава [10], а в ряде статей эта температура вообще не конкретизирована и, по сути, может выступать в качестве «подгоночного» параметра [12–17].

Применение такого рода склерономных моделей, нечувствительных к режиму охлаждения стеклющихся изделий, может быть оправданным в качестве первого приближения. При этом за рамками рассмотрения оказываются важные релаксационные механизмы, которые могут существенным образом повлиять на закономерности формирования полей внутренних напряжений. Многие аморфные материалы (в том числе неорганические стекла) обладают так называемым релаксационным переходом, когда материал при охлаждении переходит из вязкотекучего состояния в застеклованное (явление стеклования) или, наоборот, при нагреве из застеклованного – в вязкотекучее (размягчение). Явление стеклования не сопровождается структурными превращениями (т.е. не является фазовым переходом) и связано со значительным изменением жесткости и релаксационного спектра материала. На релаксационные свойства кварцевых стекол значительное влияние могут оказывать добавки различных оксидов; так, для элементов оптических волокон используется легирование оксидом бора B_2O_3 , оксидом германия GeO_2 , фосфорным ангидридом P_2O_5 и др. Оксид бора, например, существенно увеличивает коэффициент линейного температурного расширения легированного кварцевого стекла, но снижает его вязкость и температуру стеклования. Вследствие этого материал анизотропного волокна представляет собой неоднородно легированную среду, обладающую неоднородными реологическими свойствами и релаксационными переходами, которые происходят в различных температурных диапазонах, причем положение температурного диапазона зависит от скорости изменения температуры.

Учет реономных свойств кварцевых стекол возможен в рамках довольно простых определяющих соотношений, связывающих тензоры напряжений и деформаций (скоростей деформаций). Поскольку известно, что в застеклованном состоянии кварцевое стекло проявляет линейно-упругое поведение, а в полностью размягченном состоянии – поведение линейно-вязкой жидкости с сильной зависимостью вязкости от температуры, можно воспользоваться обобщением на сложное напряженное состояние вязкоупругой модели Максвелла (последовательное соединение упругого и вязкого элементов).

Для исследования на качественном уровне эффектов, связанных с охлаждением изделий из кварцевых стекол, рассмотрим задачу о напряжениях в одноосном защемленном стержне.

В этом случае несвязанная квазистатическая краевая задача о напряженно-деформированном состоянии с учетом малости деформаций и незначительности вклада массовых сил включает:

– уравнение равновесия:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0, \quad x \in l,$$

– геометрические соотношения Коши:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad x \in l,$$

где $u(x, t)$ – перемещение вдоль оси x ; $\varepsilon(x, t)$ – полная деформация, а также граничные условия в перемещениях и напряжениях.

В качестве определяющих используем соотношения максвелловского типа:

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_T - \varepsilon_B), \quad \frac{\partial \varepsilon_B}{\partial t} = \frac{\sigma}{\eta(T)}, \quad \varepsilon_T = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT.$$

В настоящее время физико-механические свойства и константы чистого кварцевого стекла достаточно хорошо изучены [4]. Модуль упругости растет от 6500 кг/мм² при комнатной температуре до значительных, на 9–11 % больших при $T = 1200$ °С, при этом коэффициент Пуассона линейно изменяется от 0,17 до 0,2. Коэффициент температурного расширения чистого кварца мал ($5 \cdot 10^{-7}$ К⁻¹) и примерно по-

стоянен в области температур стеклообразного состояния. Напротив, зависимость вязкости от температуры существенна.

Для аппроксимации зависимости вязкости от температуры применим соотношения Аррениуса вида

$$\lg(\eta(T)) = K_1 + \frac{K_2}{T}, \quad (1)$$

где $K_1 = -5,4154$, $K_2 = 2,2316 \cdot 10^4$.

На первом этапе (рис. 1) образец охлаждается с постоянной скоростью от температуры, превышающей температуру стеклования T_g . На втором этапе производится разгрузка стержня. На третьем этапе ненапряженный стержень, защемленный с обоих концов, равномерно с постоянной скоростью нагревается. Напряжение возрастает за счет температурного расширения до тех пор, пока температура не превысит температуру размягчения материала. При дальнейшем нагреве происходит резкий спад напряжений, что объясняется уменьшением характерных времен релаксации до величин, сопоставимых со временем проведения эксперимента за счет уменьшения вязкости. Отметим, что при использовании термоупругой модели было бы возможным описание поведения материала только при температурах ниже $T = 1200$ °C: линейный рост напряжений при охлаждении с существенной ошибкой в их величине и линейное увеличение сжимающих напряжений при нагреве без релаксации.

При варьировании скорости охлаждения и нагрева удастся описать физически известный факт, что температура стеклования меняет свои значения. Для скоростей нагрева $\dot{T} = 1...20$ °C/мин получено семейство кривых (рис. 2). Обратим внимание на тот факт, что эти кривые квазипараллельны, и воспользуемся им для построения зависимости температуры размягчения от скорости нагрева (рис. 3). Заметим, что при увеличении скорости охлаждения рост температуры стеклования замедляется.

Описанные релаксационные эффекты могут играть существенную роль при анализе процессов, сопровождающих изготовление анизотропных оптических волокон, особенно в силу их неоднородности вследствие легирования материалов силовых стержней и светопроводящей жилы. В качестве иллюстрации приведем пример о напряжениях

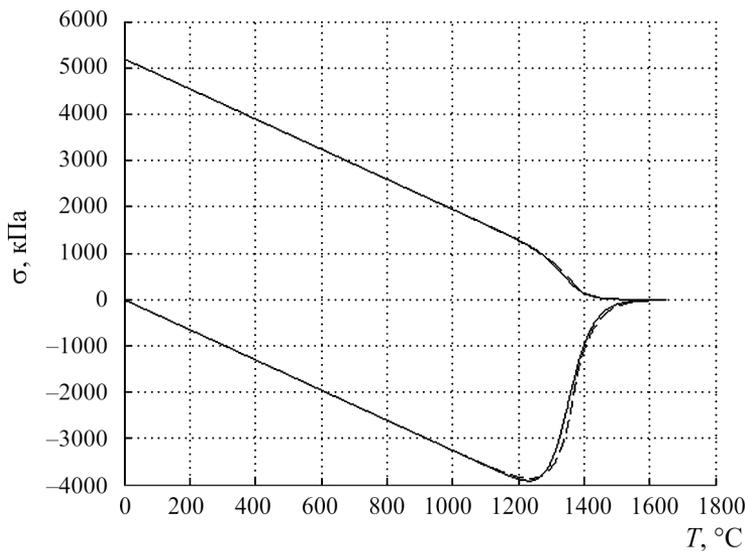


Рис. 1. Термомеханическая кривая заземленного кварцевого образца при скорости охлаждения и нагрева $\dot{T} = 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$

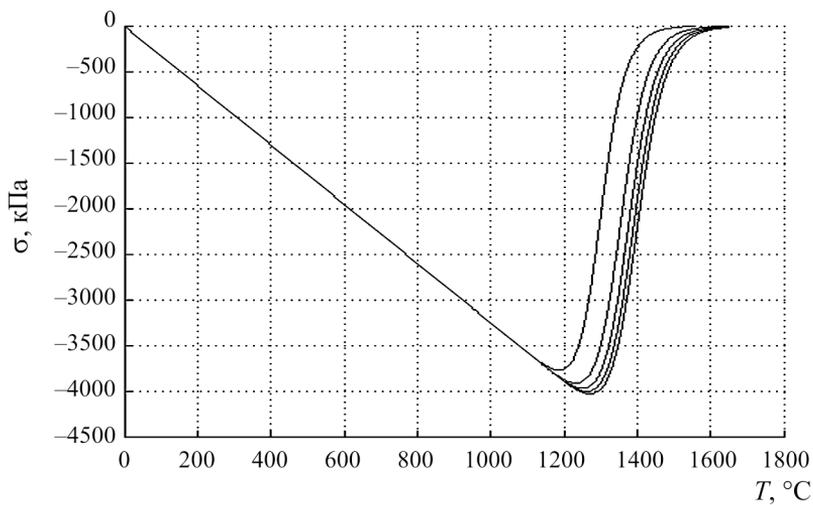


Рис. 2. Семейство термомеханических кривых заземленного кварцевого образца при скоростях охлаждения $\dot{T} = 1 \dots 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$

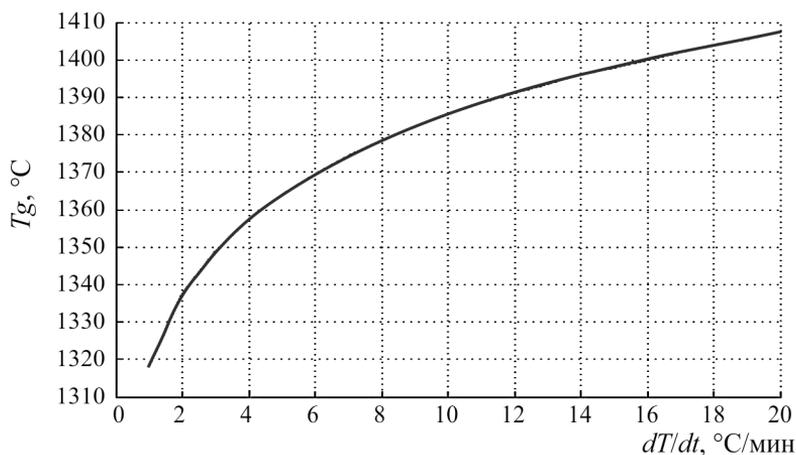


Рис. 3. Зависимость температуры размягчения от скорости нагрева \dot{T}

в заземленном стержне из чистого кварцевого стекла и кварцевого стекла, легированного оксидом бора (10 % B_2O_3) в режимах изменения температур, имитирующих отжиг стержней. На рис. 4 представлено изменение напряжения в условиях нагрева стержня с постоянной скоростью до некоторой температуры с последующей выдержкой при фиксированной температуре (950, 1050, 1150 $^\circ\text{C}$) и охлаждением до комнатной температуры, что соответствует режиму отжига. Приведенные зависимости позволяют оценить необходимое время выдержки для полной релаксации напряжений в стержне при выбранной температуре отжига. На рис. 5 изображены аналогичные зависимости для заземленного стержня из кварцевого стекла, легированного 10 % оксида бора. Введение оксида бора в состав кварцевого стекла приводит к снижению вязкости расплава, уменьшению температуры стеклования и увеличению линейного коэффициента температурного расширения [4]. Видно, что полная релаксация напряжений в легированном кварцевом стекле при данных температурах и выбранной скорости нагрева (образцы нагревались до температуры выдержки за 100 с) происходит еще в процессе нагрева и выдержки фактически не требуется.

Произведено обобщение модели максвелловского типа на случай сложного напряженного состояния, разработан и реализован алгоритм численной реализации. Основные уравнения, метод решения и примеры применения для задачи о формировании остаточных напряжений в силовых стержнях представлены в работах [18, 19]. В данном случае, следуя методологии работ [18, 19], покажем, что дает применение

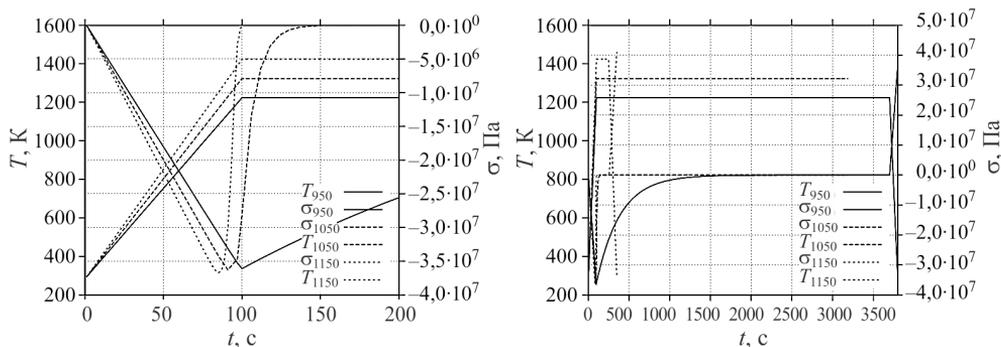


Рис. 4. Эволюция напряжения и температуры в заземленном стержне из чистого кварцевого стекла в режимах: нагрев – выдержка (при фиксированных температурах) – охлаждение (до комнатной температуры)

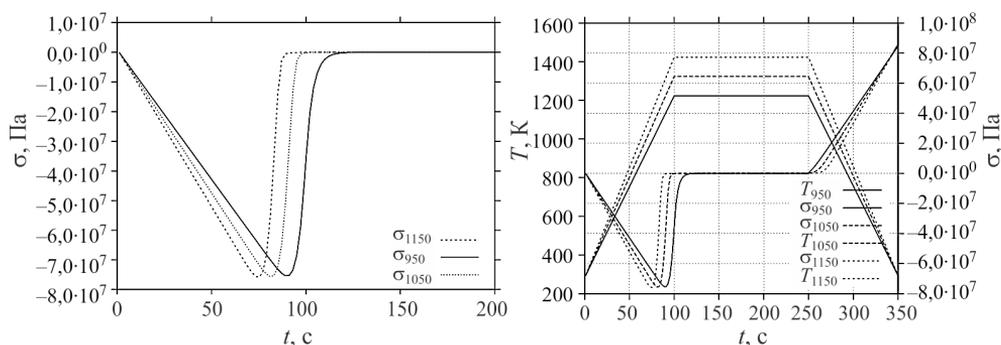


Рис. 5. Эволюция напряжения и температуры в заземленном стержне из кварцевого стекла легированного 10 % B_2O_3 в режимах: нагрев – выдержка (при фиксированных температурах) – охлаждение (до комнатной температуры)

релаксационной модели при прогнозировании полей напряжений и двулучепреломления в волокне типа Panda по сравнению с традиционными термоупругими расчетами. На рис. 6 приведена фотография поперечного сечения анизотропного волокна типа Panda, состоящего из следующих конструктивных элементов: светопроводящая жила в центре волокна из кварцевого стекла, легированного оксидом германия, два силовых цилиндрических элемента из кварцевого стекла, легированного оксидами бора и фосфора и оксидом бора в центральной части, массив самого волокна выполнен из чистого кварцевого стекла.

