

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»

Пермский инновационный территориальный кластер
волоконно-оптических технологий «ФОТОНИКА»

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 4, № 1

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2017

УДК 621.383

П75

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: *С.А. Бабин*, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук (Новосибирск, 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)

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

А.А. Аполонский, доктор (Мюнхенский университет Людвига-Максимилиана, Мюнхен, Германия)

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

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

В.П. Драчёв, профессор (Университет Северного Техаса, Дентон, США)

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

И.А. Лобач, канд. физ.-мат. наук (Новосибирск, 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)

К.А. Тарабрин, директор департамента (Минпромторг России, Москва, Россия)

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

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

А.А. Фотиади, доктор (Политехнический университет Монса, Монс, Бельгия)

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 «Прикладная фотоника» (Applied Photonics) зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-59184 от 3 сентября 2014 г.

Периодическое печатное издание (выходит 4 раза в год).

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Адрес учредителя, издателя и редакции: 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, корп. А, к. 319, тел.+7 (342) 2-198-340, e-mail: photonics.appl.jrn@gmail.com.

© ПНИПУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Памяти Андрея Семеновича Куркова.....	5
<i>В.А. Акулов, А.А. Власов</i> Эффективная схема накачки эрбиевого волоконного лазера с распределенной обратной связью для подавления релаксационных колебаний.....	9
<i>И.В. Жлуктова, Н.Ю. Титаренко, А.А. Тавлеев, В.А. Камынин, В.Б. Цветков</i> Оптимизация волоконно-оптического гольмиевого усилителя, работающего на длине волны 2016 нм.....	15
<i>А.В. Достовалов, В.С. Терентьев, В.П. Бессмельцев</i> Изготовление нанотверстий в тонкой алюминиевой пленке методом фемтосекундной лазерной абляции для одномолекулярной спектроскопии.....	22
<i>М.В. Ременникова, В.К. Урядова, М.К. Лушникова, Ю.А. Конин, А.И. Гаранин</i> Изучение влияния излучения волоконного лазера с длиной волны 1,08 мкм на мягкую биоткань	38
<i>Р.В. Дробышев, В.С. Терентьев, Ю.А. Тимиртдинов, И.А. Лобач, С.И. Каблуков</i> Широкополосный иттербиевый волоконный лазер с модуляцией усиления	47
Итоги 12-й Международной специализированной выставки лазерной, оптической и оптоэлектронной техники «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2017»	61
Сведения об авторах	68

CONTENTS

In remembrance of Andrei Semenovich Kurkov	5
<i>V.A. Akulov, A.A. Vlasov</i>	
Efficient pumping scheme of Er-doped DFB fiber laser with suppressed relaxation oscillations	9
<i>I.V. Zhluktova, N.Iu. Titarenko, A.A. Tavleev, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov</i>	
Optimization of a fiber optic Ho-doped amplifier operating at a wave length of 2016 nm	15
<i>A.V. Dostovalov, V.S. Terent'ev, V.P. Bessmel'tsev</i>	
Fabrication of nano-holes in thin aluminum film by femtosecond laser ablation for single-molecular fluorescence spectroscopy	22
<i>M.V. Remennikova, V.K. Uriadova, M.K. Lushnikova, Iu.A. Konin, A.I. Garanin</i>	
A study of the effect of fiber laser at wavelength of 1.08 μm radiation applied to a soft tissue.....	38
<i>R.V. Drobyshev, V.S. Terent'ev, Iu.A. Timirtdinov, I.A. Lobach, S.I. Kablukov</i>	
Gain-switched broadband Yb-doped fiber laser	47
The results of the 12th International Specialized Exhibition for Laser, Optical and Optoelectronic Technologies "Photonics. World of Lasers and Optics – 2017"	61
About the authors.....	68

ПАМЯТИ АНДРЕЯ СЕМЕНОВИЧА КУРКОВА

18 апреля 2017 года Андрею Семеновичу Куркову исполнилось бы 60 лет. В этот день его будут вспоминать коллеги в России и за рубежом как талантливого, состоявшегося ученого и прекрасного человека.

Андрей Семенович родился за полярным кругом, в г. Норильске Красноярского края, где и провел детские и юношеские годы. Его естественно-научный



склад ума проявился еще в школе, что определило его победы на городских и краевых олимпиадах по физике и математике. В 1974 году, после окончания средней школы № 8, он поступил на физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, который успешно окончил в 1980 году. В 1983 году А.С. Курков приступил к научной работе в отделе волоконной оптики Института общей физики АН СССР, возглавляемом академиком Е.М. Диановым. В те годы он занимался исследованиями физических основ технологии одномодовых волоконных световодов в группе А.В. Белова совместно с лабораторией А.Н. Гурьянова Института химии высококичистых веществ АН СССР (г. Нижний Новгород). Андрей Семенович внес значительный вклад в создание этой технологии в СССР. В 1990 году он успешно защитил кандидатскую диссертацию по теме «Оптимизация и прогнозирование волноводных свойств одномодовых волоконных световодов». В дальнейшем А.С. Курков активно занимался проблемами создания лазеров и усилителей на основе волоконных световодов, легированных редкоземельными ионами, и внес значительный вклад в совершенствование отечественных эрбиевых волоконных усилителей и ВКР-лазеров.

По окончании стажировки в Университете г. Лилля (Франция) А.С. Курков активно включился в работу по созданию мощных лазеров на основе световодов с накачкой в оболочку, разрабатываемых в Научном центре волоконной оптики РАН. В дальнейшем Андреем Семено-

вичем были получены новаторские результаты по созданию как непрерывных, так и импульсных волоконных лазеров в новых спектральных диапазонах, предложены оригинальные схемы таких лазеров, методы их накачки и нелинейного преобразования. Итогом данных исследований явилась успешная защита докторской диссертации «Волоконные источники излучения в диапазоне 1–2 мкм» в 2003 году. В 2006 году А.С. Курков первым в России и одним из первых в мире приступил к созданию когерентных источников длинноволнового диапазона – гольмиевых и тулиевых волоконных лазеров.

С 2007 года А.С. Курков работал в отделе лазерных кристаллов Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, продолжая исследования в области волоконных лазеров и их применения для решения различных технологических и медицинских задач. Во многом благодаря кипучей энергии, энтузиазму и творческой инициативе Андрея Семеновича научный коллектив под его руководством проводил успешные исследования в тесном сотрудничестве с коллегами из Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, Ульяновского государственного университета, Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева, институтов Сибирского отделения РАН, Пермской научно-производственной приборостроительной компании и многих других научно-исследовательских институтов и университетов в нашей стране и за рубежом.

Андрей Семенович Курков был постоянным участником и членом организационных комитетов многих важнейших российских и международных конференций по проблемам волоконных лазеров и волоконной оптики, членом редакционных коллегий журналов *Laser Physics Letters*, *Laser Physics*, *LightWave Russian Edition*, «Прикладная фотоника», экспертом многих научных фондов, таких как Российский фонд фундаментальных исследований. Он является основателем Российского семинара по волоконным лазерам, который проводится ежегодно на базе научных центров различных регионов России. Его научные работы широко цитируются. База данных Web of Science содержит 145 работ А.С. Куркова, его индекс Хирша – 26.

На протяжении жизни Андрей Семенович руководил научными коллективами, которые постоянно пополнялись молодыми физиками, аспирантами и студентами. Все сотрудники были очарованы своим ру-

ководителем и как человеком, и как ученым. Он постоянно вдохновлял своих коллег любовью к физике и энтузиазмом при постановке и решении новых научных задач.

Почти вся трудовая деятельность А.С. Куркова прошла в Российской академии наук, где он впитал в себя высокий академический стиль работы и отношения к жизни. Он был прост в общении, никогда не отказывал коллегам в помощи и охотно делился знаниями, идеями и опытом.

Андрей Семенович интересовался не только наукой. Во время учебы в МГУ он участвовал в реставрации Соловецкого монастыря в составе студенческого строительного отряда. Он был мастером плотницкой и столярной работы, а еще добродушным и хлебосольным хозяином на своей любимой даче. В свободное время А.С. Курков изучал российскую историю, в частности историю освоения Севера. Он любил мемуары первопроходцев и воспоминания участников Второй мировой войны.





Мы запомним Андрея Семеновича как энергичного, веселого человека, генератора научных идей, талантливого, амбициозного и исключительно плодотворного ученого. Память о нем жива в его книгах, статьях, учениках и всех, кому посчастливилось работать с ним вместе.

Друзья и коллеги

УДК 681.7.068/.069

В.А. Акулов^{1,2}, А.А. Власов²¹ ООО «Инверсия – Файбер», Новосибирск, Россия² Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

ЭФФЕКТИВНАЯ СХЕМА НАКАЧКИ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Разработана конфигурация задающего эрбиевого лазера с распределенной обратной связью, объединенного со схемой усилителя оптического сигнала, обеспечивающего максимальный КПД использования накачки при минимизации влияния релаксационных колебаний на выходные параметры излучения. В данной схеме получено одночастотное излучение волоконного лазера мощностью до 30 мВт при уровне накачки 600 мВт. Усиленное спонтанное излучение находится на уровне 0,08 %. Величина относительного шума интенсивности – на уровне –140 дБ/Гц на частотах более 10 МГц и –100 дБ/Гц на пике релаксационных колебаний. Ширина спектра генерации – менее 1 кГц.

Ключевые слова: волоконный лазер с распределенной обратной связью, эрбиевый лазер, схема лазера, релаксационные колебания, шум, ширина спектра.

V.A. Akulov^{1,2}, A.A. Vlasov²¹ Inversion Fiber Co. Ltd., Novosibirsk, Russian Federation² Institute of Automation and Electrometry, Novosibirsk, Russian Federation

EFFICIENT PUMPING SCHEME OF ER-DOPED DFB FIBER LASER WITH SUPPRESSED RELAXATION OSCILLATIONS

The scheme of erbium-doped distributed feedback fiber laser is proposed. The scheme combines the pumping schemes of the single frequency oscillator and optical signal amplifier. The scheme provides maximum efficiency of pump to signal conversion while minimizing the effect of relaxation oscillations on the output radiation parameters. In this scheme single-frequency fiber laser radiation power up to 30 mW achieved at the pump power of 600 mW at 980 nm. Amplified spontaneous emission was at the level of 0.08 %. The magnitude of the relative intensity noise is –140 dB/Hz at frequencies more than 10 MHz and –100 dB/Hz at the peak of relaxation oscillations. The linewidth of the laser radiation is less than 1 kHz.

Keywords: distributed feedback fiber laser, Er-doped, scheme of laser, relaxation oscillations, RIN, spectral width.

Волоконный лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер) представляет собой отрезок активного волокна длиной несколько сантиметров с записанной специальной структурой показателя преломления – волоконной брэгговской решеткой со сдвигом фазы на полпериода, что позволяет генерировать одну продольную моду [1]. В настоящей работе исследуются волоконные РОС-лазеры, записанные в волокне с сохранением поляризации [2], генерирующие линейно-поляризованное излучение. К основным характеристикам лазерного излучения, помимо прочих, относятся ширина линии генерации и стабильность выходной мощности (относительный шум интенсивности). Одним из физических механизмов, влияющих на стабильность мощности волоконных лазеров, является развитие релаксационных колебаний в активном волокне, приводящих к появлению в спектре шума интенсивности ярко выраженных пиков в килогерцовом диапазоне. Выявлено, что наиболее важным фактором, влияющим на величину релаксационных колебаний, является величина мощности накачки РОС-лазера [3, 4]. Типичная выходная мощность собственно РОС-лазера составляет порядка милливатта. Предусилитель позволяет усилить слабый сигнал задающего лазера до уровня нескольких десятков милливатт.

В данной работе предложена и реализована конфигурация задающего РОС-лазера, объединенного со схемой усилителя оптического сигнала, обеспечивающего максимальный КПД использования накачки при минимизации влияния релаксационных колебаний на выходные параметры излучения.

В эксперименте для определения шумовых характеристик РОС-лазера его излучение направлялось на фотодиод с полосой пропускания до 1 ГГц. Сигнал данного фотодиода подавался на радиочастотный анализатор спектра AGILENT EXA N9010A, измеряющий спектральный состав сигнала. Результат измерения радиочастотного спектра представлен на рис. 1.

Как видно на графике (см. рис. 1, *a*), в спектре шума присутствуют ярко выраженный пик на частоте порядка 300 кГц и его высшие гармоники, связанный с развитием релаксационных колебаний в активном волокне лазера из-за внешних воздействий. Наиболее важным из них является уровень накачки РОС-лазера. При низких уровнях накачки лазер работает нестабильно, вплоть до кратковременного срыва непрерывной генерации, фактически в импульсно-периодическом ре-

жиге. При увеличении уровня накачки интенсивность наблюдаемых колебаний минимизируется (см. рис. 1, б). На основе полученного результата авторами была предложена и реализована схема накачки РОС-лазера и предусилителя (рис. 2).