Для сравнения моделей были выполнены численные исследования с применением термоупругой модели и релаксационной модели (три варианта с учетом разных скоростей охлаждения волокна после вытяжки до комнатной температуры). На рис. 7 представлены результаты

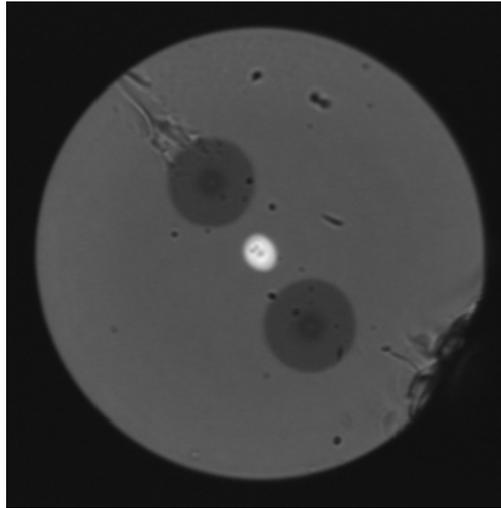


Рис. 6. Поперечное сечение анизотропного волокна типа Panda

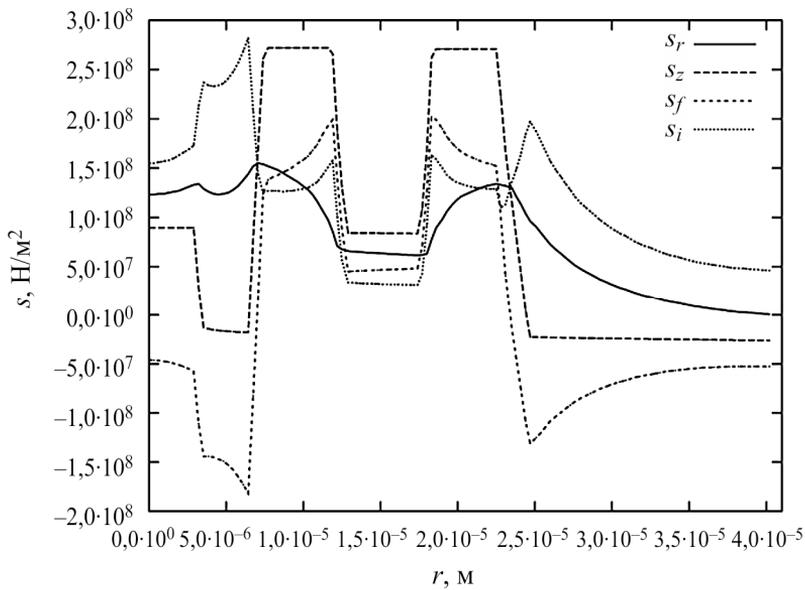


Рис. 7. Эпюры остаточных напряжений в анизотропном волокне типа Panda после вытяжки, полученные с применением термоупругой модели

решения задачи об остаточных напряжениях в анизотропном волокне в упругой постановке, на рис. 8 – с применением модели максвелловского типа. На качественном уровне результаты схожи, однако количественно существенно отличаются. На рис. 9 приведено сравнение релаксационной и термоупругой моделей на примере эпюр интенсивности

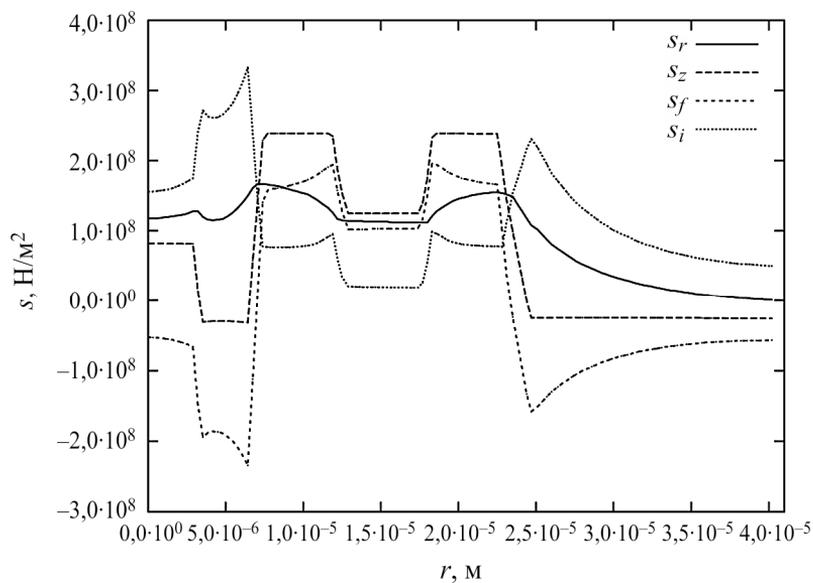


Рис. 8. Эпюры остаточных напряжений в анизотропном волокне типа Panda после вытяжки, полученные с применением релаксационной модели (охлаждение волокна за 4,6 с)

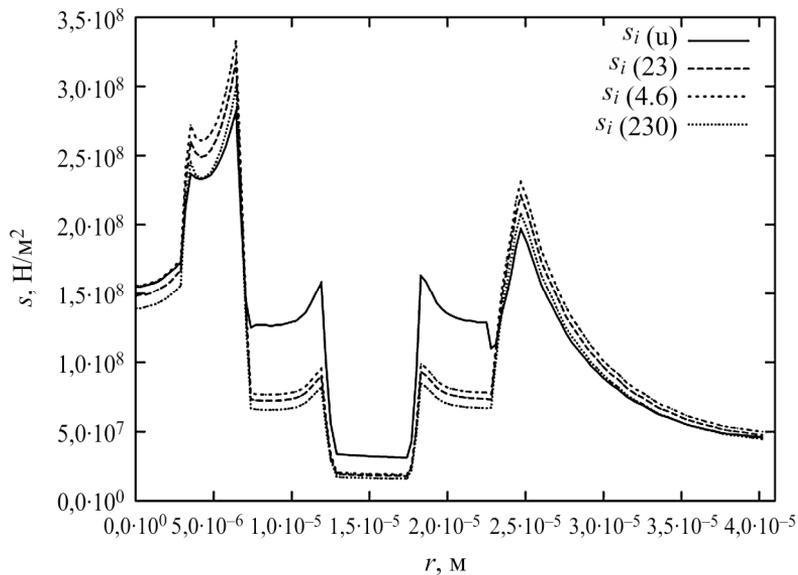


Рис. 9. Эпюры интенсивности напряжений S_i в анизотропном волокне типа Panda, полученные с применением релаксационной и термоупругой моделей

напряжений для разного времени охлаждения волокна до комнатной температуры (4,6; 23; 230 с).

Количественные отличия в определении компонент тензора напряжений в различных точках поперечного сечения световода на основе двух обсуждаемых подходов сказываются в конечном счете на величине прогнозируемого двулучепреломления, определяемого по формуле

$$B = C(\lambda) \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} (\sigma_x(r, \varphi) - \sigma_y(r, \varphi)) |E(r, \varphi, V)|^2 r dr d\varphi \times \left(\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} |E(r, \varphi, V)|^2 r dr d\varphi \right)^{-1},$$

где r, φ – соответствующие оси цилиндрической системы координат; σ_x и σ_y – нормальные напряжения в поперечном сечении волокна; $C(\lambda)$ – фотоупругая постоянная для данной длины волны; $|E(r, \varphi, V)|^2$ – распределение интенсивности основной моды по поперечному сечению световода. В данном исследовании было использовано равномерное распределение $E(r, \varphi, V) = E_0$.

Значения двулучепреломления B , полученные для указанных выше четырех расчетных вариантов, приведены в таблице.

Расчетные значения двулучепреломления анизотропного волокна типа Panda

Вариант расчета	Время охлаждения, с	$B \cdot 10^4$
Расчет по термоупругой модели	–	5,75
Расчет по термовязкоупругой модели	4,6	6,05
	23	5,77
	230	5,40

Таким образом, показано, что учет релаксационных механических явлений в материалах кварцевого анизотропного световода может оказаться существенным при прогнозировании важной оптической характеристики волокна – двулучепреломления. В данном подходе отсутствует необходимость использования субъективно выбираемого параметра – начальной температуры процесса охлаждения («фиктивной температуры»).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-96036 р_урал_а и № 14-08-31530 мол_а).

Список литературы

1. Волоконно-оптические датчики: пер. с япон. / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Каюма, К. Хататэ; под ред. Т. Окоси. – Л.: Энергоатомиздат (Ленингр. отд-ние), 1990. – 256 с.
2. Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели: конструкции, характеристики, производство и применение. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.
3. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учеб. пособие. – М.: МГУЛ, 2007. – 222 с.
4. Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.П. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов: справ. – Т. 1–5. – Л.: Наука, 1973–1987.
5. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology. – 2nd ed. / The Royal Society of Chemistry. – Cambridge, 2005. – 291 p.
6. Kaminov I.P., Ramaswamy V. Single-polarization optical fibers: Slab model // Applied Physics Letters. – 1979. – Vol. 34. – P. 268–270. Doi: 10.1063/1.90754.
7. Okamoto K., Hosaka T., Edahiro T. Stress analysis of optical fibers by a finite element method // IEEE J. Quantum Electron. – 1981. – Vol. QE-17, no. 10. – P. 2123–2129.
8. Namihira Y., Ejiri Y., Mochizuki K. Birefringence in elliptical-cladding single polarization fibers // Electron. Lett. – 1982. – Vol. 18, no. 2. – P. 89–91.
9. Sakai J., Kimura T. Birefringence caused by thermal stress in Elliptically deformed core optical fibers // IEEE J. Quantum Electron. – 1982. – Vol. QE-18, no. 11. – P. 1899–1909.
10. Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers / M.P. Varnham, D.N. Payne, A.J. Barlow, R.D. Birch // IEEE J. of Lightwave Technology. – 1983. – Vol. LT-1, no. 2. – P. 332–338.
11. Оптические свойства эллиптических одномодовых световодов / З.Э. Арутюнян, А.Б. Грудинин, А.Н. Гурьянов, Д.Д. Гусовский, С.В. Игнатьев, О.Б. Смирнов, С.Ю. Сурин // Волоконная оптика: тр. ИОФАН. – М.: Наука, 1993. – Т. 39. – С. 119–147.
12. Fontaine M. Computations of optical birefringence characteristics of hingly eccentric elliptical core fibers under various thermal stress conditions // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 75, no. 1. – P. 68–73.

13. Aly M.H., Abouelwafa M.S.A., Keshk M.M. Thermal-stress-induced birefringence in Panda and bow-tie optical fibers // Proceedings of the Fifteenth National Radio Science Conference. – Helman, Cairo, 1998. – P. (D14) 1–11.

14. Stress analysis of polarization maintaining optical fibers by the finite element method / M.H. Aly, A.S. Farahat, M.S. Helmi, M. Farhoud // ИИМ Engineering Journal. – 2000. – Vol. 1, no. 1. – P. 7–14.

15. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers / R. Guan, F. Zhu, Z. Gan, D. Huang, S. Liu // Optical Fiber Technology. – 2005. – No.11. – P. 240–254. DOI: 10.1016/j.yofte.2004.10.002.

16. Finite element analysis on stress- induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber / R. Guan, W. Xueli, W. Xuefang, D. Huang, S. Liu // Chinese Optics Letters. – 2005. – Vol. 3, no. 1. – P. 42–45.

17. Alam M.S., Anwar S.R.M. Modal propagation properties of elliptical core optical fibers considering stress-optic effects // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 4, no. 8. – P. 418–423.

18. Trufanov A. N., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers // Optical Fiber Technology. – 2010. – Vol. 16, no. 3. – P. 156–161.

19. Труфанов А.Н. Эволюция полей технологических напряжений в цилиндрическом силовом стержне для заготовки оптоволокна типа Panda в процессе отжига // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 1. – С. 210–220.

References

1. Okosi T., Okamoto K., Otsu M., Nisihara H., Kauma K., Hatate K. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber Optic Sensors]. Leningrad: Energoatomizdat, 1990, 256 p.

2. Grodnev I.I., Larin Iu.T., Teumin I.I. Opticheskie kabeli: konstruksii, kharakteristiki, proizvodstvo i primeneniye [Optical cables: design, characterization, production and application]. Moscow: Energosamizdat, 1991, 264 p.

3. Burkov V.D., Ivanov G.A. Fiziko-tekhnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoi tekhniki [Physical and technological basis of fiber-optic technology]. Moscow, 2007, 222 p.

4. Mazurin O.V., Strel'tsina M.V., Shvaiko-Shvaikovskaia T.P. Svoistva stekol i stekloobrazuiushchikh rasplavov [Silica glass and binary silicate glasses]. Leningrad: Nauka, 1973–1987, vol. 1–5.

5. Shelby J.E. Introduction to glass science and technology. 2nd ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005, 291 p.

6. Kaminov I.P., Ramaswamy V. Single-polarization optical fibers: Slab model. *Applied Physics Letters*, 1979, vol. 34, pp. 268-270. Doi: 10.1063/1.90754.

7. Okamoto K., Hosaka T., Edahiro T. Stress analysis of optical fibers by a finite element method. *IEEE J. Quantum Electron*, 1981, vol. QE-17, no. 10, pp. 2123-2129.

8. Namihira Y., Ejiri Y., Mochizuki K. Birefringence in elliptical-cladding single polarization fibers. *Electron. Lett.*, 1982, vol. 18, no. 2, pp. 89-91.

9. Sakai J., Kimura T. Birefringence caused by thermal stress in Ellipticaly deformed core optical fibers. *IEEE J. Quantum Electron*, 1982, vol. QE-18, no. 11, pp. 1899-1909.

10. Varnham M.P., Payne D.N., Barlow A.J., Birch R.D. Analytic solution for the birefringence produced by thermal stress in polarization-maintaining optical fibers. *IEEE J. of Lightwave Technology*, 1983, vol. LT-1, no. 2, pp. 332-338.

11. Arutiunian Z.E., Grudin A.B., Gurianov A.N., Gusovskii D.D., Ignatev S.V., Smirnov O.B., Surin S.Iu. Opticheskie svoistva ellipticheskikh odnomodovykh svetovodov [The optical properties of elliptic singlemode fiber optic cable]. *Trudy Instituta obshchei fiziki "Volokonnaya optika"*. Moscow: Nauka, 1993, vol. 39, pp. 119-147.

12. Fontaine M. Computations of optical birefringence characteristics of hingly eccentric elliptical core fibers under various thermal stress conditions. *J. Appl. Phys.*, 1994, vol. 75, no. 1, pp. 68-73.

13. Aly M.H., Abouelwafa M.S.A., Keshk M.M. Thermal-stress-induced birefringence in Panda and bow-tie optical fibers. *Proceedings of the Fifteenth National Radio Science Conference*. Helwan, Cairo, 1998, pp. (D14) 1-11.

14. Aly M.H., Farahat A.S., Helmi M.S., Farhoud M. Stress analysis of polarization maintaining optical fibers by the finite element method. *IJUM Engineering Journal*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 7-14.

15. Guan R., Zhu F., Gan Z., Huang D., Liu S. Stress birefringence analysis of polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2005, no. 11, pp. 240-254. DOI: 10.1016/j.yofte.2004.10.002.

16. Guan R., Wang Xueli, Wang Xuefang, Huang D., Liu S. Finite element analysis on stress-induced birefringence of polarization-maintaining optical fiber. *Chinese Optics Letters*, 2005, vol. 3, no. 1, pp. 42-45.

17. Alam M.S., Anwar S.R.M. Modal propagation properties of elliptical core optical fibers considering stress-optic effects. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, vol. 4, no. 8, pp. 418-423.

18. Trufanov A.N., Smetannikov O.Iu., Trufanov N.A. Numerical analysis of residual stresses in preform of stress applying part for PANDA-type polarization maintaining optical fibers. *Optical Fiber Technology*, 2010, vol. 16, no. 3, pp. 156-161.

19. Trufanov A.N. Evolyutsiya poley tehnologicheskikh napryazheniy v tsilindricheskom silovom sterzhne dlya zagotovki optovolokna tipa Panda v protsesse otzhiga. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2013, no. 1, pp. 210-220.

Получено 16.10.2014

УДК 536.42

**Д.А. Бессонов, А.В. Конюшин, И.А. Попов,
Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко**

Саратовский государственный технический университет
имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ИЗ СТЕКЛОУГЛЕРОДА МЕТОДОМ ПРОГРЕССИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ

Описаны два разных метода лазерного структурирования поверхности автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода – линейное сканирование и перекрывающиеся глухие отверстия. Показано, что метод перекрывающихся глухих отверстий обладает преимуществом перед аналогичными методами за счет увеличения поверхностной плотности острий. За счет применения прогрессивного лазерного структурирования, обеспечивающего плотность микроострий до 10^6 см^{-2} , достигнуты высокие эмиссионные характеристики.

Ключевые слова: стеклоуглерод, лазерное структурирование, автоэмиссионный катод, нанорельеф.

**D.A. Bessonov, A.V. Konushin, I.A. Popov,
T.N. Sokolova, E.L. Surmenko**

Y.A. Gagarin Saratov State Technical University,
Saratov, Russian Federation

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF FIELD-EMISSION GLASS-CARBON CATHODES WITH PROGRESSIVE METHOD OF LASER STRUCTURING

Two different approaches were described for laser structuring of the glass-carbon field-emission cathodes – linear scanning and an overlapping blind holes technique. It was showed that the overlapping blind holes technique has an advantage over similar methods by increasing the packing density of the micropeaks. High emission characteristics were achieved through the use of progressive laser structuring, providing the packing density of the micropeaks of the order of $10^5\text{--}10^6 \text{ cm}^{-2}$.

Keywords: glass-carbon, laser structuring, field-emission cathode, nanorelief.

1. Введение

Изготовление стабильных и эффективных эмитирующих структур – важная проблема электровакуумного производства. В настоящее время перспективным материалом для применения в приборах этой отрасли считается стеклоглерод. Это неупорядоченный неграфитированный углеродный материал, продукт термической переработки сетчатых полимеров, в первую очередь фенолформальдегидной смолы и целлюлозы. Помимо физико-химических свойств, позволяющих успешно применять стеклоглерод в электровакуумных приборах, этот материал имеет важную особенность – при воздействии лазерного излучения на его поверхности образуется самоорганизующийся нанорельеф. В связи с этим стеклоглерод рассматривается как один из прогрессивных материалов для создания автоэмиссионных катодов (АЭК) [1].

Одним из наиболее важных параметров, влияющих на эмиссионную эффективность катодов из стеклоглерода, является количество острий на единицу поверхности катода и размер и форма острия. Для создания микроострий на поверхности стеклоглерода применяется лазерное структурирование.

Нелазерные методы изготовления стеклоглеродных АЭК в целом и методы их структурирования отличались сложным технологическим маршрутом [2] и внесением загрязняющих примесей из-за необходимости применять материал-катализатор. Применение лазерных технологий открыло широкие возможности для усовершенствования как методов изготовления АЭК, так и собственно их конструкции. Например, в качестве эмитирующих элементов стало возможным использование нанотрубок и нанокластеров, которые образуются на поверхности углеродных материалов под действием лазерного излучения [3–5]. Лазерное структурирование позволило улучшить и острийные структуры.

В представляемой работе рассматривается подход к лазерному структурированию стеклоглерода как к стадии процесса изготовления АЭК. Соответственно описываются различные подходы к структурированию катодных лучей и их влияние на эмиссионные характеристики катодов.

2. Метод

Отработка режимов структурирования поверхности стеклоглерода марки СУ-2000 проводилась на установках на базе твердотельных наносекундных лазеров Nd:YAG (длина волны 1,06 мкм) с модуляцией добротности с ламповой накачкой и с диодной накачкой.

Первоначально структурирование поверхности проводилось методом линейного сканирования, т.е. на поверхность наносилась сетка с минимально возможным шагом для данной лазерной системы. Плотность пиков на поверхности определялась количеством линий сетки. В местах пересечения линий имелись большие углубления в том направлении, линии которого наносились последними (рис. 1, а).

Следующим решением стало формирование структуры поверхности методом перекрывающихся глухих отверстий (лунок). Схема идеи представлена на рис. 1, б. В обоих случаях использовалось одномодовое излучение лазера, т.е. распределение интенсивности в поперечном сечении пучка близко к гауссовому. Как видно из рис. 1, структурирование поверхности методом нанесения лунок позволяет повысить плотность эмитирующих структур. Если количество острий, получаемых линейным методом на некоторой площади, равно N^2 , то при применении метода отверстий количество острий на той же площади будет составлять $N^2 + (N-1)^2$.

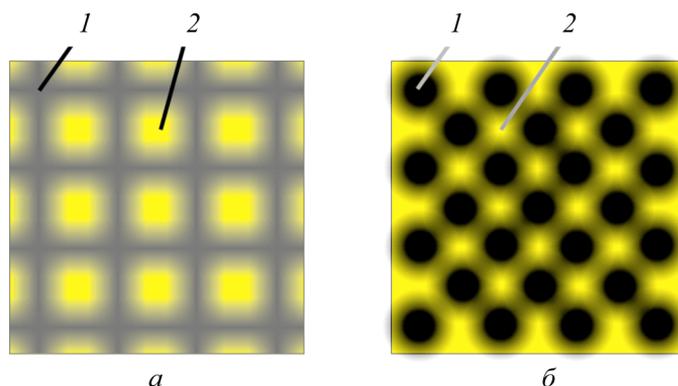


Рис. 1. Схема обработки поверхности: а – метод линейного сканирования, темные линии 1 – линии реза, желтые квадраты 2 – острия; б – метод перекрывающихся отверстий: темные точки 1 – отверстия (лунки), желтые точки 2 – острия

В зависимости от времени воздействия, интенсивности, частоты следования импульсов, средней мощности лазерного излучения структура поверхности имеет различный вид. Наиболее предпочтительна поверхность, получаемая на установке с твердотельным лазером Nd:YAG с диодной накачкой и длиной волны 1,064 мкм со средней мощностью 0,8 Вт, частотой следования импульсов 5 кГц, длительностью импульса 50 нс (рис. 2).

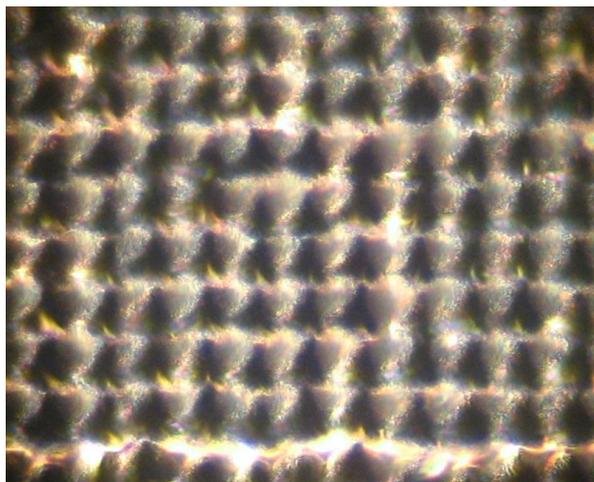


Рис. 2. Структура на поверхности стеклоуглерода СУ-2000, полученная методом перекрывающихся глухих отверстий, ширина основания пирамиды 10 мкм, высота пика 10 мкм

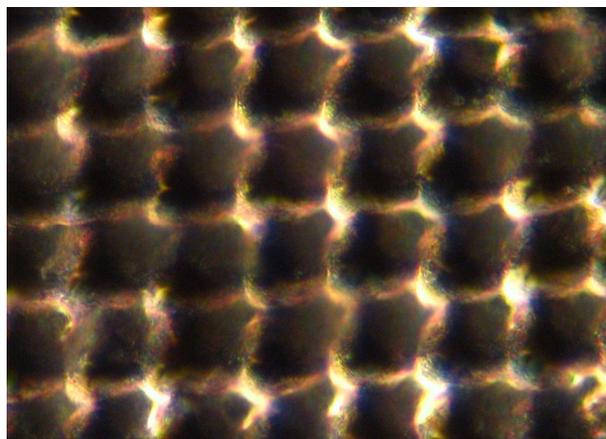


Рис. 3. Структура на поверхности стеклоуглерода СУ-2000, полученная методом перекрывающихся глухих отверстий, ширина основания пирамиды 10 мкм, высота пика 20 мкм

На рис. 3 представлена фотография структуры поверхности, полученной при условиях: средняя мощность лазерного излучения 1 Вт, частота следования импульсов 10 кГц, длительность импульса 50 нс.

Плотность упаковки микроострийной эмитирующей структуры составила порядка $5 \cdot (10^5 - 10^6) \text{ см}^{-2}$. Выступы по форме близки к четырехгранным пирамидам высотой 15 мкм и основанием $10 \times 10 \text{ мкм}$. Время структурирования поверхности площадью 1 мм^2 составляет 8 с.