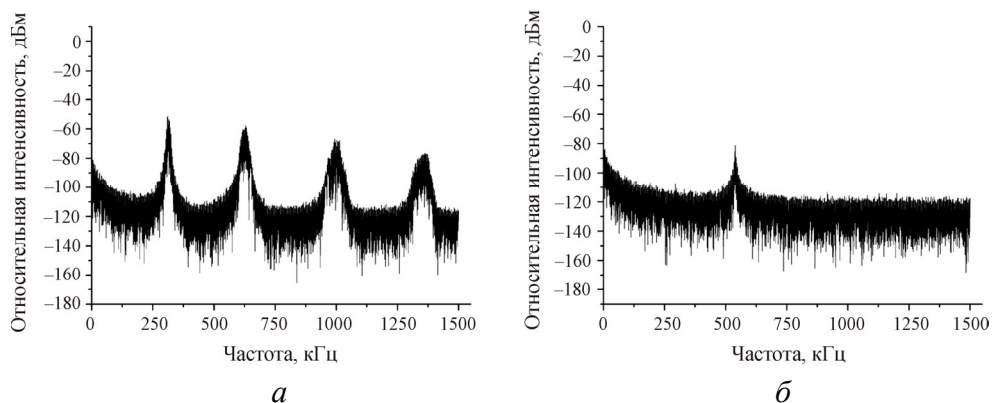


Рис. 1. Спектральный состав шума излучения эрбиевого РОС-лазера, длина волны генерации – 1550 нм: а – при токе накачки 0,5 А (мощность накачки 300 мВт); б – при токе накачки 1 А (мощность накачки 600 мВт)

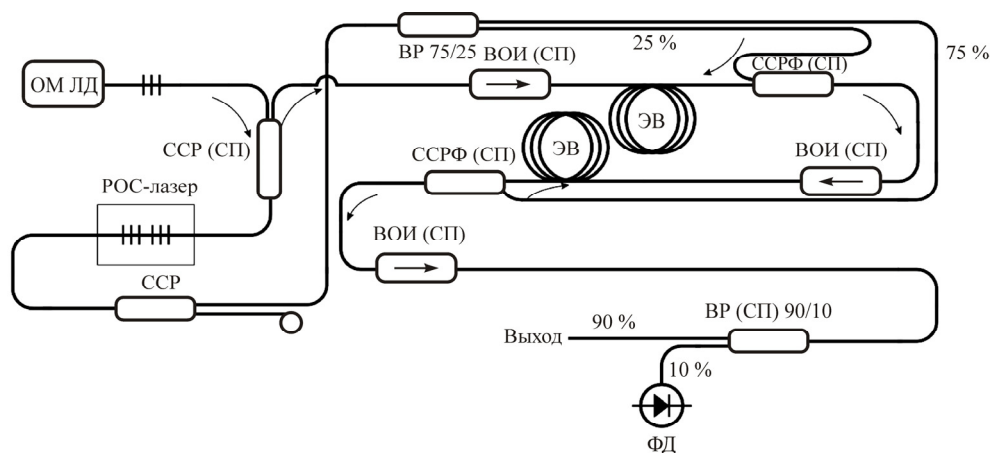


Рис. 2. Схема одночастотного волоконного лазера: ВОИ – волоконно-оптический изолятор (СП – с сохранением поляризации); ВР – волоконный разветвитель; ОМ ЛД – одномодовый лазерный диод; РОС-лазер – лазер с распределенной обратной связью; ССР – спектрально-селективный разветвитель; ССРФ – фильтрующий спектрально-селективный разветвитель; ЭВ – эрбиевое волокно; ФД – фотодиод

Построение данной схемы подразумевает подачу максимального уровня накачки на РОС-лазер, что приводит к его стабильной работе за счет минимизации релаксационных колебаний, а также дальнейшее использование непоглощенного излучения накачки для обеспечения работы предусилителя. Данная конфигурация обеспечила максимальный КПД использования накачки при минимизации влияния релаксационных колебаний на выходные параметры излучения. Получено одностороннее излучение волоконного эрбиевого лазера (длина волны генерации – 1550 нм) мощностью до 30 мВт при уровне накачки 600 мВт. Величина относительного шума интенсивности находится на уровне –140 дБ/Гц на частотах более 10 МГц и –100 дБ/Гц на пике релаксационных колебаний. Относительная величина усиленного спонтанного излучения – 0,08 %.

Одной из важных характеристик разрабатываемого лазера является узкая ширина линии генерации. Ожидаемые ширины линий генерации составляют малую величину, вплоть до нескольких герц, для эрбиевых лазеров [5]. Для измерения ширины спектра генерации в настоящей работе используется гетеродинная схема измерений. В данном методе используются два практически идентичных РОС-лазера, отстройка частот генерации которых не превышает нескольких сотен мегагерц. Излучение данных лазеров совмещается с помощью волоконного объединителя и направляется на фотодиод с шириной полосы пропускания до гигагерца. Сигнал данного фотодиода подается на радиочастотный анализатор спектра AGILENT EXA N9010A. В радиочастотном спектре присутствует пик, возникающий за счет биений частот двух лазеров. Ширина данного пика характеризует измеряемую ширину линии генерации лазера. Стоит отметить, что за счет внешних воздействий отстройка частот лазеров может меняться, соответственно этому меняется и положение пика биений, что затрудняет выполнение измерений с максимально возможной разрешающей способностью. На рис. 3 представлен измеренный спектр биений двух эрбиевых РОС-лазеров.

Как видно на рис. 3, зарегистрированная ширина пика биений составляет порядка одного килогерца, что соответствует установленному разрешению регистрирующего прибора. Соответственно, измеряемая ширина линии генерации меньше данного значения.

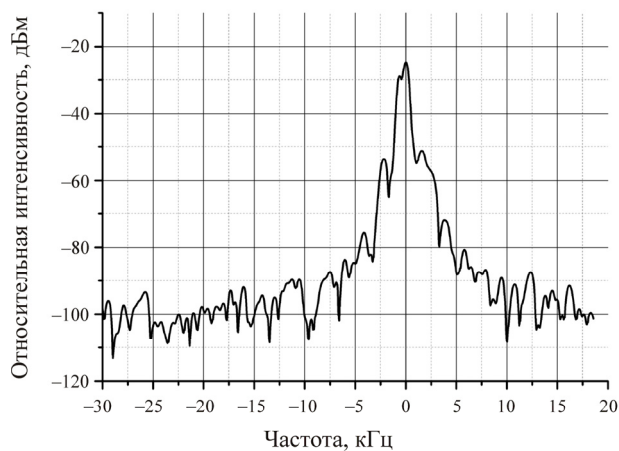


Рис. 3. Спектр биений двух эрбиевых РОС-лазеров (длина волны генерации – 1550 нм)

Таким образом, разработана схема накачки задающего РОС-лазера и усилителя оптического сигнала, обеспечивающая эффективное подавление уровня релаксационных колебаний и обеспечивающая максимальный КПД использования накачки. Экспериментальные исследования выходных параметров одночастотного волоконного эрбиевого лазера показали, что в предложенной схеме обеспечивается стабильная генерация узкополосного излучения (<1 кГц).

На основе полученных результатов был создан прототип модуля одночастотного лазера мощностью 30 мВт. Габариты модуля составляют $222 \times 119 \times 24$ мм³, а выходные характеристики не уступают зарубежным аналогам (NKT Photonics, NP Photonics).

Список литературы

1. Er³⁺:Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser / J.T. Kringlebotn, J.L. Archambault, L. Reekie, D.N. Payne // Opt. Lett. – 1994. – Vol. 19, № 24. – P. 2101–2103.
2. Vlasov A.A., Churin D.E., Babin S.A. The features of characterization of the fiber Bragg gratings with phase shift for the distributed-feedback lasers written in the polarization-maintaining Ytterbium-doped fiber // Laser Physics. – 2010. – Vol. 20, № 12. – P. 2045–2049.
3. Foster S. Dynamical noise in single-mode distributed feedback fiber lasers // IEEE J. Quantum Electron. – 2004. – Vol. 40, № 9. – P. 1283–1293.

4. The relative intensity noise and relaxation oscillation characteristics of a distributed-feedback fiber laser / P.P. Wang, J. Chang [et al.] // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23, № 9. – P. 1–5.

5. Cliché J.-F., Allard M., Tetu M. Ultra-narrow linewidth and high frequency stability laser sources // *Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications (OAA/COTA 2006)*, Whistler, Canada, 25–30 June, 2006. – Optical Society of America, 2006. – Paper CFC5.

References

1. Er³⁺:Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser / J.T. Kringlebotn, J.L. Archambault, L. Reekie, D. N. Payne // *Opt. Lett.* 1994. Vol. 19. No. 24. P. 2101-2103.

2. The features of characterization of the fiber Bragg gratings with phase shift for the distributed-feedback lasers written in the polarization-maintaining Ytterbium-doped fiber / A.A. Vlasov, D.E. Churin, S.A. Babin // *Laser Physics*. 2010. Vol. 20, No. 12. P. 2045-2049.

3. Dynamical noise in single-mode distributed feedback fiber lasers / S. Foster // *IEEE J. Quantum Electron.* 2004. Vol. 40, No. 9. P. 1283-1293.

4. The relative intensity noise and relaxation oscillation characteristics of a distributed-feedback fiber laser / P.P. Wang, J. Chang et al. // *Laser Physics* – 2013. Vol. 23, No. 9. P. 1-5.

5. Ultra-narrow linewidth and high frequency stability laser sources / J.-F. Cliche, M. Allard, M. Tetu // *Optical Amplifiers and Their Applications / Coherent Optical Technologies and Applications (OAA/COTA 2006)*, 25–30 Jun., 2006, Whistler, Canada. Technical Digest (CD). Optical Society of America, 2006. Paper CFC5.

Получено 20.03.2017

УДК 621.373.8, 621.375

**И.В. Жлуктова^{1, 2}, Н.Ю. Титаренко³, А.А. Тавлеев³,
В.А. Камынин², В.Б. Цветков²**

¹ Московский технологический университет (МГУПИ), Москва, Россия

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

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГОЛЬМИЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2016 НМ

Рассмотрена сфера применения двухмикронного волоконного усилителя. Изложен обзор тематических статей исследований предыдущих научных групп. Представлены результаты работы волоконно-оптического усилителя, легированного ионами гольмия. Для изучения характеристик гольмиевого усилителя была собрана экспериментальная установка. В качестве накачки активной среды усилителя использовался иттербиевый лазер. Приведены спектры излучения, вычислены максимальные коэффициенты усиления. По результатам деятельности научной лаборатории по данной теме была построена оптимизационная кривая для разных длин активного волокна, была установлена зависимость выходной мощности от мощности накачки. В ходе исследования использовались разные уровни задающего сигнала. В итоге была подобрана длина активного волокна усилителя, позволяющая получить максимальную выходную мощность. Таким образом, по сравнению с предыдущими результатами и другими публикациями в данной области было получено усиление слабого непрерывного сигнала в области спектра до 2020 нм.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный усилитель, активное волокно, усиление слабого сигнала, иттербиевая накачка, гольмий, иттербий, волоконные лазеры, волокна, легированные редкоземельными элементами.

**I.V. Zhluktova^{1, 2}, N.Iu. Titarenko³, A.A. Tavleev³,
V.A. Kamynin², V.B. Tsvetkov²**

¹ Moscow Technological University, Moscow, Russian Federation

² Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

³ National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russian Federation

OPTIMIZATION OF A FIBER OPTIC HO-DOPED AMPLIFIER OPERATING AT A WAVE LENGTH OF 2016 NM

In this paper, the scope of application of a two-micron fiber amplifier is examined. The review of thematic research articles of previous scientific groups is presented. The results of the work of a fiber-optic amplifier doped with holmium ions are presented. To study the characteristics of the holmium amplifier, an experimental setup was assembled. As the pumping of the active medium of the amplifier,

an ytterbium laser was used. Radiation spectra are given, the maximum amplification factors are calculated. Based on the results of the scientific laboratory on this topic, an optimization curve was constructed for different lengths of the active fiber. The dependence of the output power on the pump power was established. During the study, different levels of the reference signal were used. At the end, the length of the active fiber of the amplifier was chosen, which allows obtaining the maximum output power. Thus, in comparison with the previous results and other publications in the field, an amplification of a weak continuous signal in the spectral region of 2020 nm was obtained.

Keywords: holmium fiber amplifier, active fiber, amplification of the small signal, ytterbium pumping, holmium, ytterbium, fiber lasers, fibers doped with rare earth elements.

В последние годы большое внимание уделяется волоконным усилителям диапазона 2 мкм. Этот интерес вызван их потенциальным применением в таких областях, как медицина, спектроскопия и перспективные телекоммуникационные разработки. Для реализации оптических схем, работающих в этом диапазоне, необходимы усилители, основанные на таких редкоземельных элементах, как тулий или гольмий. Тулиевые волоконные усилители продемонстрировали высокий коэффициент усиления и низкий уровень шум-фактора при работе в спектральном диапазоне от 1720 до 2050 нм [1]. Однако для расширения диапазона 2 мкм, а именно для получения генерации на длинах волн больше 2100 нм, интерес представляют волокна, легированные ионами гольмия. Область люминесценции ионов гольмия лежит в диапазоне 1900–2200 нм, поэтому использование гольмиевых волокон в оптических схемах усилителей и исследование их характеристик являются актуальными задачами [2–4]. Первый гольмиевый волоконный усилитель на длине волны 2100 нм был представлен в работе [5]. Усилитель накачивался от иттербиевого волоконного лазера, была достигнута выходная мощность 1,65 Вт при входной мощности, равной 35 мВт. Ранее в статье [6] было представлено эффективное усиление модулированного слабого сигнала для диапазона длин волн 2020–2120 нм. В данной статье представлены результаты работы волоконно-оптического усилителя, легированного ионами гольмия, работающего на длине волны 2016 нм. Приведены спектры излучения, рассчитаны максимальные коэффициенты усиления, и построена оптимизационная кривая для разных длин активного волокна.

Для исследования характеристик гольмиевого усилителя была собрана экспериментальная установка (рис. 1). В качестве задающего источника был использован непрерывный гольмиевый лазер, излучающий на длине волны 2016 нм. Накачка задающего источника осуществлялась иттербиевым волоконным лазером на длине волны

1125 нм. Сам иттербиевый лазер состоял из двух диодов накачки с длиной волны 975 нм, иттербиевого волокна длиной 30 м и двух решеток Брэгга (1125 нм). Решетки использовались как зеркала, поэтому одна из них имела высокий коэффициент отражения, а другая – равный 30 %. Для накачки усилителя использовался второй идентичный иттербиевый лазер с максимальной выходной мощностью 7,32 Вт.

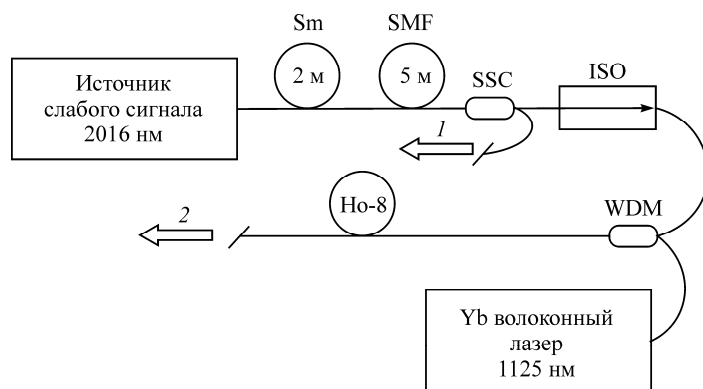


Рис. 1. Оптическая схема гольмиевого усилителя

В данном исследовании для ослабления задающего сигнала было использовано SMF-волокно длиной 5 м, скрученное в кольца диаметром 5 см. В схему также был добавлен разветвитель (SSC), с одного из выходов *1* которого производился постоянный контроль мощности и выходного спектра. Для предотвращения распространения обратного сигнала был использован изолятор (ISO) с потерями в пределах 0,6 дБ, помещенный перед мультиплексором (WDM) 1125/2100 нм, который объединял непрерывный сигнал от задающего лазера и излучение иттербиевого лазера накачки, работающего на длине волны 1125 нм. Для отсечения остаточного излучения накачки источника слабого сигнала использовалось Sm^{3+} -волокно длиной 2 м.

В качестве активной среды усилителя в работе применялось гольмиевое волокно, разработанное в Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПНППК). Диаметр сердцевины активного волокна составлял 10 мкм с концентрацией активной примеси $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Для получения значения коэффициента усиления была измерена выходная мощность в зависимости от мощности лазера накачки для

различных длин активных волокон. Это позволило нам для каждой мощности задающего сигнала выбрать оптимальную длину волокна. На рис. 2 представлен график зависимости максимальных коэффициентов усиления при заданном уровне сигнала от длины активного волокна усилителя. Для подавления непоглощенной накачки от иттербиевого волоконного лазера использовался оптический фильтр с пропусканием 1,5–2,5 мкм.

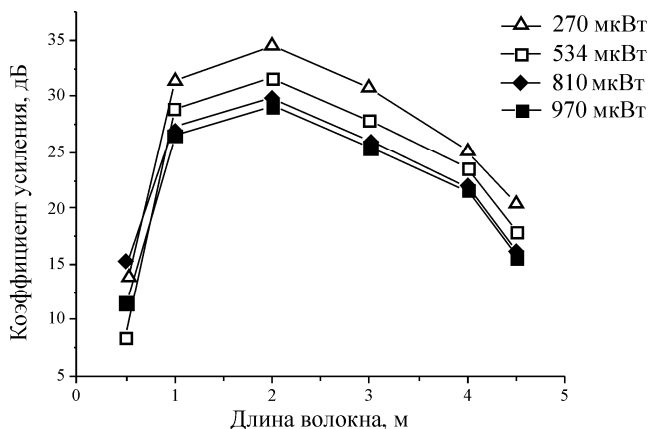


Рис. 2. График зависимости коэффициента усиления от длины активного волокна для длины волны 2016 нм

Как видно на рис. 2, максимальный коэффициент усиления составил 34,5 дБ при максимальной усиленной выходной мощности 766 мВт для длины активного волокна 2 м с задающим слабым сигналом 270 мкВт (график зависимости представлен на рис. 3). Минимальный коэффициент усиления составил 11 дБ при выходной мощности 36 мВт. Пороговое значение накачки составляет 100 мВт. По графику зависимости выходной мощности от мощности накачки видно, что усилитель работает в линейном режиме.

Спектр на выходе из усилителя для длины волокна 2 м представлен на рис. 4, а. На рис. 4, б изображен спектр усиленного сигнала при длине активного волокна, равного 6 м. На рис. 4 видно, что усиленное спонтанное излучение (УСИ) присутствует на обоих спектрах усиленного сигнала, с подавлением более 20 дБ в случае длины активного волокна 2 м. При увеличении длины активного волокна усилителя УСИ начинает преобладать над сигналом. Причиной этого является перепо-

глошение ионами гольмия коротковолновой части спектра. Таким образом, по сравнению с предыдущими результатами группы [6, 7] и другими публикациями в данной области [8, 9] было получено усиление слабого непрерывного сигнала в области спектра до 2020 нм.

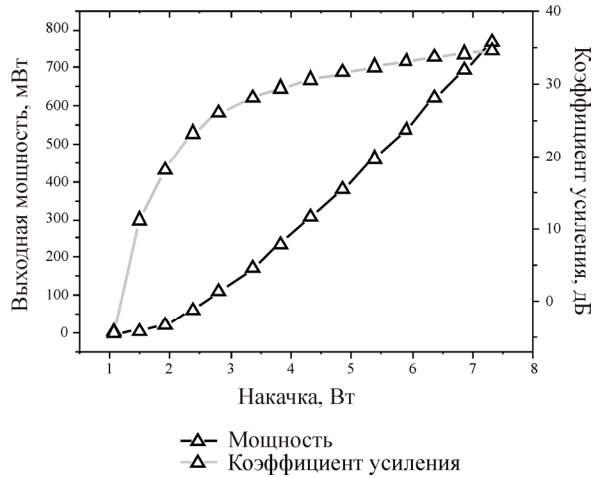


Рис. 3. График зависимости выходной мощности от мощности накачки и коэффициент усиления от накачки для длины активного волокна 2 м

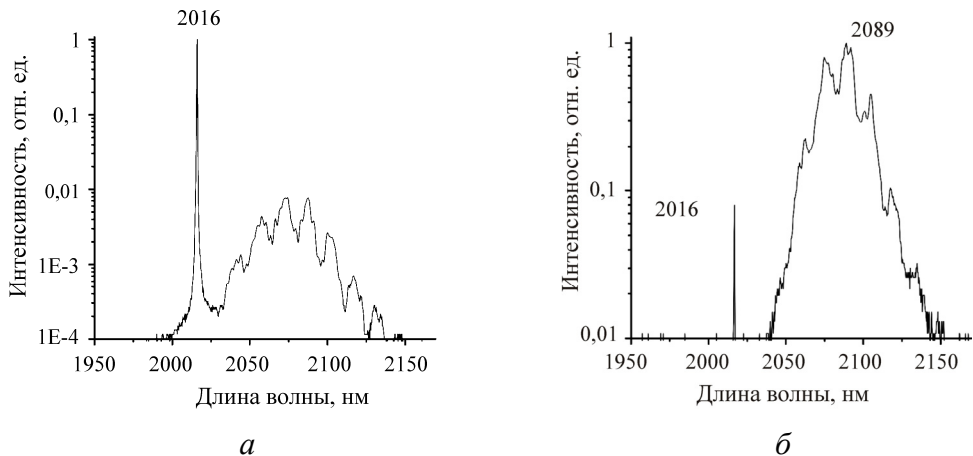


Рис. 4. Спектры усиления: а – при длине активного волокна 2 м; б – при длине активного волокна 6 м

Таким образом, в данной работе продемонстрировано усиление слабого сигнала для длины волны 2016 нм в гольмиевом волоконном усилителе с накачкой от иттербиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 1125 нм. Длина активного волокна усилителя была оптимизирована для нескольких уровней задающего сигнала в диапазоне от 270 до 970 мкВт. Максимальное значение коэффициента усиления получено при длине активного волокна 2 м и составляет 34,5 дБ. Выходная мощность равна 766 мВт при уровне задающего сигнала 270 мкВт.

Список литературы

1. High power diode-seeded fiber amplifiers at 2 μm – from architectures to applications / A.M. Heidt [et al.] // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2014. – № 20. – P. 3100612.
2. Jackson S.D. Midinfrared holmium fiber lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2006. – № 42. – P. 187–191.
3. Ho-doped silica fiber laser in-band pumped by a Tm-doped fiber laser / J. Kim [et al.] // *CLEO/Europe and EQEC 2009.* – URL: <http://2009.cleoeurope.org> (дата обращения: 20.01.2017).
4. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ / A.S. Kurkov [et al.] // *Opt. Lett.* – 2010. – № 35. – P. 490–492.
5. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm // *Laser Physics Letters.* – 2013. – № 10. – P. 125106.
6. Gain spectrum of the Ho-doped fiber amplifier / S.A. Filatova, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov, O.I. Medvedkov, A.S. Kurkov // *Laser Physics Letters.* – 2015. – № 12 (9). – P. 095105.
7. Усиление пикосекундных импульсов двухмикронного диапазона / С.А. Филатова, В.А. Камынин, И.В. Жлуктова, В.Б. Цветков // *Прикладная фотоника.* – 2016. – № 3. – С. 301–308.
8. High gain holmium-doped fibre amplifiers / N. Simakov, Zh. Li, Y. Jung, J.M.O. Daniel, Pr. Barua, P.C. Shardlow, S. Liang, J.K. Sahu, A. Hemming, W.A. Clarkson, Sh. Alam, D.J. Richardson / *Optical Society of America.* – 2016.
9. Holmium doped fiber amplifier for optical communications at 2.05–2.13 μm / N. Simakov, Z. Li, S.U. Alam, P.C. Shardlow, J.M.O. Daniel, D. Jain, J.K. Sahu, A. Hemming, A. Clarksonand, D.J. Richardson // *Optical Fiber Communication Conference / Optical Society of America.* – Los Angeles, California, 2015. – P. Tu2C.6.