Необходимо отметить, что многоострийная монолитная стеклоуглеродная структура имеет не только микроострия, расположенные в строго определенном порядке, но, как видно из рис. 4, на вершинах микроострий существует нанорельеф, по форме напоминающий микроострийную решетку, но с нерегулярным распределением наноострий.

Наблюдаемый нанорельеф естественным образом влияет на распределение электростатического поля на поверхности вершин микроострий автоэммитеров и определяет автоэмиссионные характеристики АЭК. Изображение (рис. 4) было получено с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Геометрический нанорельеф на поверхности вершин микроострий по STM-диаграмме имеет следующие размеры: средний радиус кривизны $r_n = 0,5$ нм, средняя высота $h_n = 7$ нм и усредненное значение шага наноструктуры – 80 нм, что соответствует плотности упаковки $N_n = 1,56 \cdot 10^{10}$ см⁻².

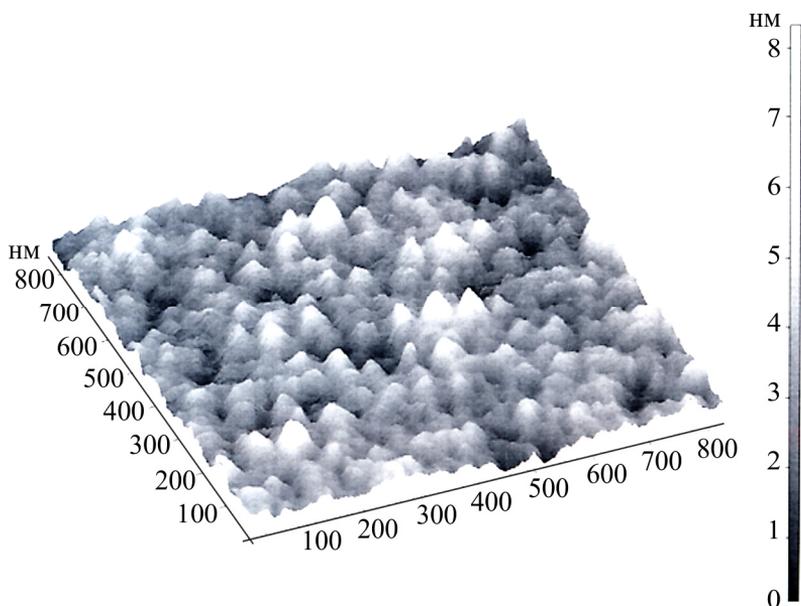


Рис. 4. STM-диаграмма структуры поверхности на вершинах микроострий

Рекомендуемые параметры излучения для получения микроострийных структур лежат в диапазонах: средняя мощность излучения 0,5–1 Вт; частота следования импульсов 5–12 кГц; длительность импульса 10–50 нс; длина волны излучения 1,064 мкм; задержка луча в одной точке 20–30 мс; скорость перемещения луча 10 мм/с.

При превышении указанной мощности или уменьшении частоты следования импульсов структура на поверхности становится неравномерной как по высоте, так и по форме. Острия принимают форму цилиндров, имеющих куполообразные вершины, разница по высоте цилиндрических игл достигает 30 мкм, средняя высота игл около 20 мкм, диаметры различаются от 7 до 15 мкм (рис. 5).

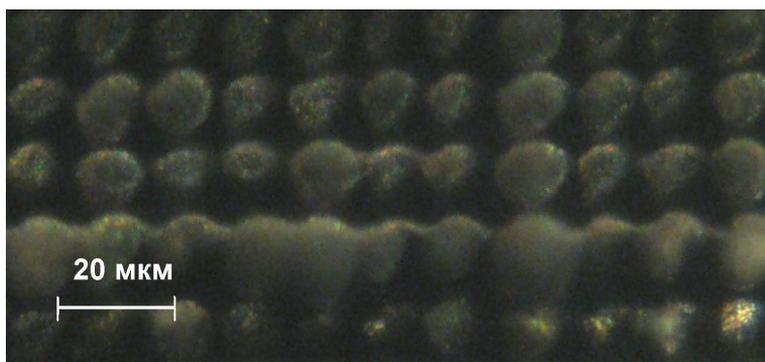


Рис. 5. Игольчатая микроструктура на поверхности стеклоглерида СУ-2000

Проведенные испытания катодов в диодном режиме показали, что в непрерывном режиме при максимальных напряжениях устойчивой работы катода (до пробоя) достигнуты токи порядка 400 мА при напряженности электрического поля $E = 6 \cdot 10^5$ В/см. В импульсном режиме за счет выхода на участок больших токов и, соответственно, больших плотностей тока возможно достичь крутизны ВАХ на два порядка выше, чем при непрерывном. Достигнутая плотность тока при этом составляла порядка 10 А/см^2 [6].

На рис. 6 представлены фотографии готовых АЭК, изготовленных с применением лазерных технологий из монолитного стеклоглерида СУ-2000.

3. Выводы

Проведены предварительные исследования возможности создания микро- и наноострийных катодных структур из стеклоглерида, показаны особенности взаимодействия лазерного излучения со стеклоглериодом, определена возможность структурирования поверхности методом лазерной микрогравировки последовательными лунками с целью получения поля микроострий пирамидальной формы с размерами основания одного острия от 10×10 мкм и высотой от 15 мкм.

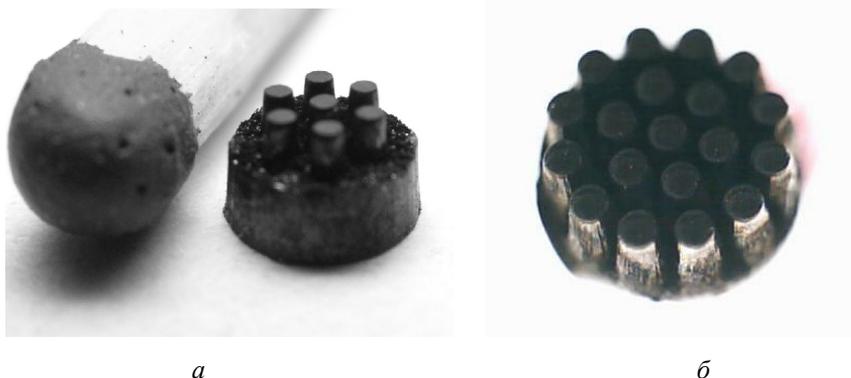


Рис. 6. Фотографии полученных АЭК: *а* – слева для сравнения – головка спички, справа шестилучевой АЭК из стеклоуглерода СУ-2000, диаметр основания 2,2 мм, высота 2 мм, высота выступов 0,5 мм, диаметр 250 мкм; *б* – 19-лучевой АЭК из стеклоуглерода СУ-2000, диаметр основания 3,2 мм, высота 2 мм, высота выступов 1 мм, диаметр выступов 250 мкм

Исследование образцов АЭК, изготовленных с использованием лазерной фрезеровки и структурирования, показало, что на всех этапах изготовления отсутствуют изменения элементного состава образца и независимо от среды, в которой проводилась лазерная обработка, – инертный газ, технический вакуум или воздух – состав катода не отличается от исходного.

На основе экспериментальных результатов и анализа технологических возможностей современного лазерного оборудования можно сделать вывод о целесообразности применения комплекса лазерных технологических операций для изготовления АЭК из стеклоуглерода и о достижимости более высоких значений плотности токоотбора с катода за счет увеличения плотности упаковки микроострий более $5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ и увеличения тока с одного острия.

Список литературы

1. Lewellen J.W., Noonan J. Field-emission cathode gating for rf electron guns // *Phys. Rev. ST – Accel.* – 2005. – Beams, 8, 033502-1-9.
2. Патент РФ №1738013. Н01J 9/02. Способ формирования топологии преимущественно многоострийного катода / Ю.А. Григорьев, С.В. Васильковский, В.И. Шестёркин, З.А. Явцева. Оpubл. 12.02.93.
3. Исследование возможностей построения новых вакуумных индикаторов и дисплеев на основе углеродных нанотрубных и нанокластерных автокатодов / Н.И. Сеницын, Г.В. Торгашов, И.Г. Торгашов [и др.] // *Радиотехника.* – 2005. – № 4. – С. 35–40.

4. Zhao Q.Z., Ciobanu F., Wang L.J. Self-organized regular arrays of carbon nanocones induced by ultrashort laser pulses and their field emission properties // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105, iss. 8, 083103-1-4.

5. Диодная многолучевая автоэмиссионная электронная пушка / Н.А. Бушуев, Ю.А. Григорьев, П.Д. Шалаев [и др.] // *Нанотехника.* – 2006. – № 3. – С. 3–6.

6. Лазерные технологии и современное оборудование при изготовлении автоэмиссионных катодов из монолитного стеклоглерода / А.В. Конюшин, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко, И.А. Попов // *Вакуумная техника и технология.* – 2011. – Т. 21, № 2. – С. 95–98.

References

1. Lewellen J.W., Noonan J. Field-emission cathode gating for rf electron guns. *Phys. Rev. ST – Accel*, 2005, beams 8, 033502-1-9.

2. Grigor'ev Iu.A., Vasil'kovskii S.V., Shesterkin V.I., Iavtseva Z.A. Sposob formirovaniia topologii preimushchestvenno mnogoostriinogo katoda [A method of topology forming of the preferentially multipeak cathode]. *Patent RF N1738013. H01J 9/02, published 12.02.93.*

3. Sinitsin N.I., Torgashov G.V., Torgashov I.G. [et al.] Issledovanie vozmozhnostei postroeniia novykh vakuumnykh indikatorov i displeev na osnove uglerodnykh nanotrubnykh i nanoklasternykh avtokatodov [Examination of opportunities of build-up of new vacuum indicators and displays on the basis of carbon nanotube and nanocluster autocathodes]. *Radio-tekhnika*, 2005, no. 4, pp. 35-40.

4. Zhao Q.Z., Ciobanu F., Wang L.J. Self-organized regular arrays of carbon nanocones induced by ultrashort laser pulses and their field emission properties. *J. Appl. Phys.*, 2009, vol. 105, iss. 8, 083103-1-4.

5. Bushuev N.A., Grigor'ev Iu.A., Shalaev P.D. [et al.] Diodnaia mnogoluchevaia avtoemissionnaia elektronnaia pushka [Diode multibeam field-emission electronic gun]. *Nanotechnics*, 2006, no. 3, pp. 3-6.

6. Koniushin A.V., Sokolova T.N., Surmenko E.L., Popov I.A. Lazernye tekhnologii i sovremennoe oborudovanie pri izgotovlenii avtoemissionnykh katodov iz monolitnogo steklogleroda [Laser technologies and modern equipment in manufacture of autoemissive cathodes from monolithic glass-carbon]. *Vakuumnaia tekhnika i tekhnologiya*, 2011, vol. 21, iss. 2, pp. 95-98.

Получено 17.10.2014

УДК 616.31-039.57

**Т.П. Генинг¹, О.С. Воронова¹, Д.Р. Долгова¹, Т.В. Абакумова¹,
Л.В. Полуднякова¹, А.С. Курков^{1, 2, 3, 4}, И.О. Золотовский¹**

¹ Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

² Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Москва, Россия

³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Пермь, Россия

⁴ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1265 НМ НА РЕДОКС-ЗАВИСИМЫЕ ПРОЦЕССЫ В ОРГАНИЗМЕ-ОПУХОЛЕНОСИТЕЛЕ

Исследуется влияние непрерывного лазерного излучения на длине волны 1265 нм на редокс-зависимые процессы в организме-опухоленосителе с привитым раком шейки матки РШМ-5. Рассматривается возможность использования указанного диапазона длин волн для фотодинамической терапии на основе светоокислородного эффекта. Вместе с тем проанализирована возможность развития побочных эффектов, в частности лазериндуцированного канцерогенеза, под воздействием лазерного излучения на соответствующей длине волны.

Ключевые слова: ВКР-лазер, оксидативный стресс, редокс-зависимые процессы, рак шейки матки.

**T.P. Gening¹, O.S. Voronova¹, D.R. Dolgova¹, T.V. Abakumova¹,
L.V. Poludniakova¹, A.S. Kurkov^{1, 2, 3, 4}, I.O. Zolotovskii¹**

¹ Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

² A.M. Prokhorov Institute of General Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,

³ Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation,

⁴ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

THE EFFECT OF LASER RADIATION AT 1265 NM ON REDOX-DEPENDENT PROCESSES IN TUMOR-BEARING ORGANISMS

We study the effect provided by a quasi-continuous wave laser operating at the wavelength of 1265 nm on redox-dependent processes in tumor-bearing organism implanted with cervical cancer-5 (CC5). The laser wavelength is eligible for potential applications in photodynamic therapy based on light-oxygen effect. Also, we analyze possible side effects, in particular, laser-induced carcinogenesis.

Keywords: Raman laser, oxidative stress, redox-dependent processes, cervical cancer.

1. Введение

Высокоинтенсивное лазерное излучение используется в хирургии для нанесения поверхностных и глубинных разрезов, испарения поверхностных дефектов кожи, коагуляции и карбонизации тканей, их стерилизации. В ряде работ показана перспективность использования высокоинтенсивного лазерного излучения вынужденного комбинационного рассеивания (ВКР) для лечения онкологических заболеваний [1–3]. В течение нескольких лет активно анализируется идея, согласно которой инфракрасный свет инициирует фотохимические реакции, напрямую возбуждая молекулы кислорода в биологических системах [4–10]. Тем самым происходит фотогенерация синглетного кислорода из растворенного в клетках молекулярного кислорода. Вступая в реакцию с биомолекулами, он может участвовать в цепных свободнорадикальных реакциях, вызывать окисление белковых молекул, инициировать процессы перекисного окисления липидов. Результатом такого воздействия может стать гибель клеток путем некроза или апоптоза.

Мощным источником излучения, способным эффективно работать в этой области, может служить ВКР-лазер с накачкой от иттербиевого волоконного лазера [11]. В работах [2, 3] с использованием перестраиваемого ВКР-лазера на примере органических жидкостей и клеточных культур показано, что максимальная генерация синглетного кислорода достигается при облучении на длине волны 1264–1270 нм. Линия поглощения O_2 в этой области спектра наиболее активна ввиду практически полного отсутствия поглощения конкурирующими хромофорами. При этом ширина спектра действия по полувысоте составляет 15–20 нм. В работе [12] приведены результаты клинического применения ВКР-лазера с длиной волны излучения 1262 нм, которые показали исключительную перспективность использования таких излучателей для лечения онкологических заболеваний. В настоящей работе оценена возможность инициировать оксидативный стресс в опухолевой ткани рака шейки матки с помощью непрерывного лазерного излучения на длине волны 1265 нм. Вместе с тем проведена оценка влияния квазинепрерывного лазерного излучения с рабочей длиной волны 1265 нм на редокс-зависимые процессы в организме-опухоленосителе.

2. Материал и методы исследования

Исследование проводили на белых беспородных мышах с экспериментальным раком шейки матки (РШМ-5, опухолевый штамм из НИИ экспериментальной диагностики и терапии опухолей РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН) (рис. 1).



Рис. 1. Мышь с опухолью РШМ-5 на 30-е сутки после прививки опухоли

В качестве источника излучения применялся ВКР-лазер с использованием двукратного рамановского излучения иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1125 мкм. В качестве среды преобразователя применялось стандартное телекоммуникационное волокно. Максимальная непрерывная выходная мощность используемого излучения составила около 4 Вт на длине волны (1265 ± 3) нм. Соответствующий спектр излучения представлен на рис. 2.

Плотность энергии лазерного излучения, поглощаемого биотканью (\mathcal{E} , Дж/см²), с учетом большей (по сравнению с глубиной проникновения лазерного излучения, составляющей на длине 1265 нм менее 1,5 мм) толщины облучаемой биоткани рассчитывалась из простейшего соотношения: $\mathcal{E} = Pt/S$, где P – средняя мощность излучения, Вт; t – время облучения, с; S – площадь лазерного пятна на биоткани, см². При облучении в режиме 10 мин доза высокоинтенсивного излучения составляла 0,1 Дж/см², а при двухминутном облучении – 0,02 кДж/см²;

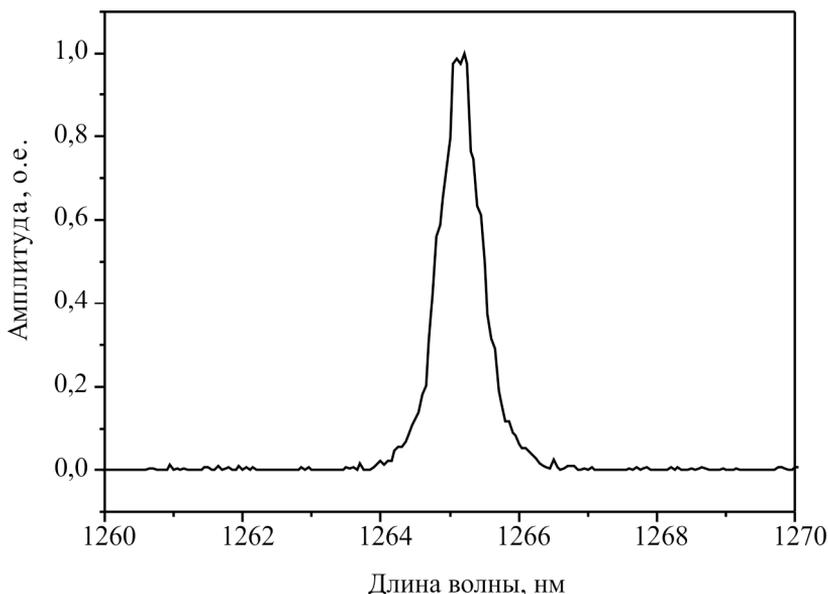


Рис. 2. Спектр излучения ВКР-лазера

таким образом, суммарная доза 10 сеансов в первом случае составила 1 кДж/см^2 , а во втором – $0,2 \text{ кДж/см}^2$.

В рамках проведенного эксперимента оценивалась интенсивность процессов ПОЛ в эритроцитах и плазме крови животных с РШМ-5 и интактных животных как до, так и после воздействия лазерного излучения на длине волны, соответствующей резонансному поглощению кислорода – 1265 нм по содержанию вторичного продукта ПОЛ малонового диальдегида (МДА). Активность ферментативного звена антиоксидантной системы (АОС) оценивали по уровню супероксиддисмутазы (СОД) каталазы, глутатионредуктазы (ГР) и глутатион-S-трансферазы (ГТ). Определение белка проводили по методу Брэдфорда [13, 14].

Статистическая значимость полученных результатов оценивалась с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни. Различия между группами считали достоверными при $p \leq 0,05$ [15, 16].

3. Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что квазинепрерывное лазерное облучение на длине волны (1265 ± 3) нм здоровых мышей приводит к достоверному дозозависимому увеличению уровня МДА в эритроцитах при одновременном повышении активности ферментов АОС (табл. 1).

Таблица 1

Показатели системы ПОЛ – АО в эритроцитах мышей с экспериментальным РШМ после воздействия лазерного излучения в различных дозах

Показатель		МДА, мкмоль/л	СОД, у.е.	Каталаза, моль/с/л	ГР, ммоль/ мин/л	ГТ, ммоль/ мин/л
Здоровые <i>N</i> = 12	без облучения	219,65±7,57	1,46±0,10	17,13±0,64	0,43±0,03	0,14±0,02
	0,2 кДж/см ²	279,66±13,32*	2,04±0,12*	55,51±4,62*	0,53±0,04*	0,26±0,01*
	1 кДж/см ²	376,07±16,78*	1,64±0,18	74,32±18,56*	0,52±0,04*	0,24±0,03*
Мыши с РШМ-5 (30-е сутки) <i>N</i> = 12	без облучения	325,94±14,36	1,46±0,14	60,09±3,02	0,61±0,06	0,56±0,06
	0,2 Дж/см ²	260,86±18,22*	1,22±0,23	49,41±1,77*	0,72±0,09	0,18±0,01*
	1 кДж/см ²	318,5±27,91	1,25±0,12	65,93±6,04	0,78±0,09	0,70±0,08

* данные, статистически значимо отличающиеся от данных без облучения, $p < 0,05$.

У мышей с РШМ-5 на 30-е сутки после трансплантации опухоли облучение лазером ВКР в дозе 0,2 кДж/см² статистически значимо снижает уровень МДА, активность ГТ и каталазы. Уровень СОД и ГР колеблется в пределах коридора нормы. Снижение активности ферментов АОС может быть связано с уменьшением уровня МДА. При облучении в дозе 1 кДж/см² уровень МДА в эритроцитах мышей на 30-е сутки после трансплантации опухоли достоверно не изменяется, так же, как и активность ферментов АОС (см. табл. 1).

Показатели системы ПОЛ-АОС в плазме крови при облучении лазером с указанной длиной волны имеют разнонаправленную динамику (табл. 2). Наблюдается значительное повышение уровня МДА при одновременном повышении ГТ и неизменной активности остальных ферментов АОС у здоровых мышей при облучении в дозе 0,2 кДж/см². Доза в 1 кДж/см² вызывает уменьшение уровня МДА и снижение активности АОС в плазме крови здоровых мышей.

У мышей на 30-е сутки после трансплантации РШМ-5 отмечено значительное снижение уровня МДА после облучения ВКР-лазером в дозе 0,2 кДж/см² и его повышение при облучении в дозе 1 кДж/см². Динамика активности ферментов АОС при облучении в дозе 0,2 кДж/см² разнонаправленна. При облучении в дозе 1 кДж/см² снижается уровень каталазы при неизменной активности других ферментов АОС. Все вышеперечисленное позволяет говорить о развитии сильного оксидативно-

го стресса при поглощенной дозе лазерного излучения свыше 1 кДж/см² (см. табл. 2).

Таблица 2

Показатели системы ПОЛ – АО в плазме крови мышей с РШМ-5 после облучения лазером ВКР в дозах 0,2 и 1 кДж/см²

Показатель		МДА, мкмоль/л	Каталаза, ммоль/с/л	ГР, ммоль/ мин/л	ГТ, ммоль/ мин/л
Интактный контроль <i>n</i> = 16	без облучения	2,95±0,24	0,100±0,019	0,014±0,004	0,016±0,003
	0,2 кДж/см ²	3,82±0,20*	0,104±0,037	0,016±0,008	0,033±0,005*
	1 кДж/см ²	1,03±0,00*	0,040±0,007*	0,019±0,003	0,006±0,002*
Мыши с РШМ-5 (30-е сутки) <i>N</i> = 13	без облучения	6,23±0,31	0,172±0,061	0,005±0,001	0,038±0,003
	0,2 кДж/см ²	1,82±0,46*	0,070±0,040*	0,022±0,004*	0,036±0,004
	1 кДж/см ²	10,7±1,26*	0,099±0,060	0,005±0,001	0,035±0,002

* данные, статистически значимо отличающиеся от данных без облучения, $p < 0,05$.

4. Заключение

Таким образом, в рамках настоящей работы получены результаты, указывающие на сильное влияние непрерывного лазерного излучения на длине волны 1265 нм на мышей с привитым раком шейки матки. Показано, что влияние непрерывного лазерного излучения на соответствующей длине волны носит сильный дозозависимый характер. Излучение в дозе 0,2 кДж/см² увеличивало уровень МДА при одновременном повышении активности каталазы и ГТ в плазме крови и эритроцитах. Облучение в дозе 1 кДж/см² приводило к значимому увеличению уровня ПОЛ в эритроцитах при одновременном уменьшении в плазме крови интактных животных. Активность ферментов АОС при этом также увеличивалась в эритроцитах и снижалась в плазме крови. Полученная динамика параметров системы ПОЛ – АОС позволяет предполагать, что исследуемые источники лазерного излучения в организме интактных животных вызывают переход системы ПОЛ – АОС на более высокий уровень функционирования, не стимулируя при этом возникновение оксидативного стресса. Воздействие лазерного излучения на мышей с РШМ-5 зависит от дозы облучения. При облучении ВКР-лазером с рабочей длиной волны 1265 нм в дозе 0,2 кДж/см² на 30-е сутки после трансплантации опухоли отмечено понижение уровня МДА и активности АОС в эритроцитах, плазме крови. Увеличение дозы облучения до 1 кДж/см² на 30-е сутки после трансплантации опухоли

ли приводит к повышению уровня МДА при сниженной активности АОС в плазме крови, показатели в эритроцитах при этом значимо не изменяются. Показано, что при воздействии непрерывным лазерным облучением на длине волны 1265 нм в дозе 1 кДж/см² в организме животных-опухоленосителей возникает сильный оксидативный стресс. Представляется, что данный эффект может быть использован для лечения ряда онкозаболеваний, например рака шейки матки типа РШМ-5.

На основании проведенных экспериментов с высокой степенью точности можно сделать следующие выводы:

1. Лазерное облучение на длине волны 1265 нм инициирует развитие сильного оксидативного стресса солидной опухоли (на примере солидной опухоли рака шейки матки), степень выраженности которого зависит от дозы поглощенного излучения.

2. Кроме того, можно предположить, что узкополосное лазерное излучение на длине волны 1265 нм (в области резонансного поглощения молекулярного кислорода) может эффективно использоваться для разрушения солидных злокачественных опухолей, например рака шейки матки.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Анализ эффективности использования непрерывного лазерного излучения с длиной волны 1265 нм для инициирования оксидативного стресса в ткани солидной злокачественной опухоли / Т.П. Генинг, О.С. Воронова, Д.Р. Долгова, Т.В. Абакумова, И.О. Золотовский, Е.М. Шолохов, А.С. Курков, С.О. Генинг // Квантовая электроника. – 2012. – № 42 (9). – С. 805–807.

2. A highpower tunable Raman fiber ring laser for the investigation of singlet oxygen production from direct laser excitation around 1270 nm / F. Anquez, E. Courtade, A. Sivery, P. Suret, S. Randoux // Opt. Express. – 2010. – Vol. 18 (22). – P. 22928–22936.

3. Cancerous cell death from sensitizer free photoactivation of singlet oxygen / F. Anquez, I. El Yazidi-Belkoura, S. Randoux, P. Suret, E. Courtade // Photochem. Photobiol. – 2012. – No. 88. – P. 167–174.