References

1. A.M. Heidt et al. "High power diode-seeded fiber amplifiers at 2 μm – from architecture to applications," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 3100612 (2014).
2. S.D. Jackson, "Midinfrared holmium fiber lasers," IEEE J. Quantum Electron., 42, 187-191 (2006)
3. J. Kim et al. "Ho-doped silica fiber laser in-band pumped by a Tm-doped fiber laser," in CLEO/Europe and EQEC (2009), available at: <http://2009.cleoeurope.org> (accessed 20 January 2017).
4. A.S. Kurkov et al. "All-fiber 10 W holmium lasers pumped at $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$," Opt. Lett., 35, 490- 492 (2010).
5. S.O. Antipov, A.S. Kurkov. "A holmium-doped fiber amplifier at 2.1 μm ," Laser Physics Letters 10 125106 (2013).
6. S.A. Filatova, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov, O.I. Medvedkov, A.S. Kurkov "Gain spectrum of the Ho-doped fiber amplifier" Article in Laser Physics Letters 12(9):095105 · September 2015.
7. Filatova S.A., Kamynin V.A., Zhluktova I.V., Cvetkov V.B. "Usilenie pikosekundnyh impul'sov dvuhmikronnogo diapazona". Prikladnaja fotonika, 2016, № 3, s. 301-308.
8. Nikita Simakov, Zhihong Li, Yongmin Jung, J.M.O. Daniel, Pranabesh Barua, Peter C. Shardlow, Sijing Liang, Jayanta K. Sahu, Alexander Hemming, W. Andrew Clarkson, Shaif-UlAlam, and David J. Richardson., "High gain holmium-doped fibre amplifiers", 2016 Optical Society of America.
9. N. Simakov, Z. Li, S.U. Alam, P.C. Shardlow, J.M.O. Daniel, D. Jain, J. K. Sahu, A. Hemming, A. Clarksonand, D.J. Richardson, "Holmium Doped Fiber Amplifier for Optical Communications at 2.05-2.13 μm ," in Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, Los Angeles, California, 2015), p.Tu2C.6.

Получено 22.03.2017

УДК 57.621.383

А.В. Достовалов, В.С. Терентьев, В.П. Бессмельцев

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ НАНООТВЕРСТИЙ
В ТОНКОЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПЛЕНКЕ
МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ
ДЛЯ ОДНОМОЛЕКУЛЯРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Представлены экспериментальные результаты по созданию нанодоверстий методом фемтосекундной (270 фс) ультрафиолетовой лазерной абляции в пленке алюминия толщиной 100 нм, осажденной на стеклянную поверхность методом вакуумного магнетронного напыления. Исследованы зависимости диаметра нанодоверстий от энергии импульсов в диапазоне от 10 до 25 нДж и от числа фемтосекундных лазерных импульсов в диапазоне от 5 до 50 импульсов. Показано, что минимальный диаметр нанодоверстий достигается при энергии импульсов 10 нДж и количестве импульсов 50. Промонстрированы нанодоверстия диаметром <150 нм, которые представляют собой волноводы нулевой моды. Экспериментальная проверка работоспособности нанодоверстий производилась в белом свете сразу после их изготовления, а также непосредственно в схеме многоканального ДНК-секвенатора типа Pacific Biosciences при регистрации испущенного из них флуоресцентного сигнала малой интенсивности ($\approx 10^3$ фотонов/с⁻¹). Результаты работы подтверждают потенциальную применимость изготовленных нанодоверстий в одномолекулярной флуоресцентной спектроскопии.

Ключевые слова: фемтосекундная лазерная абляция, тонкие металлические пленки, ДНК-секвенатор, волновод нулевой моды, одномолекулярная спектроскопия, изготовление нанодоверстий.

A.V. Dostovalov, V.S. Terent'ev, V.P. Bessmel'tsev

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

**FABRICATION OF NANO-HOLES IN THIN ALUMINUM FILM
BY FEMTOSECOND LASER ABLATION
FOR SINGLE-MOLECULAR FLUORESCENCE SPECTROSCOPY**

Experimental results of nano-holes fabrication by femtosecond (270 fs) UV laser ablation in an aluminum film with thickness of 100 nm deposited on a glass surface by method of vacuum magnetron sputtering are presented. The dependences of the nano-hole diameter on the pulse energy in the range from 10 to 25 nJ and on the number of femtosecond laser pulses in the range from 5 to 50 pulses are investigated. It was shown that the minimum diameter of nano-holes is achieved at a pulse energy of 10 nJ and a pulse number of 50. Nano-holes with a diameter of <150 nm, which are zero-mode

waveguides, are demonstrated. An experimental test of the performance of nano-holes was carried out in white light immediately after their fabrication, as well as directly in the scheme of a multichannel DNA sequencer of Pacific Biosciences type, when a low-intensity fluorescent signal emitted from them was detected (≈ 103 photons/s⁻¹). The results of the work confirm the potential applicability of the fabricated nano-holes for the purpose of single-molecular fluorescence spectroscopy.

Keywords: femtosecond laser ablation, thin metal films, DNA sequencer, zero-mode waveguide.

Введение

Методы одномолекулярной спектроскопии [1] и секвенирования ДНК [2, 3] основаны на использовании волноводов нулевой моды (ВНМ, zero-mode waveguide), представляющих собой отверстия в слое диаметром порядка нанометров (наноотверстия). Основным принцип данных методов состоит в выборе из всего объема биологического раствора очень маленького объема (порядка зептолитра, или 10^{-21} л) для того, чтобы регистрировать флуоресцентный сигнал от малого числа или даже от одной молекулы, которые принимают участие в биореакции в этом объеме. В структуре ВНМ амплитуда светового поля быстро уменьшается (так называемое эванесцентное затухание) по мере распространения по наноотверстию. При этом в небольшой области у входа наноотверстия остается слой глубиной около 20 нм, где интенсивность поля значительна. Это дает возможность даже при высоких концентрациях флуоресцентных источников в растворе увеличивать соотношение полезного флуоресцентного сигнала от молекулярной реакции, которая происходит внутри ВНМ, к фоновому шуму, возникающему вне ВНМ. Таким образом, роль ВНМ-структуры – отсеять шумовой сигнал из внешней области, соответственно, пленка должна быть непрозрачной. В то же время она должна быть физически тонкой (100–200 нм), чтобы минимизировать число молекул в ВНМ-объеме. Кроме этого, структура должна обладать химической пассивностью. Для этих целей подходят металлические пленки (алюминиевые или золотые), осажденные на стеклянную подложку [4, 5]. Эти металлы обладают сравнительно низким поглощением и высоким отражением света. Поглощение света в пленке является негативным эффектом, который может привести при высоких уровнях световой мощности к сильному разогреву металла и тем самым повлиять на биореакцию. Это особенно важно при сверхмалых уровнях сигнала (в несколько фотонов), требующих высокой интенсивности возбуждающего света.

Для примера на рис. 1 схематично показано, как нанодоверстие диаметром (d) 100 нм в металлическом слое толщиной (h) 100 нм формирует эванесцентное световое поле с характерной глубиной затухания (h_e) 20 нм и позволяет регистрировать единичное событие биореакции в процессе репликации молекулы ДНК [3]. Флуоресцентные метки нуклеотидов поглощают возбуждающий свет и излучают флуоресцентный сигнал только в том случае, когда они находятся на дне нанодоверстия (на стеклянной подложке). Единичный акт излучения длится порядка 10^{-2} с, после чего нуклеотид выходит из данной области, а на его место приходит новый и вступает в реакцию. Таким образом, в течение некоторого времени вся последовательность нуклеотидов молекулы ДНК может быть считана. При параллельном считывании из массива таких нанодоверстий можно кратно уменьшить полное время секвенирования до нескольких часов, даже если ДНК состоит из миллиардов оснований.

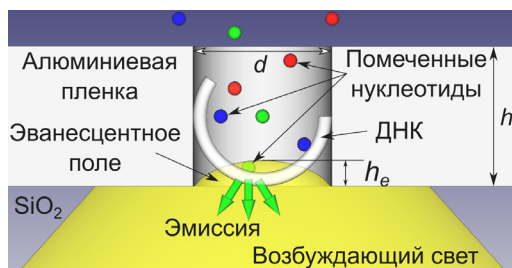


Рис. 1. Схема метода волновода нулевой моды для регистрации одномолекулярных событий

Обычные методы изготовления ВНМ используют электронно- или ионно-лучевую литографию [6]. При этом минимальный диаметр отверстия определяется диаметром электронного пучка, т.е. несколькими нанометрами. Влияние формы нанодоверстия на флуоресцентный отклик исследовано в работах [7, 8], что дает больше возможностей для мониторинга молекулы в ВНМ. Однако один из недостатков литографии состоит в высокой стоимости формируемых ВНМ-структур.

В данной статье исследуется возможность изготовления ВНМ более дешевым и быстрым методом, основанным на фемтосекундной лазерной абляции. Структуры ВНМ формируются в алюминиевой пленке толщиной 100 нм с целью изготовления отверстий диаметром менее 200 нм. При этом относительно быстрый процесс изготовления

($\approx 10^2 \text{ с}^{-1}$) одного наноотверстия может быть ускорен (до $\approx 10^4 \text{ с}^{-1}$) при использовании методов мультиплексирования «пишущего» луча с помощью оптического дифракционного элемента [9].

1. Метод фемтосекундной лазерной абляции

Микрообработка материалов импульсным лазерным излучением (в частности, лазерная абляция) нашла широкое применение во многих областях благодаря своим ключевым преимуществам: бесконтактному типу воздействия, высокой скорости микрообработки, широкому выбору обрабатываемых материалов. Однако задача создания субмикронных модификаций методом лазерной абляции по сей день является актуальной. Особенно это важно для материалов с высоким коэффициентом температуропроводности, в частности металлов, поскольку зона теплового воздействия $l = \sqrt{\tau k}$ определяется длительностью импульса τ и коэффициентом температуропроводности k . Для достижения минимальной зоны теплового воздействия и, следовательно, минимального размера области модификации необходимо использовать импульсы сверхкороткой длительности, а именно фемтосекундного диапазона ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). С другой стороны, размер области модификации напрямую зависит от фокусного расстояния линзы f и длины волны излучения лазера λ : $2w_0 = 4\lambda f / \pi D$, где w_0 – радиус гауссова пучка (по уровню e^{-2}), D – диаметр гауссова пучка на входе линзы. По указанным выше причинам использование ультрафиолетового лазерного излучения с фемтосекундной длительностью импульсов и короткофокусного объектива является наиболее перспективным способом создания субмикронных модификаций методом лазерной абляции. Кроме того, как было показано в работе [10], поскольку процесс модификации имеет пороговый характер, возможно создание модификаций с размерами меньше дифракционного предела. Это непосредственно следует из формулы зависимости диаметра модификации d от значения пикового флюенса гауссова пучка F_0 по отношению к пороговому значению F_{th} :

$$d^2 = 2w_0^2 \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} \right),$$

$$F_0 = \frac{2E_p}{\pi w_0^2},$$

где E_p – энергия импульса.

Из вышеуказанных формул следует, что с помощью УФ-излучения возможно создание модификаций размером <150 нм. Из литературы известны попытки создания наномодификаций на поверхности металлов, но в основном они выполнялись на основной (≈ 800 нм) и второй (≈ 400 нм) гармониках излучения титан-сапфирового лазера [11], поэтому характерные размеры модификаций были существенно выше 150 нм. В работе [12] использовалось УФ-излучение, но для модификации пленок с гораздо меньшей толщиной (20 нм), когда поглощение и пропускание пленки становятся существенными, поэтому такая структура не может применяться в одномолекулярной спектроскопии. Исследовалось также воздействие УФ-излучения короткой длительности импульса на поверхность металлических образцов [13], где было показано двухкратное повышение производительности в случае УФ-излучения по сравнению с ИК-излучением, однако в данном случае эксперименты проводились при слабой фокусировке с $f = 50$ мм, поэтому создание модификаций с малыми размерами не было продемонстрировано.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для формирования отверстий (кратеров) в металлических пленках представлена на рис. 2. Она является модификацией экспериментальной установки по фемтосекундной лазерной модификации и наноструктурированию, представленной в работе [14]. Излучение лазера Pharos-6W с длиной волны 1026 нм после блока учетверения частоты, состоящего из нелинейных кристаллов, было преобразовано в излучение с длиной волны 256 нм. Длительность импульсов составляла 270 фс, частота следования импульсов – 1 кГц, диаметр пучка до входа в фокусирующий объектив – 2,2 мм. С помощью поворотных зеркал излучение заводилось в зеркальный объектив Edmund с числовой апертурой 0.65, который фокусирует излучение на пленку алюминия, расположенную на 3D-позиционере ABL1000 (Aerotech). Настройка положения фокусировки осуществлялась с помощью системы визуализации, состоящей из подсветки и камеры.

Энергия импульсов изменялась от 10 до 25 нДж, количество импульсов, приходящихся на один кратер, варьировалось от 5 до 50.

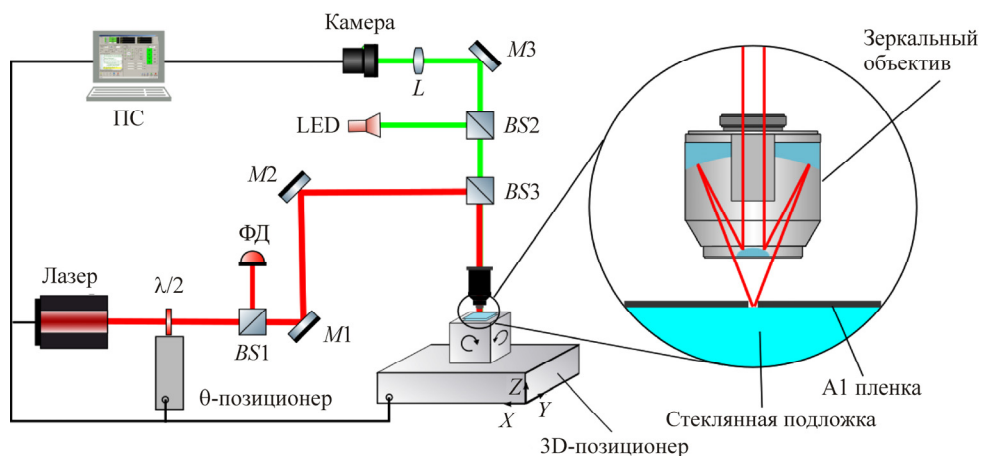


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: BS1, 2, 3 – делители пучка; L – объективная линза; M1, 2, 3 – диэлектрические зеркала; LED – светодиод; PC – персональный компьютер; ФД – фотодетектор

Для изготовления образца на кварцевую подложку наносилась пленка алюминия методом вакуумного магнетронного напыления. Перед напылением подложка была нагрета до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение одного часа. В процессе напыления температура подложки могла подниматься до $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление буферного газа (аргона) в вакуумной камере составляло $2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Источник питания магнетронов был стабилизирован по мощности (напряжение разряда – 335 В, ток – 0,5 А). Для определения скорости напыления были сделаны тестовые напыления. Толщина пленки оценивалась по анализу коэффициента пропускания с использованием данных из работы [15]. В процессе напыления подложка сканировалась относительно магнетрона для уменьшения неоднородности толщины наносимой пленки.

3. Результаты

На рис. 3 показано изображение, полученное с помощью оптического микроскопа в проходящем свете, для кратеров, созданных при различных параметрах (энергия импульса, количество импульсов), которые указаны сверху и слева от изображения соответствующих кратеров. Каждая серия экспериментов, выполненных при одинаковых экс-

периментальных условиях, состоит из 10 кратеров (см. рис. 3, вставка). Как видно, при уменьшении энергии импульсов яркость проходящего света заметно уменьшается и при количестве импульсов 25 и энергии импульсов 10 нДж совсем исчезает, что свидетельствует об отсутствии кратера при данных параметрах.

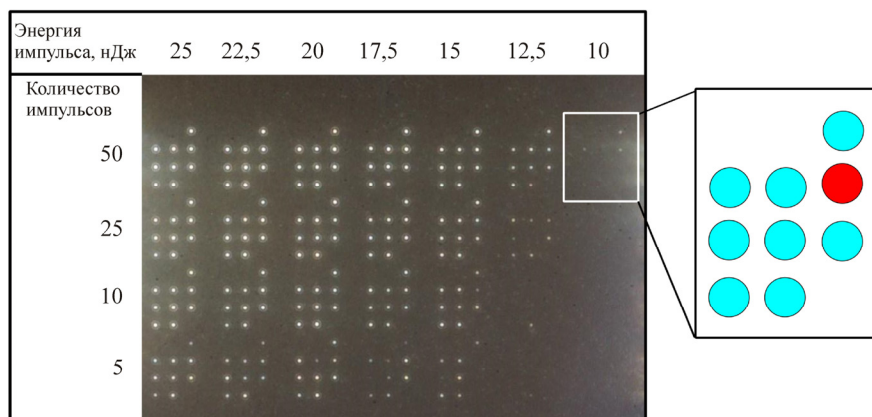
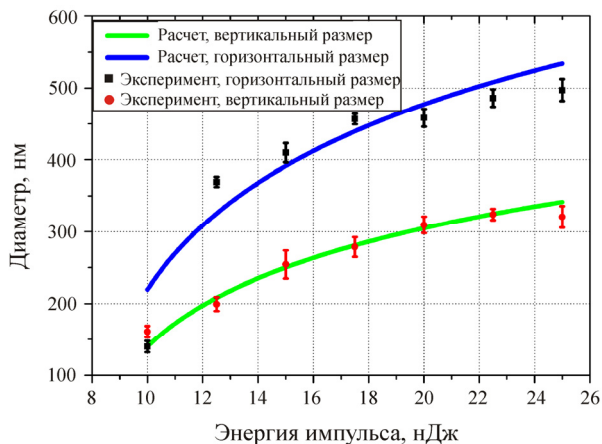


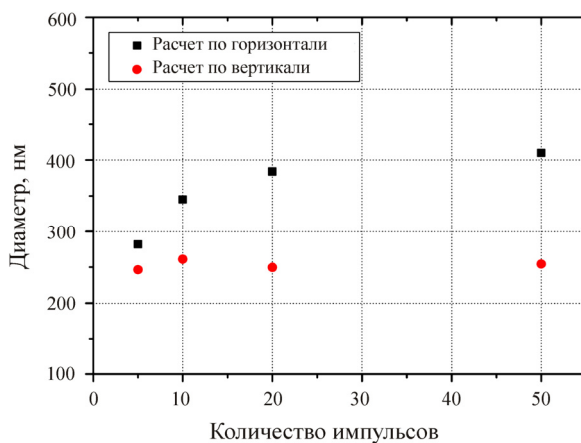
Рис. 3. Изображение с оптического микроскопа кратеров, созданных при различной энергии импульсов и количестве импульсов ультрафиолетового фемтосекундного лазера. На вставке изображено местоположение кратера с минимальными размерами

Подобное поведение можно наблюдать также и при уменьшении количества импульсов при фиксированной энергии. Кратеры, созданные при количестве импульсов 50 и энергии импульсов из диапазона 10–25 нДж, были исследованы на СЭМ-микроскопе с целью определения диаметра кратера в зависимости от величины энергии падающего излучения. Результаты измерения представлены на рис. 4, а, на котором видно, что кратер имеет эллиптическую форму. Эллиптичность кратера, по всей видимости, связана с эллиптичностью пучка в плоскости фокусировки, вызванной разницей в коэффициенте отражения от поверхности металлических зеркал объектива в случае *s*- и *p*-поляризации, а также некоторыми неточностями в оптической схеме. На рис. 4, помимо экспериментальных результатов, представлены значения диаметров, рассчитанные по вышеуказанным формулам при величине размера пучка w_0 , равного 230 и 360 нм соответственно, которые хорошо описывают экспериментальные результаты. Кроме того, была измерена зависимость размеров кратера от количества падающих импульсов при фиксированной энергии импульсов 15 нДж, которая представлена

на рис. 4, б. В данном случае размер по вертикали практически не изменяется от количества импульсов, тогда как по горизонтали значительно растет с увеличением числа импульсов.



а



б

Рис. 4. Зависимость диаметра кратера: *а* – от энергии импульса при 50 импульсах (эксперимент и расчет); *б* – от количества импульсов при энергии импульса 15 нДж

Кратер с минимальными размерами был получен в ходе экспериментов при энергии импульсов 10 нДж и количестве импульсов 50. На рис. 5 представлены изображения кратеров, полученные с помощью СЭМ, при двух типах наномодификации поверхности: с помощью фотолитографии (рис. 5, *а*) и с помощью фемтосекундного УФ-лазера (рис. 5, *б*). На врезках к рис. 5 показаны изображения с оптического

микроскопа в проходящем свете, на которых видно наличие сквозного отверстия в пленке алюминия в обоих случаях. Измеренные размеры кратера в первом случае – 150×170 нм, во втором – 160×140 нм. Глубина кратера оценивалась по интенсивности белого света, проходящего через отверстие. Как видно на рис. 5, площадь входных отверстий примерно одинакова, интенсивность проходящего света сравнима, однако для абляционного отверстия она немного меньше. Вероятнее всего, это связано с тем, что форма кратера абляционного отверстия имеет либо нецилиндрическую форму, сужаясь в сторону подложки, либо на дне кратера присутствует тонкий остаточный слой металла.

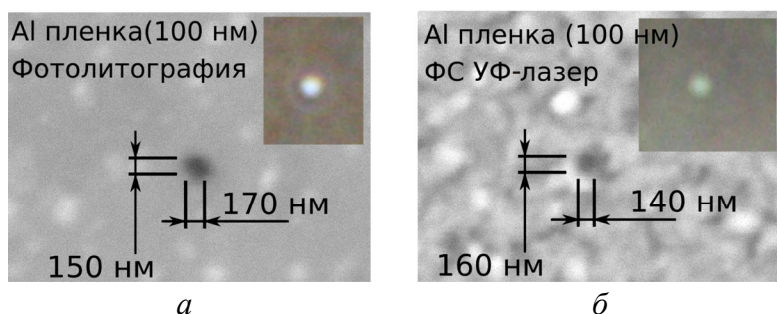


Рис. 5. Сравнение результатов создания отверстия на пленке алюминия: методом фотолитографии (а) и с помощью фемтосекундной ультрафиолетовой лазерной абляции (б). На вставках показаны изображения с оптического микроскопа в проходящем свете

Как следует из экспериментальных результатов (см. рис. 4), форма кратера зависит от выбора величины энергии импульса. Более округлая форма получается, если периферийные области астигматичного пучка отсекаются снижением их интенсивности ниже порогового значения, чтобы в процессе абляции участвовала только центральная часть пучка. Данная проблема может быть решена за счет пространственной фильтрации лазерного пучка [16]. Повторяемость формирования кратеров может быть увеличена за счет использования более однородной пленки алюминия или использования бесселева пучка, который имеет конфокальный параметр гораздо больший, чем гауссов пучок [17].

Поскольку глубина кратера зависит от количества импульсов (см. рис. 3, 10 нДж), можно подобрать оптимальное количество импульсов экспериментально, чтобы добиться достаточной яркости проходящего света для задачи одномолекулярной спектроскопии.

Для демонстрации работоспособности получившихся отверстий был проведен эксперимент по регистрации флуоресцентного сигнала в соответствии с рис. 6. Измерения были выполнены в оптической многоканальной конфокальной схеме [18], но без призмной сборки между линзами L_1, L_2 в регистрирующем канале. В схеме формировалась матрица лучей 25×25 с помощью специального дифракционно-оптического элемента (ДОЭ), который мультиплицировал исходный луч в матрицу лучей, которые фокусировались в область наноотверстий объективом Olympus UPLAPO 60X ($NA = 0,9$ (O)) таким образом, что расстояние между крайними лучами составляло 120 мкм, а характерный диаметр каждого луча – около 0,8 мкм. Расстояние между лучами на объекте было 5 мкм (см. подробнее в работе [19]).