4. Raman fiber laser for the drug-free photodynamic therapy / A.S. Yusupov, S.E. Yoncharov, J.D. Zalevskii, V.M. Paramonov, A.S. Kurkov // Laser Physics. – 2010. – Vol. 20. – P. 357–359.

5. Первичные механизмы неспецифического воздействия низкоинтенсивного лазерного излучения на эритроциты с участием молекулярного кислорода / С.Д. Захаров, С.А. Скопинов, В.М. Чудновский [и др.] // Изв. АН СССР. Сер.: Физика. – 1990. – № 54 (8). – С. 1629–1635.

6. Захаров С.Д., Иванов А.В. Светокислородный эффект в клетках и перспективы его применения в терапии опухолей // Квантовая электроника. – 1999. – № 29 (3). – С. 192–214.

7. Zakharov S.D., Ivanov A.V. Light-oxygen effect as a physical mechanism for activation of biosystems by quasi-monochromatic light (a review) // Biophysics. – 2005. – Vol. 50 (1). – P. 64–85.

8. Schweitzer C., Schmidt R. Physical Mechanisms of Generation and Deactivation of Singlet Oxygen // Chem. Rev. – 2003. – Vol. 103. – P. 1685–1757.

9. Activation of Molecular Oxygen by Infrared Laser Radiation in Pigment-Free Aerobic System / A.A. Krasnovsky, N.N. Drozdova, A.V. Ivanov, R.V. Ambartsumian // Biochemistry (Moscow). – 2003. – Vol. 68. – P. 963–966.

10. Solvent dependence of the steady-state rate of $1O_2$ generation upon excitation of dissolved oxygen by cw 1264 nm laser radiation in air-saturated solutions: Estimates of the absorbance and molar absorption coefficients of oxygen / A.A. Krasnovsky, Ya.V. Roumbal, A.V. Ivanov, R.V. Ambartsumian // Chem. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 430. – P. 260–264.

11. Raman Laser Based on a Fiber with Variable Mode Structure / A.E. Bednyakova, M.P. Fedoruk, A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, S.K. Turitsyn // Laser Phys. – 2011. – Vol. 21 (2). – P. 290–293.

12. Юсупов А.С., Захаров С.Д. Лазероиндуцированный светокислородный эффект в онкологической практике // Креативная хирургия и онкология. – 2011. – № 2. – С. 24–32.

13. Bradford M.M. Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding // Anal. Biochem. – 1976. – Vol. 72. – P. 248–254.

14. Кнорре Д. Г., Мызина С. Д. Биологическая химия. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.

15. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // Annals of Mathematical Statistics. – 1947. – Vol. 18. – P. 50–60.

16. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. – Л.: Медицина, 1973. – 141 с.

References

1. Gening T.P., Voronova O.S, Dolgova D.R., Abakumova T.V., Zolotovskii I.O., Sholokhov E.M., Kurkov A.S., Gening S.O. Analiz effektivnosti ispol'zovaniia nepreryvnogo lazernogo izlucheniia s dlinoi volny 1265 nm dlia initsirovaniia oksidativnogo stressa v tkani solidnoi zlokachestvennoi opukholi [Analysis of the effectiveness of the use of CW laser radiation with wavelength 1265 nm for the initiation of oxidative stress in the tissue of solid malignant tumors]. *Kvantovaia elektronika*, 2012, no. 42 (9), pp. 805-807.
2. Anquez F., Courtade E., Sivery A., Suret P., Randoux S. A high-power tunable Raman fiber ring laser for the investigation of singlet oxygen production from direct laser excitation around 1270 nm. *Opt. Express*, 2010, vol. 18 (22), pp. 22928-22936.
3. Anquez F., El Yazidi-Belkoura I., Randoux S., Suret P., Courtade E. Cancerous cell death from sensitizer free photoactivation of singlet oxygen. *Photochem. Photobiol.*, 2012, no. 88 (1), pp. 167-174.
4. Yusupov A.S., Yoncharov S.E., Zalevskii J.D., Paramonov V.M., Kurkov A.S. Raman fiber laser for the drug-free photodynamic therapy. *Laser Physics*. 2010, vol. 20 (2), pp. 357-359.
5. Zakharov S.D., Skopinov S.A., Chudnovskii V.M. [et al.] Perichnye mekhanizmy nespetsificheskogo vozdeistviia nizkointensivnogo lazernogo izlucheniia na eritrotsity s uchastiem molekuliarnogo kisloroda [Primary mechanisms of nonspecific effects of low-intensity laser radiation on erythrocyte with the participation of molecular oxygen]. *Izvestiia Akademii nauk USSR. Seriya "Fizika"*, 1990, no. 54 (8), pp. 1629-1635.
6. Zakharov S.D., Ivanov A.V. Svetokislorodnyi effekt v kletkakh i perspektivy ego primeneniia v terapii opukholei [Svetosilinyh effect in cells and perspectives of its application in the therapy of tumors]. *Kvantovaia elektronika*, 1999, no. 29 (3), pp. 192-214.
7. Zakharov S.D., Ivanov A.V. Light-oxygen effect as a physical mechanism for activation of biosystems by quasi-monochromatic light (a review). *Biophysics*, 2005, vol. 50 (1), pp. 64-85.
8. Schweitzer C., Schmidt R. Physical Mechanisms of Generation and Deactivation of Singlet Oxygen. *Chem. Rev.*, 2003, vol. 103, pp. 1685-1757.
9. Krasnovsky A.A., Drozdova N.N., Ivanov A.V., Ambartsumian R.V. Activation of Molecular Oxygen by Infrared Laser Radiation in Pigment-Free Aerobic System. *Biochemistry (Moscow)*, 2003, vol. 68, pp. 963-966.

10. Krasnovsky A.A., Roumbal Ya.V., Ivanov A.V., Ambartzumian R.V. Solvent dependence of the steady-state rate of $1O_2$ generation upon excitation of dissolved oxygen by cw 1264 nm laser radiation in air-saturated solutions: Estimates of the absorbance and molar absorption coefficients of oxygen. *Chem. Phys. Lett.*, 2006, vol. 430, pp. 260-264.

11. Bednyakova A.E., Fedoruk M.P., Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Turitsyn S.K. Raman Laser Based on a Fiber with Variable Mode Structure. *Laser Phys.*, 2011, vol. 21 (2), pp. 290-293.

12. Iusupov A.S., Zakharov S.D. Lazeroindutsirovannyi svetokislorodnyi effekt v onkologicheskoi praktike [Laserengraving light-oxygen effect in Oncology practice]. *Kreativnaia khirurgiia i onkologiia*, 2011, no. 2, pp. 24-32.

13. Bradford M.M. Rapid and Sensitive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding. *Anal. Biochem.*, 1976, vol. 72, pp. 248-254.

14. Knorre D.G., Myzina S.D. Biologicheskaiia khimiia [Biological chemistry]. Moscow: Vysshiaia shkola, 2000, 479 p.

15. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, pp. 50-60.

16. Gubler E.V., Genkin A.A. Primenenie neparametricheskikh kriteriev statistiki v mediko-biologicheskikh issledovaniiaxh [The use of non-parametric criteria of statistics in biomedical research]. Leningrad: Meditsina, 1973, 141 p.

Получено 15.10.2014

УДК 615.849.19

С.А. Филатова^{1, 2}, В.Б. Цветков¹, А.С. Курков^{1, 2, 3, 4}

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН,
Пермь, Россия

⁴ Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ИМПУЛЬСНЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 2,1 МКМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Реализован импульсный волоконный гольмиевый лазер, излучающий на длине волны 2,1 мкм. Максимальная средняя мощность составила 8 Вт, пиковая – 45 Вт, длительность импульса – 250 нс. Исследовано воздействие излучения гольмиевого волоконного лазера на образцы биологических тканей.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, воздействие лазерного излучения на биологические ткани, волоконный лазер, модуляция добротности, лазеры в медицине.

S.A. Filatova^{1, 2}, V.B. Tsvetkov¹, A.S. Kurkov^{1, 2, 3, 4}

¹ A.M. Prokhorov Institute of General Physics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

³ Photonics Laboratory of Perm Scientific Center of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

⁴ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

HO FIBER LASER EMITTING AT A WAVELENGTH OF 2,1 MICRONS FOR MEDICAL APPLICATION

Pulsed Ho fiber laser emitting at a wavelength of 2,1 microns was realized. The maximum average power was 8 W, peak powers – 45 W, pulse duration – 250 ns. Effect of Ho fiber laser radiation on samples of biological tissues was studied.

Keywords: Ho fiber laser, effect of Ho fiber laser radiation on samples of biological tissues, fiber laser, Q-switching, laser medical application.

1. Введение

На сегодняшний день наблюдается растущий интерес к исследованию лазеров, длина волны излучения которых лежит в области более 2 мкм. Это обусловлено весьма широкой областью их применения как в научных исследованиях, так и в прикладных сферах. Например, в мониторинге газового состава воздуха, контроле окружающей среды, спектроскопии, тепловедении, медицине, для военно-технического применения и др [1, 2].

Особый интерес представляет использование двухмикронных лазеров в медицине из-за сильного поглощения излучения в этой спектральной области биологическими тканями. Это, в свою очередь, обусловлено высоким коэффициентом поглощения молекулами воды. Так, поглощение воды в этой области составляет около 100 см^{-1} , в то же время в области излучения широко распространённых иттербиевых волоконных лазеров (1,06–1,1 мкм) оно не превышает 1 см^{-1} . Это определяет достаточно широкое использование гольмиевых твердотельных лазеров [3]. Однако можно отметить ряд их недостатков. Они работают только в импульсном режиме с генерацией высокоэнергетичных длинных импульсов с частотой повторения до 20 Гц. Очевидно, что при существующем разнообразии патологий в ряде случаев требуются другие режимы работы, которые могут обеспечить волоконные гольмиевые лазеры. Кроме того, в этом случае следует ожидать снижения стоимости лазера и его обслуживания. Также необходимо отметить, что одним из главных направлений развития современной хирургии являются эндоскопические методики. Волоконные лазеры легко сопрягаются с волокном, осуществляющим транспортировку излучения к поражённому органу. Поэтому активно ведутся исследования в области применения волоконных лазеров для медицинских целей [4].

В настоящее время с использованием волокон, легированных ионами гольмия, продемонстрирована лазерная генерация в диапазоне 2–2,21 мкм [5, 6]. Максимальная продемонстрированная выходная мощность составила 140 Вт [7], а квантовая эффективность – 0,81 [8].

В данной статье представлены результаты разработки импульсного гольмиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 2,1 мкм и проведения предварительных экспериментов по воздействию лазерного излучения на различные биологические ткани.

2. Схема лазера

На рис. 1 показана схема гольмиевого волоконного лазера. Для накачки лазера использовался иттербиевый волоконный лазер с длиной волны генерации 1,125 мкм и максимальной мощностью 28,2 Вт. В свою очередь, накачка иттербиевого лазера осуществлялась двумя полупроводниковыми лазерными диодами с длиной волны излучения 975 нм и выходной мощностью до 26 Вт каждый.

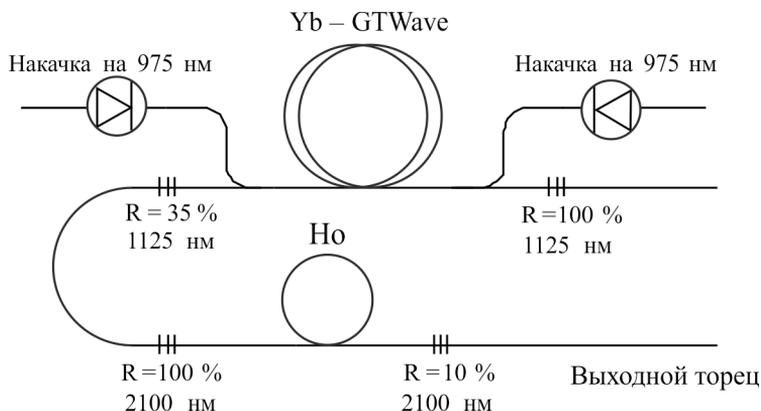


Рис. 1. Схема гольмиевого волоконного лазера

В качестве активной среды лазера использовалось оптическое волокно, легированное тонами гольмия, изготовленное в Пермской научно-производственной приборостроительной компании. Концентрация активной примеси составила $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, разность показателей преломления сердцевины и оболочки 0,005, длина волны отсечки первой высшей моды – около 2 мкм. Резонатор гольмиевого лазера был образован двумя волоконными брэгговскими решетками (ВБР), входной и выходной, с резонансной длиной волны 2,1 мкм и коэффициентами отражения 1 и 0,1 соответственно. Импульсный режим генерации обеспечивался за счет эффекта самомодуляции добротности, вызванной кластеризацией активных ионов вследствие их высокой концентрации [9].

3. Параметры лазера

На рис. 2 приведена зависимость выходной средней мощности гольмиевого волоконного лазера от мощности накачки иттербиевого лазера. Максимальная выходная мощность составила 7,6 Вт, На рис. 3 представлен выходной спектр излучения гольмиевого волоконного лазера.