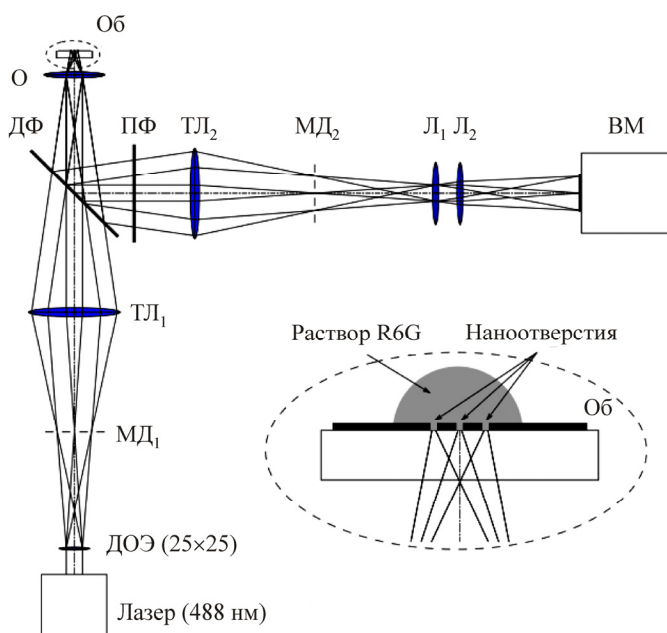


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для детектирования флуоресцентного сигнала: ДОЭ – дифракционный оптический элемент; $MD_{1,2}$ – матрица диафрагм; $TL_{1,2}$ – 1x-тубусная линза; ДФ – 45° -дихроичный фильтр; ПФ – 90° -полосовой фильтр; $L_{1,2}$ – линзы; ВМ – видеоматрица; О – 60x-объектив; Об – объект

Матрица лучей совмещалась с матрицей наноотверстий с помощью перемещения образца трехкоординатным столиком, имеющим минимальный шаг 0,32 мкм по латеральным координатам XU и 0,16 мкм по продольной координате Z . Степень совмещения контро-

лировалась по интенсивности флуоресценции из выбранного нанодоверстия. Мощность лазерного луча, падающего на одно нанодоверстие, составляет около $5/625$ мкВт = 8 нВт. Малая мощность лазера была выбрана специально, чтобы паразитный лазерный свет не оказывал существенного влияния на флуоресцентный сигнал. Длина волны лазера – 488 нм. Отраженный от алюминиевой пленки лазерный свет проходил через два фильтра (Semrock 45° Di01-T488/532/638 и 90° NF03-488) с общим коэффициентом подавления $7 \cdot 10^{-8}$. Для измерений был использован раствор флуорофора R6G в воде 1,4 мкг/25 мкл, капля которого помещалась на образце со стороны металла (см. вставку на рис. 6). Если предположить равномерное распределение количества молекул в объеме, то в объеме нанодоверстия ($140 \times 160 \times 100$ нм³) в среднем постоянно присутствовало около 160 молекул флуорофора (молярная масса принята равной 479 г/моль). Если глубина детектируемого объема на дне отверстия составляет $h_e = 30$ нм, то флуоресцировали около $N_f = 37$ молекул флуорофора. Телесный угол объектива $\Omega = 2,54$ стерadian, пропускание оптической системы $T_{os} = 0,6$. Если сечение поглощения молекулы флуорофора $\sigma_f = 10^{-16}$ см², то вероятность поглощения A_h одной молекулой с учетом площади отверстия $S_h = 1,8 \cdot 10^{-10}$ см², $A_h = \sigma_f S_h = 5,66 \cdot 10^{-7}$. Примем квантовый выход флуорофора $\eta_f = 0,9$, тогда количество испусканий флуоресцентного сигнала в секунду из нанодоверстия в телесный угол 4π стерadian: $\nu_{ex} = A_h N_f \nu_{ph} \eta_f = 1,46 \cdot 10^4$ фотон/с, где ν_{ph} – количество лазерных фотонов в секунду, попадающих в нанодоверстие, $\nu_{ph} = 6,9 \cdot 10^8$ фотон/с. Итоговое количество фотонов в секунду, достигших фотоматрицы, имеющей квантовую эффективность $\eta_{pm} = 0,9$, будет равно $\nu_{pm} = \nu_{ex} \eta_{pm} \Omega / (4\pi) T_{os} = 1,43 \cdot 10^3$ фотон/с.

Для фиксирования флуоресцентного света использовалась высокочувствительная фотоматрица Hamamatsu ImagEM C9100-13 (см. ВМ на рис. 6) с разрешением 512×512 пикселей (размер пикселя – 16×16 мкм²). Камера работала в режиме EM CCD, время экспозиции – 2 с, цифровое усиление – 1, чувствительность – 162 (что соответствует в среднем чувствительности $s_{pm} = 4$ отсчетов на один фотон). На рис. 7, а показано пропускание белого света через нанодоверстия из вставки на рис. 3 в сравнении с флуоресцентным сигналом из исследуемых нанодоверстий, который изображен на рис. 7, б. Там же приведен снимок сигнала флуоресценции от одного исследуемого нанодоверстия, выделенного

квадратом 7×7 пикселей, в котором максимальное значение отсчетов составляет 6922, минимальное – 3054. В данном квадрате значение каждого пикселя уменьшалось на величину, равную среднему значению фона (3586 отсчетов), измеренного в области, обведенной пунктирным квадратом на рис. 7, б. Среднеквадратическое отклонение шума фона, который имеет распределение Пуассона, равен 414 отсчетам.

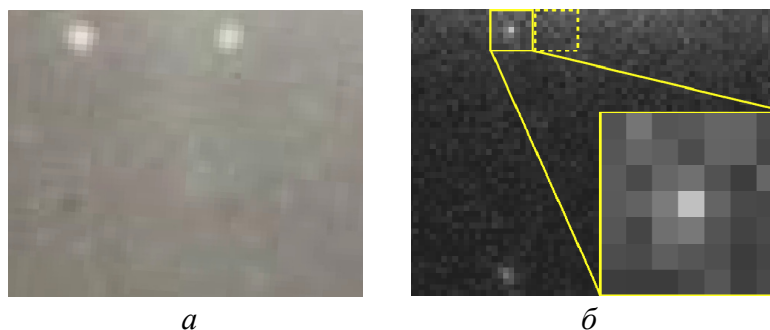


Рис. 7. Белый свет, прошедший через нанотверстия, показанные на рис. 3 (а), флуоресцентный сигнал на фотоматрице из тех же нанотверстий (б); на вставке показан сигнал из одного нанотверстия из квадрата размером 7×7 пикселей

Полученные значения суммировались и делились на чувствительность. Таким образом оценивали число фотонов N_{exp} сигнала, попавших в выделенные пиксели ($N_{exp} = 12767/s_{pm} = 3,17 \cdot 10^3$ фотонов), за время измерения, что по порядку величины совпадает с оценочным количеством зафиксированных фотоматрицей фотонов за время экспозиции матрицы ($N_{calc} = 2,86 \cdot 10^3$ фотонов). При этом с учетом пропускания фильтров и оптической системы в числе сигнальных фотонов N_{exp} могут содержаться остаточные фотоны лазера $N_{las} \leq 10^3$ фотонов, что не оказывает существенного влияния. Совпадение по порядку величин N_{exp} и N_{calc} подтверждает работоспособность изготовленного нанотверстия для целей одномолекулярной флуоресцентной спектроскопии.

Заключение

В данной работе проведено исследование формирования нанотверстий в алюминиевой пленке толщиной 100 нм методом лазерной абляции с использованием фемтосекундных УФ-импульсов. Проанализирована зависимость диаметра кратера от энергии и числа импульсов, демонстрирующая непротиворечивость эксперимента и теории. Были

определены оптимальные энергия и число фемтосекундных импульсов для формирования наноотверстий размером <150 нм. Экспериментальные результаты продемонстрировали возможность быстрого изготовления наноотверстий в алюминиевой пленке для целей одномолекулярной спектроскопии.

Авторы выражают благодарность Российской академии наук за финансовую поддержку, а также С.Л. Микерину и С.К. Голубцову за техническую помощь. В исследовании использовано оборудование ЦКП «Спектроскопия и оптика». Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН.

Список литературы

1. Schuler B. Single-molecule spectroscopy // *Encycl. Biophys.* – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
2. Levene M.J. Zero-mode waveguides for single-molecule analysis at high concentrations // *Science.* – 2003. – № 299. – P. 682–686.
3. Real-time DNA sequencing from single polymerase molecules / J. Eid, A. Fehr, J. Gray, K. Luong, J. Lyle, G. Otto [et al.] // *Science.* – 2009. – № 323. – P. 133–138.
4. Nanoaperture-enhanced fluorescence: towards higher detection rates with plasmonic metals / D. Gerard, J. Wenger, N. Bonod, E. Popov, H. Rigneault, F. Mahdavi [et al.] // *Phys. Rev. B. Condens Matter Mater Phys.* – 2008. – № 77. – P. 1–8.
5. Zhao J., Branagan S.P., Bohn P.W. Single-molecule enzyme dynamics of monomeric sarcosine oxidase in a gold-based zero-mode waveguide // *Appl. Spectrosc.* – 2012. – № 66. – P. 163–169.
6. Improved fabrication of zero-mode waveguides for single-molecule detection / M. Foquet, K.T. Samiee, X. Kong, B.P. Chauduri, P.M. Lundquist, S.W. Turner [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2008. – № 103. – P. 1–9.
7. Single molecule fluorescence in rectangular nano-apertures / J. Wenger, P.-F. Lenne, E. Popov, H. Rigneault, J. Dintinger, T. Ebbesen // *Opt. Express.* – 2005. – № 13. – P. 7035–7044.
8. Pulsed-interleaved excitation FRET measurements on single duplex DNA molecules inside C-shaped nanoapertures / S. Fore, Y. Yuen, L. Hesselink, T. Huser // *Nano Lett.* – 2007. – № 7. – P. 1749–1756.

9. Fabrication of microscale medical devices by two-photon polymerization with multiple foci via a spatial light modulator / S.D. Gittard, A. Nguyen, K. Obata, A. Koroleva, R.J. Narayan, B.N. Chichkov // *Biomed. Opt. Express.* – 2011. – № 2. – P. 3167.

10. Machining of sub-micron holes using a femtosecond laser at 800 nm / P. Pronko, S. Dutta, J. Squier, J. Rudd // *Opt. Commun.* – 1995. – № 114. – P. 106–110.

11. Venkatakrishnan K., Tan B., Sivakumar N.R. Sub-micron ablation of metallic thin film by femtosecond pulse laser // *Opt. Laser Technol.* – 2002. – № 34. – P. 575–578.

12. Doerr D.W., Alexander D.R. Submicron patterning of aluminum films by laser ablation // *Proc. SPIE.* – 1999. – Vol. 3874. – P. 62–67.

13. Spiro A., Lowe M., Pasmanik G. Drilling rate of five metals with picosecond laser pulses at 355, 532, and 1064 nm // *Appl. Phys. A.* – 2012. – № 107. – P. 801–808.

14. High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser / E. Bulushev, V. Bessmeltsev, A. Dostovalov, N. Goloshevsky, A. Wolf // *Opt. Lasers. Eng.* – 2016. – № 79. – P. 39–47.

15. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices / A.D. Rakic, A.B. Djurusic, J.M. Elazar, M.L. Majewski // *Appl. Opt.* – 1998. – № 37. – P. 5271–5283.

16. Femtosecond pulsed laser ablation with spatial filtering / K. Venkatakrishnan, B. Tan, L.H.K. Koh, B.K.A. Ngoi // *Opt. Lasers Eng.* – 2002. – № 38. – P. 425–432.

17. Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams / B. Yalizay, T. Ersoy, B. Soyulu, S. Akturk // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – № 100. – P. 82–85.

18. Parallel confocal detection of single molecules in real time / P.M. Lundquist, C.F. Zhong, P. Zhao, A.B. Tomaney, P.S. Peluso, J. Dixon, B. Bettman, Y. Lacroix, D.P. Kwo, E. McCullough, M. Maxham, K. Hester, P. McNitt, D.M. Grey, C. Henriquez, M. Foquet, S.W. Turner, D. Zaccarin // *Opt. Lett.* – 2008. – № 33. – P. 1026–1028.

19. О создании платформы для исследования нуклеиновых кислот (ДНК-секвенатора) / В.П. Бессмельцев, В.С. Терентьев, В.В. Вилейко, С.А. Бабин, А.М. Шалагин, А.В. Латышев, Д.А. Насимов, Л.И. Федина, Д.В. Пышный, П.Е. Воробьев, В.В. Анненков, Е.Н. Дани-

ловцева, С.Н. Зелинский, О.Н. Верхозина, М.А. Грачев, Ю.П. Галач-
янц // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 388–412.

References

1. Schuler B. Single-Molecule Spectroscopy. In: Roberts GCK, edi-
tor. *Encycl. Biophys.*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013.
2. Levene MJ. Zero-Mode Waveguides for Single-Molecule Analysis
at High Concentrations. *Science* 2003; 299:682–6.
3. Eid J, Fehr A, Gray J, Luong K, Lyle J, Otto G, et al. Real-Time
DNA Sequencing from Single Polymerase Molecules. *Science* 2009;
323:133–8.
4. Gerard D, Wenger J, Bonod N, Popov E, Rigneault H, Mahdavi F,
et al. Nanoaperture-enhanced fluorescence: Towards higher detection rates
with plasmonic metals. *Phys Rev B - Condens Matter Mater Phys* 2008;
77:1–8.
5. Zhao J, Branagan SP, Bohn PW. Single-molecule enzyme dynam-
ics of monomeric sarcosine oxidase in a gold-based zero-mode waveguide.
Appl Spectrosc 2012;66:163–9.
6. Foquet M, Samiee KT, Kong X, Chauduri BP, Lundquist PM,
Turner SW, et al. Improved fabrication of zero-mode waveguides for single-
molecule detection. *J Appl Phys* 2008; 103:1–9.
7. Wenger J, Lenne P-F, Popov E, Rigneault H, Dintinger J, Ebbes-
sen T. Single molecule fluorescence in rectangular nano-apertures. *Opt*
Express 2005; 13:7035–44.
8. Fore S, Yuen Y, Hesselink L, Huser T. Pulsed-interleaved excita-
tion FRET measurements on single duplex DNA molecules inside C-shaped
nanoapertures. *Nano Lett* 2007; 7:1749–56.
9. Gittard SD, Nguyen A, Obata K, Koroleva A, Narayan RJ, Chich-
kov BN. Fabrication of microscale medical devices by two-photon polym-
erization with multiple foci via a spatial light modulator. *Biomed Opt Ex-
press* 2011; 2:3167.
10. Pronko P, Dutta S, Squier J, Rudd J. Machining of sub-micron
holes using a femtosecond laser at 800 nm. *Opt Commun* 1995;114:106–10.
11. Venkatakrishnan K, Tan B, Sivakumar NR. Sub-micron ablation
of metallic thin film by femtosecond pulse laser. *Opt Laser Technol*
2002;34:575–8.

12. Doerr DW, Alexander DR. Submicron patterning of aluminum films by laser ablation. In: Smith JH, Karam JM, editors. Proc. SPIE, vol. 3874, 1999, p. 62–7.

13. Spiro A, Lowe M, Pasmanik G. Drilling rate of five metals with picosecond laser pulses at 355, 532, and 1064 nm. Appl Phys A 2012; 107:801–8.

14. Bulushev E, Bessmeltsev V, Dostovalov A, Goloshevsky N, Wolf A. High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser. Opt Lasers Eng 2016; 79:39–47.

15. Rakic AD, Djuricic AB, Elazar JM, Majewski ML. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. Appl Opt 1998; 37:5271–83.

16. Venkatakrisnan K, Tan B, Koh LHK, Ngoi BKA. Femtosecond pulsed laser ablation with spatial filtering. Opt Lasers Eng 2002;38:425–32.

17. Yalizay B, Ersoy T, Soylu B, Akturk S. Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser Bessel beams. Appl Phys Lett 2012; 100:82–5.

18. P.M. Lundquist, C.F. Zhong, P. Zhao, A.B. Tomaney, P.S. Peluso, J. Dixon, B. Bettman, Y. Lacroix, D. P. Kwo, E. McCullough, M. Maxham, K. Hester, P. McNitt, D.M. Grey, C. Henriquez, M. Foquet, S.W. Turner, D. Zaccarin. Parallel confocal detection of single molecules in real time. Opt. Lett. 2008;33:1026–1028.

19. V.P. Bessmel'cev, V.S. Terent'ev, V.V. Vilejko, S.A. Babin, A.M. Shalagin, A.V. Latyshev, D.A. Nasimov, L.I. Fedina, D.V. Pyshnyj, P.E. Vorob'ev, V.V. Annenkov, E.N. Danilovceva, S.N. Zelinskij, O.N. Verhozina, M.A. Grachev, Ju.P. Galach'janc. “O sozdanii platformy dlja issledovaniija nukleinovyh kislot (dnk-sekvenator)” // Prikladnaja fotonika. 2016, T.3, №4, s. 388-412.

Получено 24.03.2017

УДК 57.621.383; 61.621.383

**М.В. Ременникова¹, В.К. Урядова², М.К. Лушникова²,
Ю.А. Конин¹, А.И. Гаранин^{1,2}**

¹ Пермский научный центр УрО РАН, Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,08 МКМ НА МЯГКУЮ БИОТКАНЬ

Представлены результаты исследования воздействия высокоинтенсивного лазерного излучения с длиной волны 1,08 мкм на мягкие биологические ткани. Изготовлен макет волоконного лазера, в котором в качестве активной среды использовалось волокно с многокомпонентной оболочкой GTWave, легированное ионами иттербия. Максимальная мощность волоконного лазера составила 9 Вт в непрерывном режиме работы. В результате лазерного воздействия были получены лазерные кратеры в мышечной ткани и на коже. Подобрано эффективное время воздействия: для мышечной ткани оно составляет 60 с, для кожи – 17 с. Разработанный макет лазера может применяться в хирургических целях. Предполагается, что наиболее высокая эффективность удаления биоткани может быть обеспечена при контактном способе воздействия.

Ключевые слова: иттербиевый волоконный лазер, лазерный кратер, мягкие биоткани, лазерное термическое воздействие, лазерная абляция, высокоинтенсивное лазерное излучение, лазерная хирургия.

**M.V. Remennikova¹, V.K. Uriadova², M.K. Lushnikova²,
Yu.A. Konin¹, A.I. Garanin^{1,2}**

¹ Perm Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A STUDY OF THE EFFECT OF FIBER LASER AT WAVELENGTH OF 1.08 MM RADIATION APPLIED TO A SOFT TISSUE

In this paper, we have investigated the effect of high-intensity laser radiation with a wavelength of 1.08 μm applied to soft biological tissues. We have designed a laser model that has a fiber with a multi-component cladding of GTWave type and core doped by ytterbium ions, that has been used as an active medium. The maximal power of the fiber laser is 9 W in continuous wave mode. As a result of laser exposure, we have obtained laser craters in muscle tissue and skin. An effective time of action has been chosen (for muscle tissue 60 s, for skin 17 s). The developed laser model can be used for surgical purposes. It is assumed that the highest tissue removal efficiency could be provided by the contact method of exposure.

Keywords: ytterbium fiber laser, laser crater, soft tissue, laser thermal impact, laser ablation, high-intensity laser radiation, laser surgery.

Введение

Одной из первых областей применения лазерного излучения стала медицина. Самое большое распространение получил твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 1064 нм. Он стал обычным инструментом хирургов, косметологов, стоматологов и т.д. [1]. В настоящее время все стремительнее развивается волоконная оптика. Появляются различные схемы мощных волоконных лазеров, основанных на процессе генерации излучения в активном волокне, легированном редкоземельными элементами (Er, Ho, Yb, Tm) [2, 3]. Преимущество волоконных лазеров перед твердотельными заключается не только в значительно меньших размерах, но и одномодовом режиме генерации. Одномодовый режим позволяет сконцентрировать большую энергию на меньшей площади поверхности.

Мощные лазеры в медицине применяются для удаления патологических тканей или в качестве скальпеля. Воздействие мощного лазерного излучения на биоткань приводит к ее удалению в месте облучения (абляции). Помимо этого, возникают термические, механические (в результате возникновения ударной волны), лучевые эффекты, сопутствующие процессу абляции. Результатом воздействия высокоинтенсивного лазерного излучения является лазерная рана (рис. 1), которая состоит из нескольких зон: лазерного кратера, зоны некротических изменений, зоны продуктов разрушенной биоткани (зоны карбонизации) [4]. Для уменьшения нежелательных последствий лазерного

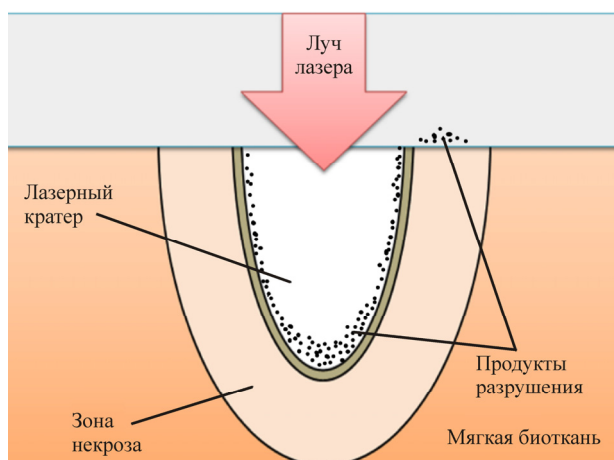


Рис. 1. Структура лазерной раны, формируемой в мягкой биоткани под воздействием лазерного излучения [4]

облучения и сокращения времени регенерации ткани подбирают такие режимы воздействия, чтобы увеличить эффективность абляции, одновременно сокращая зону некроза и зону карбонизации. В настоящей работе исследовано влияние лазерного излучения с длиной волны 1080 нм на модель биологической ткани (мышечную ткань и кожу курицы) при различном времени воздействия.

1. Методика проведения эксперимента

Для опытов был изготовлен макет иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1080 нм [5], схема которого изображена на рис. 2. В качестве активной среды использовалось волокно с многокомпонентной оболочкой GTWave, легированное ионами иттербия. Длина активного контура составила 34 м. Накачка лазера производилась лазерным диодом мощностью 34 Вт с центральной длиной волны 976 нм через пассивную жилу волокна GTWave. К концам активной жилы были приварены брэгговские решетки с резонансной длиной волны $\lambda_{BG} = 1080$ нм. Коэффициент отражения решеток R составлял 100 и 30 %. К выходу лазера было приварено волокно доставки SMF28. Волоконный лазер работал в непрерывном режиме, спектральная ширина лазера составила 0,2 нм, качество пучка $TEM_{00} < 1,1$. Максимальная мощность его излучения составила 9 Вт. Величину выходной мощности можно было варьировать (рис. 3).

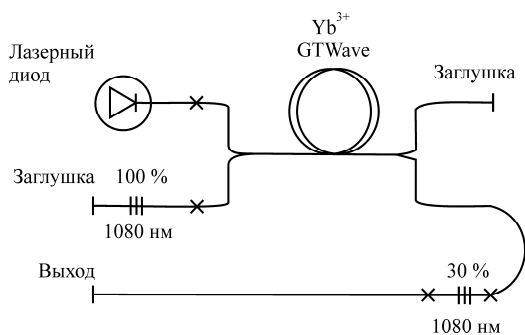


Рис. 2. Схема экспериментального иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1080 нм [5]

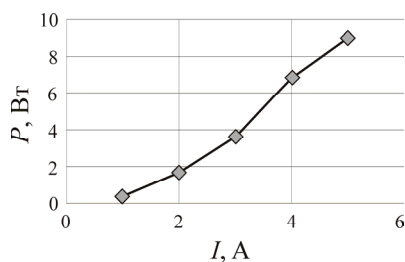


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от тока накачки лазерного диода

Образец биоткани закреплялся на фиксированном расстоянии от выходного торца волоконного световода и облучался на максимальной мощности в течение различного времени. После такого воздействия кусок биоткани замораживался, затем делался разрез по центру лазерного кратера. Получившийся образец помещался на лабораторное стекло, и при помощи микроскопа Levenhuk D320L NG с цифровой камерой Levenhuk C310 и подключения к нему программного обеспечения при увеличении 10^{\times} проводились измерения геометрических параметров зон лазерного воздействия (рис. 4).

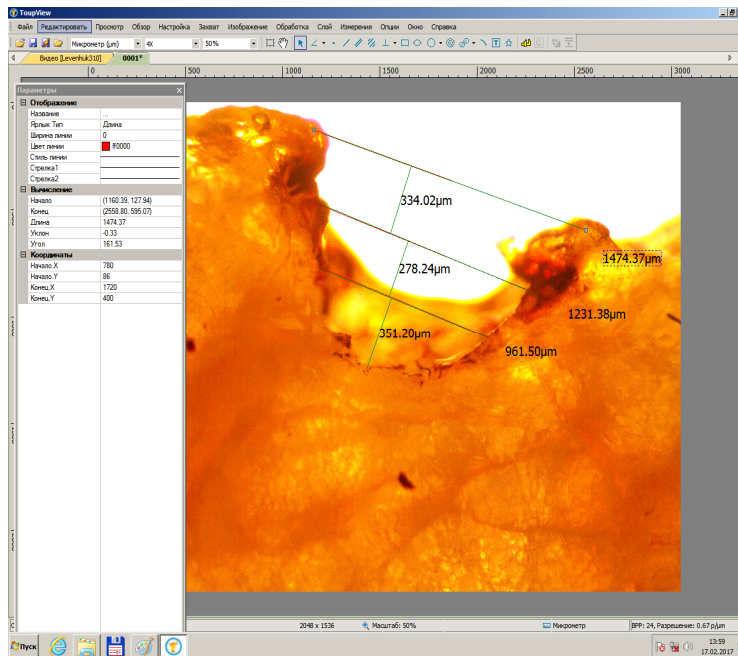


Рис. 4. Размеры лазерного кратера

Для количественной оценки эффективности лазерного воздействия контур разреза кратера визуально «разбивался» на элементарные геометрические фигуры (рис. 5), способные наиболее полно заполнить его внутренне пространство. Подсчитывались объемы этих фигур и, исходя из этого, общий объем кратера. Затем вычислялись эффективность удаления биоткани и фактор инвазивности с помощью формул

$$\uparrow \langle \varepsilon \rangle = \frac{V_{\text{кр}}}{E_{\Sigma}},$$

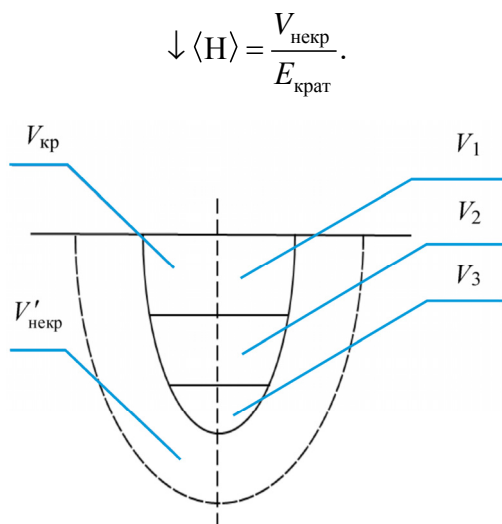


Рис. 5. Визуально «разбитый» контур разреза кратера на элементарные геометрические фигуры: V_1 и V_2 – объемы усеченных конусов, V_3 – объем шарового сегмента

2. Результаты эксперимента и их обсуждение

В результате лазерного воздействия были получены на мышечной ткани и коже лазерные кратеры различного размера и глубины в зависимости от времени воздействия (рис. 6). Уровень мощности излучения был максимальным. Облучение проводилось с расстояния порядка 0,5 см. Результаты расчетов представлены в таблице.