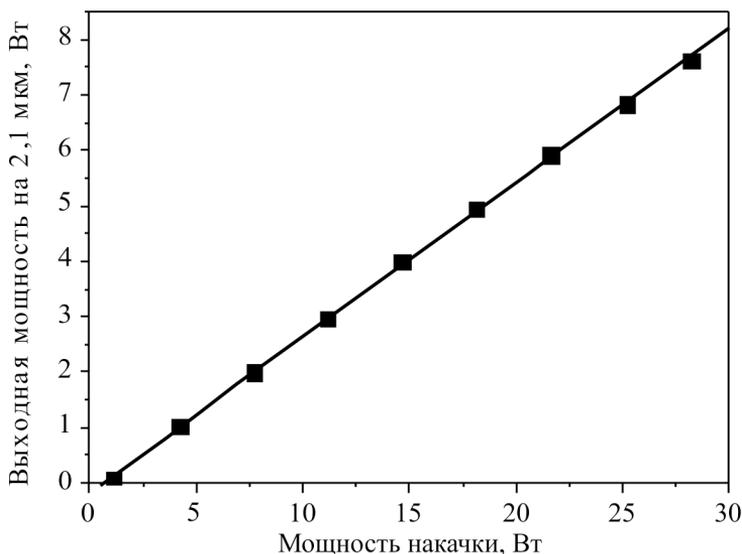


Рис. 2. Зависимость средней выходной мощности гольмиевого лазера от мощности накачки

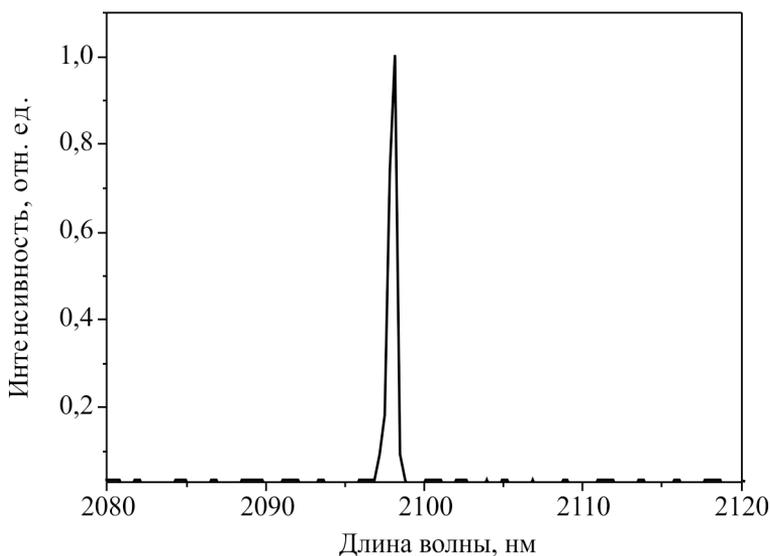


Рис. 3. Спектр излучения гольмиевого лазера

Исследование динамических характеристик лазера показало, что генерация происходит в импульсном режиме. Типичная осциллограмма представлена на рис. 4.

Длительность импульсов вблизи порога генерации составляла около 1 мкс, а при увеличении мощности уменьшалась до 250 нс прак-

тически независимо от мощности накачки. Частота следования импульсов существенно зависела от мощности накачки, что иллюстрируется на рис. 5.

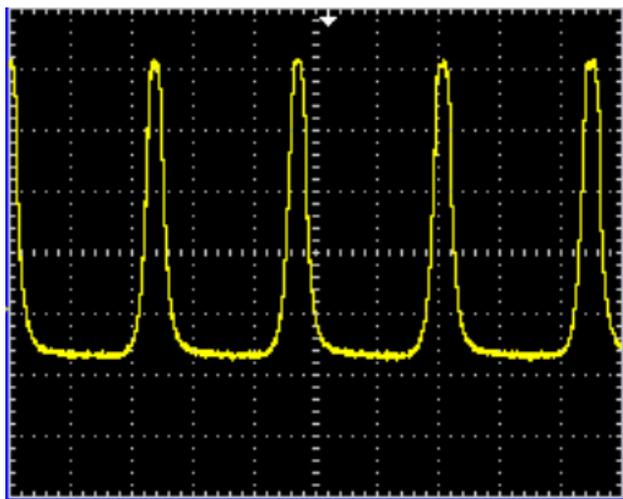


Рис. 4. Типичная осциллограмма последовательности импульсов. Вся развертка соответствует 10 мкс

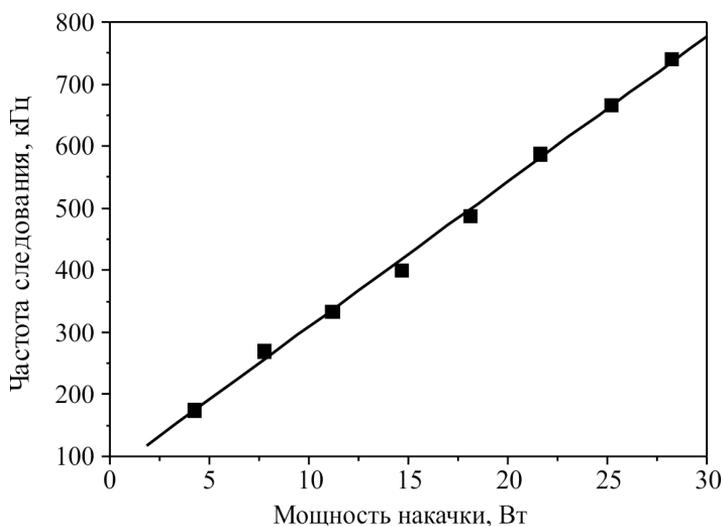


Рис. 5. Зависимость частоты следования импульсов от мощности накачки

На рис. 6 показана зависимость выходной пиковой мощности от мощности накачки, ее максимальное значение составило 47 Вт. Энергия импульса составила около 10 мкДж.

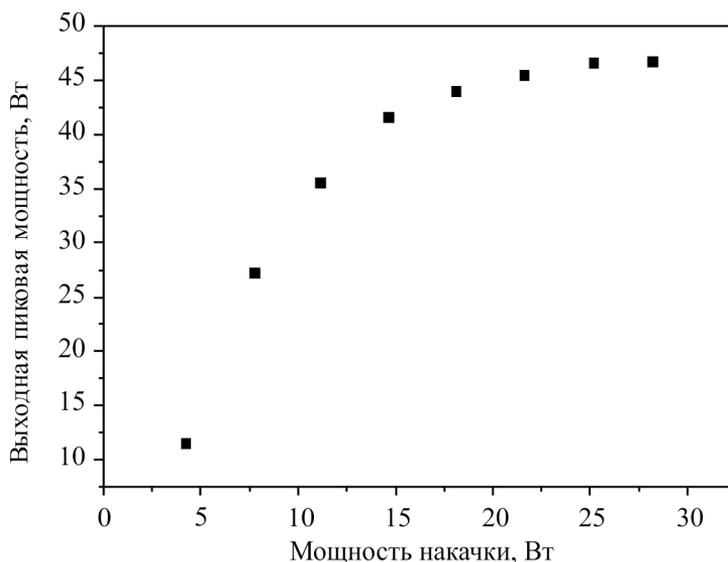


Рис. 6. Зависимость пиковой мощности гольмиевого лазера от мощности накачки

4. Результаты воздействия на биологические объекты

Лазерному облучению подвергались образцы ткани организма коровы: мышечная ткань, костная, печень. Облучение проводилось с расстояния порядка 1 см, при этом выбиралось время воздействия, при котором не возникает карбонизация ткани. В качестве манипулятора использовался цанговый карандаш, так что процедура облучения напоминала процесс рисования.

На рис. 7 представлено изображение участка мышечной ткани, обработанного излучением гольмиевого лазера при ручном сканировании со скоростью около 1 см/с. Хорошо видны участки ткани, на которых произошло свертывание белка. Обращает на себя внимание локализация обработанных участков, толщина полученных полосок свернутого белка составляет 0,5–1 мм. При этом термическое повреждение соседних участков не отмечено. Аналогичный результат наблюдался на тканях печени (рис. 8). Поскольку процесс сворачивания белка сопровождается закупориванием кровеносных сосудов, можно ожидать, что лазерное облучение будет оказывать кровеостанавливающий эффект. Кроме того, была предпринята попытка сварки образцов печени. Так, на рис. 9, а представлен образец ткани печени, разрезанный на две части. Для сварки эти части приводились в контакт, а место контакта облучалось в ручном режиме. Время облучения составило несколько

секунд при длине разреза порядка 1 см. Результаты сварки представлены на рис. 9, б. Следует отметить, что ранее для этой цели предпринимались попытки использования полупроводникового лазера [10].



Рис. 7. Результаты воздействия на мышечную ткань

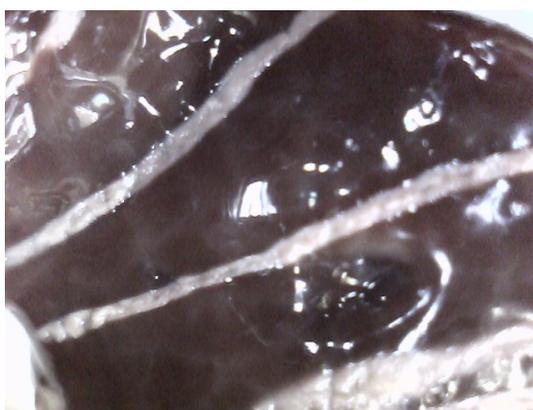
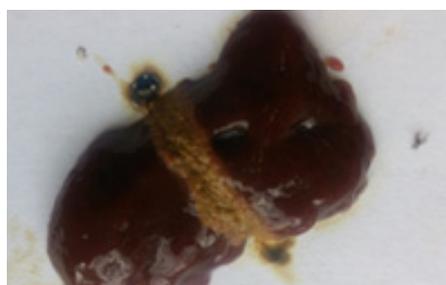


Рис. 8. Результаты воздействия на ткань печени



а



б

Рис. 9. Результаты сварки ткани печени

При воздействии на пористую костную ткань наблюдался эффект, который можно определить как «таяние» костной ткани или ее плавление без обугливания.

5. Выводы

В результате проведенных работ реализован компактный гольмиевый волоконный лазер, излучающий в импульсном режиме. Максимальная средняя мощность на длине волны 2,1 мкм составила 7,6 Вт, пиковая – 47 Вт. Проведены предварительные эксперименты по воздействию излучения лазера на биологические объекты, которые показали перспективность его применения в ряде областей. Однако для практического использования лазера необходимы клинические исследования.

Список литературы

1. Development of a thulium (TM:YAP) laser system for brain tissue ablation / T. Bilici, S. Mutlu, H. Kalaycioglu, A. Kurt, A. Sennaroglu, M. Gulsoy // *Lasers in Medical Science*. – 2011. – Vol. 26, iss. 5. – P. 699–706.

2. Минаев В.П., Жилин К.М. Современные лазерные аппараты для хирургии и силовой терапии на основе полупроводниковых и волоконных лазеров. Рекомендации по выбору и применению. – М.: Издатель И.В. Балабанов, 2009. – 48 с.

3. Грачев С.В. Гольмиевый лазер в медицине. – М.: Триада-Х, 2003. – 240 с.

4. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber / A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, O.I. Medvedkov, V.V. Dvoyrin, Yu.N. Pyrkov, V.B. Tsvetkov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina // *Laser Phys. Letters*. – 2009. – Vol. 6. – P. 661–664.

5. Tunc B., Gulsoy M. Tm:Fiber laser ablation with real-time temperature monitoring for minimizing collateral thermal damage: *ex vivo* dosimetry for ovine brain // *Lasers in Surgery and Medicine*. – 2013. – Vol. 45. – P. 48–56.

6. Гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,21 мкм / С.О. Антипов, В.А. Камынин, О.И. Медведков, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина, А.С. Курков, А.В. Бараников // *Квантовая электроника*. – 2013. – № 43. – С. 603–604.

7. High power operation of cladding pumped holmium-doped silica fibre lasers / A. Hemming, S. Bennetts, N. Simakov, A. Davidson, J. Haub, A. Carter // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 4560–4567.

8. Гольмиевый волоконный лазер с рекордной квантовой эффективностью / А.С. Курков, Е.М. Шолохов, В.Б. Цветков, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина, О.И. Медведков, А.Ф. Косолапов // Квантовая электроника. – 2011. – № 41. – С. 492–494.

9. Dynamic behavior of laser based on the heavily holmium doped fiber / A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina // Laser Physics Letters. – 2010. – Vol. 7. – P. 587–590.

10. Бордуновский В.Н., Бондаревский И.Я. Использование высокоинтенсивного лазерного излучения при органосберегающем хирургическом лечении очаговых образований печени // Лазерная медицина. – 2004. – Т. 8, № 3. – С. 8–9.

References

1. Bilici T., Mutlu S., Kalaycioglu H., Kurt A., Sennaroglu A., Gulsoy M. Development of a thulium (TM:YAP) laser system for brain tissue ablation. *Lasers in Medical Science*, 2011, vol. 26, iss. 5, pp. 699-706.

2. Minaev V.P., Zhilin K.M. Sovremennye lazernye apparaty dlia khirurgii i silovoi terapii na osnove poluprovodnikovykh i volokonnykh lazerov. Rekomendatsii po vyboru i primeneniuiu [Modern laser apparatus for surgery and weight therapy based on solid-state and fiber lasers. Recommendations on choice and use of]. Moscow: Izdatel' I.V. Balabanov, 2009, 48 p.

3. Grachev S.V. Gol'mieviy lazer v meditsine [Holmium laser in medicine]. Moscow: Triada-X, 2003, 240 p.

4. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber. *Laser Phys. Letters*, 2009, vol. 6, pp. 661-664.

5. Tunc B., Gulsoy M. Tm:Fiber laser ablation with real-time temperature monitoring for minimizing collateral thermal damage: *ex vivo* dosimetry for ovine brain. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2013, vol. 45, pp. 48-56.

6. Antipov S.O., Kamynin V.A., Medvedkov O.I., Marakulin A.V., Minashina L.A., Kurkov A.S., Baranikov A.V. Gol'mieviy volokonnyi lazer s dlinnoi volny izlucheniia 2,21 mkm [Holmium fiber laser with a wavelength of 2.21 μm]. *Kvantovaya elektronika*, 2013, no. 43, pp. 603-604.

7. Hemming A., Bennetts S., Simakov N., Davidson A., Haub J., Carter A. High power operation of cladding pumped holmium-doped silica fibre lasers. *Optics Express*, 2013, vol. 21, pp. 4560-4567.

8. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A., Medvedkov O.I., Kosolapov A.F. Gol'mieviy volokonnyi lazer s rekordnoi kvantovoi effektivnost'iu [Holmium fiber laser with record quantum efficiency]. *Kvantovaya elektronika*, 2011, no. 41, pp. 492-494.

9. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Marakulin A.V., Minashina L.A. Dynamic behavior of laser based on the heavily holmium doped fiber. *Laser Physics Letters*, 2010, vol. 7, pp. 587-590.

10. Bordunovskii V.N., Bondarevskii I.Ia. Ispol'zovanie vysokointensivnogo lazernogo izlucheniia pri organosberegaiushchem khirurgicheskom lechenii ochagovykh obrazovaniy pecheni [The use of high-intensity laser radiation in organ-preserving surgical treatment of focal liver formations]. *Lazernaya meditsina*, 2004, vol. 8, no. 3, pp. 8-9.

Получено 16.10.2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

С.В. Фирстов

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории волоконных лазеров и усилителей Научного центра волоконной оптики РАН, г. Москва, e-mail: fir@fo.gpi.ru

S.V. Firstov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Laboratory of fiber lasers and amplifiers, Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: fir@fo.gpi.ru

С.В. Алышев

младший научный сотрудник лаборатории волоконных лазеров и усилителей Научного центра волоконной оптики РАН, г. Москва, e-mail: alyshs@fo.gpi.ru

S.V. Alyshev

Junior Research Fellow, Laboratory of fiber lasers and amplifiers, Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: alyshs@fo.gpi.ru

М.А. Мелькумов

кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией волоконных лазеров и усилителей Научного центра волоконной оптики РАН, г. Москва, e-mail: melkoumov@fo.gpi.ru

M.A. Melkoumov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory of fiber lasers and amplifiers, Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: melkoumov@fo.gpi.ru

К.Е. Рюмкин

аспирант Научного центра волоконной оптики РАН, г. Москва, e-mail: riumkin@fo.gpi.ru

K.E. Rumkin

Ph.D. student, Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: riumkin@fo.gpi.ru

А.В. Шубин

научный сотрудник лаборатории волоконных лазеров и усилителей Научного центра волоконной оптики РАН, г. Москва, e-mail: shubin@fo.gpi.ru

A.V. Shubin

Research Fellow, Laboratory of fiber lasers and amplifiers Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: shubin@fo.gpi.ru

Е.М. Дианов

академик РАН, директор Научного центра волоконной оптики РАН, г. Москва, e-mail: dianov@fo.gpi.ru

E.M. Dianov

Academician, Director, Fiber Optics Research Center of of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: dianov@fo.gpi.ru

А.А. Вебер

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, e-mail: alexveb@gmail.com

A.A. Veber

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: alexveb@gmail.com

Ю.Н. Пырков

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, e-mail: pyrkovyun@lsk.gpi.ru

Iu.N. Pyrkov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: pyrkovyun@lsk.gpi.ru

В.С. Серегин

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, e-mail: seregin@lsk.gpi.ru

V.S. Seregin

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: seregin@lsk.gpi.ru

С.Я. Русанов

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, г. Москва, e-mail: s.rusanov@kapella.gpi.ru

S.Ia. Rusanov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: s.rusanov@kapella.gpi.ru

И.Э. Бессарабская

кандидат физико-математических наук, доцент Московского государственного университета приборостроения и информатики, г. Москва, e-mail: irina.bessarabskaya@gmail.com

I.E. Bessarabskaia

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Moscow State University for Instrument-making and Computer Science, Moscow, e-mail: irina.bessarabskaya@gmail.com

В.Б. Цветков

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

V.B. Tsvetkov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

А.В. Леонов

кандидат физико-математических наук, научный консультант ООО «Т8», г. Москва, e-mail: leonov.av@t8.ru

A.V. Leonov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Scientific Consultant at Company “T8”, Moscow, e-mail: leonov.av@t8.ru

О.Е. Наний

доктор физико-математических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, заведующий отделом ООО «Т8», г. Москва, e-mail: naniy@t8.ru

O.E. Naniy

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Lomonosov Moscow State University, Head of Department at Company “T8”, Moscow, e-mail: naniy@t8.ru

В.Н. Трещиков

кандидат физико-математических наук, генеральный директор ООО «Т8», г. Москва, e-mail: info@t8.ru

V.N. Treshchikov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, General Director at Company “T8”, Moscow, e-mail: info@t8.ru

А.С. Смирнов

аспирант кафедры прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета, младший научный сотрудник Лаборатории фотоники Пермского научного центра Уральского отделения РАН, г. Пермь, e-mail: a.s.smrnv@gmail.com

A.S. Smirnov

Ph.D. student, Perm National Research Polytechnic University, Junior Research Fellow, Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, e-mail: a.s.smrnv@gmail.com

В.В. Бурдин

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, научный сотрудник Лаборатории фотоники Пермского научного центра Уральского отделения РАН, г. Пермь, e-mail: vlaburdi@mail.ru

V.V. Burdin

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Research Fellow, Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, e-mail: vlaburdi@mail.ru

Ю.А. Константинов

кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории фотоники Пермского научного центра Уральского отделения РАН, г. Пермь, e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru.

Iu.A. Konstantinov

Ph.D. in Technical Sciences, Research Fellow, Photonics Laboratory of Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru.

А.А. Ляпин

младший научный сотрудник Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, г. Саранск, e-mail: andrei_lyapin@mail.ru

A.A. Liapin

Junior Research Fellow, Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: andrei_lyapin@mail.ru

П.А. Рябочкина

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, г. Саранск, e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru

P.A. Riabochkina

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru

А.Н. Чабушкин

младший научный сотрудник Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, г. Саранск, e-mail: chabushkin@mail.ru

A.N. Chabushkin

Junior Research Fellow, Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: chabushkin@mail.ru

С.Н. Ушаков

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, e-mail: userg@mail15.com

S.N. Ushakov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: userg@mail15.com

П.П. Федоров

доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией
Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, e-mail:
ppf@lst.gpi.ru

P.P. Fedorov

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of Laboratory,
A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, e-mail: ppf@lst.gpi.ru

А.А. Белоусов

инженер-конструктор 2-й категории ОАО «ЦКБА», аспирант Ом-
ского государственного технического университета, г. Омск, e-mail:
ckba@omsknet

A.A. Belousov

Development Engineer, JSC “CDBA”, Ph.D. student, Omsk State Tech-
nical University, Omsk, e-mail: ckba@omsknet

Ю.Н. Вольхин

ведущий инженер ОАО «ЦКБА», г. Омск, e-mail: ckba@omsknet

Iu.N. Volkhin

Leading Engineer, JSC “CDBA”, Omsk, e-mail: ckba@omsknet

А.В. Гамиловская

инженер-конструктор ОАО «ЦКБА», аспирант Омского государ-
ственного технического университета, г. Омск, e-mail: ckba@omsknet

A.V. Gamilovskaia

Development Engineer, JSC “CDBA”, Ph.D. student, Omsk State Tech-
nical University, Omsk, e-mail: ckba@omsknet

А.А. Дубровская

ведущий инженер ОАО «ЦКБА», г. Омск, e-mail: ckba@omsknet

A.A. Dubrovskaia

Leading Engineer, JSC “CDBA”, Omsk, e-mail: ckba@omsknet

Е.В. Тихонов

инженер-конструктор 2-й категории ОАО «ЦКБА», аспирант
Омского государственного технического университета, г. Омск,
e-mail: ckba@omsknet

E.V. Tikhonov

Development Engineer, JSC “CDBA”, Ph.D. student, Omsk State Technical University, Omsk, e-mail: ckba@omsknet

В.П. Первадчук

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: pervadchuk@mail.ru

V.P. Pervadchuk

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Applied Mathematics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: pervadchuk@mail.ru

А.Р. Давыдов

кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ardavydov@mail.ru

A.R. Davydov

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: ardavydov@mail.ru

А.Н. Труфанов

кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной математики и механики, директор Регионального центра информатизации Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: ant@pstu.ru

A.N. Trufanov

Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: ant@pstu.ru

Н.А. Труфанов

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: nat@pstu.ru

N.A. Trufanov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: nat@pstu.ru

Д.А. Бессонов

аспирант кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина, г. Саратов, e-mail: zmeev90@mail.ru

D.A. Bessonov

Ph.D. student, Y.A. Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, e-mail: zmeev90@mail.ru

А.В. Конюшин

ведущий инженер Межфакультетской учебно-исследовательской лаборатории лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, e-mail: pribor-t@mail.ru

A.V. Konushin

Leading Engineer, Interdepartmental Educational and Research Laboratory of Laser Engineering and Technology, Y.A. Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, e-mail: pribor-t@mail.ru

И.А. Попов

кандидат технических наук, техник-проектировщик Межфакультетской учебно-исследовательской лаборатории лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, e-mail: antaresrock@yandex.ru

I.A. Popov

Ph.D. in Technical Sciences, design techniques, Interdepartmental Educational and Research Laboratory of Laser Engineering and Technology, Y.A. Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, e-mail: antaresrock@yandex.ru

Т.Н. Соколова

кандидат технических наук, заведующая Межфакультетской учебно-исследовательской лабораторией лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, e-mail: pribor-t@mail.ru

T.N. Sokolova

Ph.D. in Technical Sciences, Head of Interdepartmental Educational and Research Laboratory of Laser Engineering and Technology, Y.A. Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, e-mail: pribor-t@mail.ru

Е.Л. Сурменко

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия», ведущий электроник Межфакультетской учебно-исследовательской лаборатории лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов, e-mail: surmenko@yandex.ru

E.L. Surmenko

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Welding and metallurgy, Senior Electronic, Interdepartmental Educational and Research Laboratory of Laser Engineering and Technology, Y.A. Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, e-mail: surmenko@yandex.ru

Т.П. Генинг

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой физиологии и патофизиологии Ульяновского государственного университета, г. Ульяновск

T.P. Gening

Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Department of Physiology and Pathophysiology, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

О.С. Воронова

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры физиологии и патофизиологии Ульяновского государственного университета, г. Ульяновск

O.S. Voronova

Ph.D. in Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Physiology and Pathophysiology, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Д.Р. Долгова

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры физиологии и патофизиологии Ульяновского государственного университета, г. Ульяновск

D.R. Dolgova

Ph.D. in Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Physiology and Pathophysiology, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Т.В. Абакумова

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры физиологии и патофизиологии Ульяновского государственного университета, г. Ульяновск.

T.V. Abakumova

Ph.D. in Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Physiology and Pathophysiology, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

Л.В. Полуднякова

кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры физиологии и патофизиологии Ульяновского государственного университета, г. Ульяновск

L.V. Poludniakova

Ph.D. in Biological Sciences, Senior Lecturer, Department of Physiology and Pathophysiology, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

А.С. Курков

доктор физико-математических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь; ведущий научный сотрудник Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва; директор Лаборатории фотоники Пермского научного центра Уральского отделения РАН, г. Пермь; ведущий научный сотрудник Ульяновского государственного университета, г. Ульяновск

A.S. Kurkov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University, Perm; Leading Research Fellow, A.M. Prokhorov Institute of General Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow; Head of Photonics Laboratory, Perm Scientific Centre of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm; Leading Research Fellow, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

И.О. Золотовский

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Ульяновского университета, г. Ульяновск

I.O. Zolotovskii

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Leading Research Fellow, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

С.А. Филатова

аспирант Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва; Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск

S.A. Filatova

Ph.D. student, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow; Ulyanovsk State University, Ulyanovsk

В.Б. Цветков

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

V.B. Tsvetkov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow

Научное издание

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

№ 1

Редактор и корректор *Е.И. Герман*

Подписано в печать 15.12.14. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 12,26. Тираж 100 экз. Заказ № 236/2014.

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.