Рис. 6. Лазерные кратеры в куриной мышечной ткани, образовавшиеся при различном времени воздействия и мощности излучения 9 Вт

Результаты экспериментов

Время, с	Суммарная энергия воздействия, Дж	Фактор инвазивности	Эффективность удаления ткани, мм ³ /Дж
При воздействии на мышечную ткань			
60	540	42	$2,6 \cdot 10^{-7}$
88	792	387	$0,9 \cdot 10^{-7}$
143	1287	123	$0,6 \cdot 10^{-7}$
191	1719	211	$1,2 \cdot 10^{-7}$
221	1989	101	$1,1 \cdot 10^{-7}$
При воздействии на кожу			
17	153	–	6,54
38	342	–	0,013
50	450	–	0,025
60	540	–	0,016

Суммарная энергия была рассчитана по формуле

$$E_{\Sigma} = P_{\text{изм}} \cdot t,$$

где P – мощность лазерного излучения (максимальная для данного лазера); t – время воздействия.

По результатам проведенных опытов можно сделать вывод о том, что данная экспериментальная схема лазера может использоваться для термического воздействия на мягкие биоткани.

Лазерное излучение с длиной волны 1,08 мкм довольно плохо поглощается водой. Других хромофоров в живых тканях для этой длины волны нет, поэтому эксперимент наглядно показал, что при увеличении длительности воздействия на мышечную ткань увеличивается зона некротических изменений (возрастает фактор инвазивности). Лучшая эффективность удаления при минимальном повреждении окружающей ткани наблюдается при наименьшем времени воздействия, равном 60 с. Таким образом, можно с уверенностью предположить, что для режима работы «Скальпель» необходим контактный способ взаимодействия биоткани с выходным оптически волокном. Однако для проведения такого эксперимента необходимо продумать систему очистки волоконного торца, так как во время воздействия он будет загрязняться продуктами абляции, что может привести к повреждению волокна или вы-

горанию лазера [6]. Альтернативный вариант – использовать специальные типы волокон для вывода излучения из лазера.

Лучшие результаты показал эксперимент с воздействием на кожу. Кожа содержит большее количество воды (например, в подкожно-жировой клетчатке). Излучение с длиной волны 1,08 мкм эффективнее поглощалось, что привело к отсутствию зоны некротических изменений. Эффективность удаления ткани также самая высокая при меньшем времени воздействия, равном 17 с, что свидетельствует в пользу контактного метода воздействия.

Стоит отметить минимальные зоны карбонизации (рис. 7, 8) и на коже, и в мышечной ткани. Обугливания практически не наблюдалось, таким образом, можно предположить, что при воздействии на живые биологические объекты заживление такой лазерной раны будет происходить без осложнений и в короткий промежуток времени.

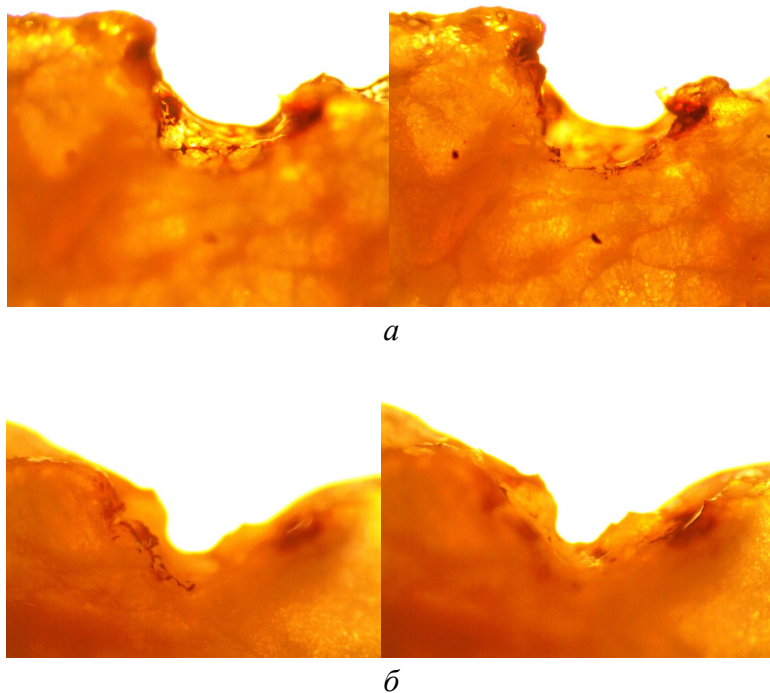
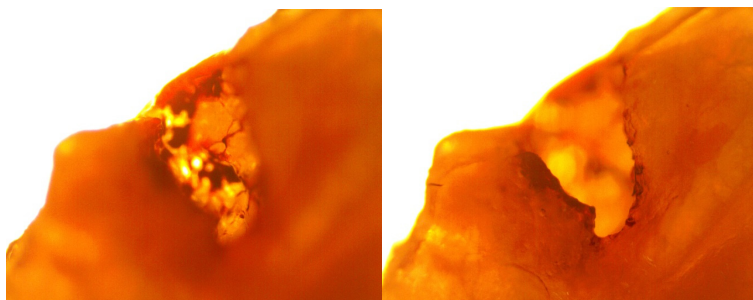
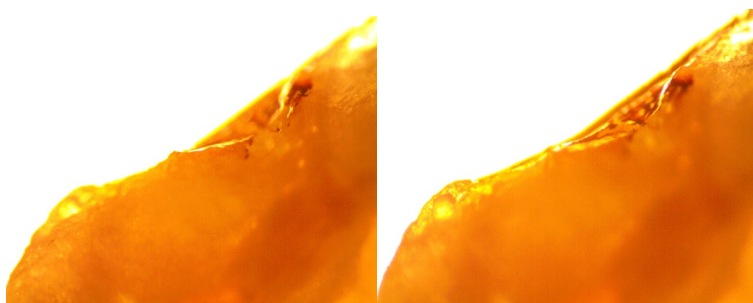


Рис. 7. Внешний вид кратера (в разрезе) на коже курицы при увеличении $10\times$, время воздействия: а – 60 с; б – 50 с; в – 38 с; г – 17 с (см. также с. 45)



б



г

Рис. 7. Окончание



Рис. 8. Внешний вид кратера (в разрезе) в мышечной ткани курицы при увеличении $10\times$, время воздействия – 143 с

Проведенные предварительные эксперименты показывают, что данный макет лазера может найти применение в ряде областей медицины в качестве инструмента для термических воздействий.

Список литературы

1. Серебряков В.А. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии в медицине». – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 266 с.

2. Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 10. – С. 881–900.

3. Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С. Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,1 мкм для медицинского применения // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 130–139.

4. Князьков В.Б., Гофман В.В., Гофман В.Р. Лазерная хирургия заболеваний глоточного лимфатического кольца. – М.: Техносфера, 2016. – 440 с.

5. Курков А.С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства. – М., 2012. – 184 с.

6. Fiber fuse phenomenon in hole-assisted fibers / K. Takenaga, Sh. Tanigawa, Sh. Matsuo, M. Fujimaki // Fujikura Technical Review. – 2011. – P. 12–15.

References

1. Serebryakov V.A. Opornyy konspekt lektsiy po kursu «Lazernyye tekhnologii v meditsine» [A basic summary of lectures on the course "Laser technologies in medicine"]. SPb: SPbGU ITMO, 2009, pp. 266.

2. Kurkov A.S., Dianov E.M. Nepreryvnyye volokonnyye lazery sredney moshchnosti [Continuous fiber lasers of medium power]. Quantum Electronics, 2004, vol. 34, no. 10, pp. 881-900.

3. Philatova S.A., Zvetkov V.B., Kurkov A.S. Impul'snyy gol'miyevyy volokonnyy lazer s dlinoy volny izlucheniya 2,1 mkm dlya meditsinskogo primeneniya [Pulsed holmium fiber laser with a wavelength of 2.1 μm for medical applications]. Applied photonics, 2014, no. 1, pp. 130-139.

4. Knyaz'kov V.B., Gofman V.V., Gofman V.R. Lazernaya khirurgiya zabolevaniy glotochnogo limfaticeskogo kol'tsa [Laser surgery of the pharyngeal lymphatic disease]. Moscow: Tekhnosfera, 2016. 440 p.

5. Kurkov A.S. Volokonnyye lazery: printsipy postroyeniya i osnovnyye svoystva [Fiber lasers: principles of construction and basic properties]. 2012, pp. 184.

6. Katsuhiko Takenaga, Shoji Tanigawa, Shoichiro Matsuo, Munehisa Fujimaki Fiber Fuse Phenomenon in Hole-Assisted Fibers. Fujikura Technical Review, 2011, pp. 12-15.

УДК 631.373

**Р.В. Дробышев^{1,2}, В.С. Терентьев¹, Ю.А. Тимиртдинов¹,
И.А. Лобач^{1,2,3}, С.И. Каблуков¹**

¹ Институт автоматизации электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИТТЕРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С МОДУЛЯЦИЕЙ УСИЛЕНИЯ

Впервые продемонстрирована возможность генерации иттербиевого волоконного лазера с широким спектром в режиме модуляции усиления. Разработанный лазер генерирует последовательность стабильных импульсов с частотой повторения ≈ 50 кГц с пиковой мощностью более 1 Вт и шириной спектра более 13 нм по уровню -10 дБ.

Ключевые слова: волоконный лазер, импульсный лазер, иттербий, модуляция усиления, широкополосная генерация.

**R.V. Drobyshev^{1,2}, V.S. Terent'ev¹, Yu.A. Timirtdinov¹,
I.A. Lobach^{1,2,3}, S.I. Kablukov¹**

¹ Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

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

GAIN-SWITCHED BROADBAND YB-DOPED FIBER LASER

A pulsed gain-switched broadband ytterbium-doped fiber laser demonstrated for the first time. The laser generates sequence of stable pulses at repetition rate of about ≈ 50 kHz with peak power of more than 1 W and spectrum linewidth of more than 13 nm at a level of -10 dB

Keywords: fiber laser, pulsed laser, ytterbium, gain-switched, broadband generation.

Широкополосные источники оптического излучения могут применяться в схемах низкокогерентной интерферометрии (для оптической томографии [1], измерения вращения [2], скорости и вибраций [3] и т.д.) или для характеристики спектральных свойств элементов (в частности, для опроса датчиков на основе волоконных брэгговских решеток [4]). Подобные широкополосные источники могут быть реали-

зованы различными способами. Самым простым широкополосным источником является обычная лампочка. Для ее практического применения из-за низкой спектральной плотности мощности требуется использование высокочувствительных фотодетекторов. Значительно большую величину спектральной плотности мощности можно получить в источниках усиленной спонтанной эмиссии (или суперлюминесцентных источниках). В них отсутствует резонатор, что приводит к усилению спонтанного излучения. Как правило, для этих целей применяются полупроводниковые структуры [5] или волоконные схемы [6].

Например, для реализации волоконной схемы широкополосного источника с шириной спектра порядка 47 нм и выходной мощностью более 20 мВт был применен специальный иттербиевый световод [6].

Широкий спектр генерации также может быть получен в кольцевых лазерных схемах при генерации коротких импульсов. В кольцевом однонаправленном иттербиевом лазере с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации был получен спектр с шириной более 130 нм [7]. Дальнейшее уширение спектра можно получить в схемах генераторов (супер-) континуума с накачкой ультракороткими импульсами [8]. Механизм формирования широкого спектра может состоять из ряда нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция, четырехволновое смещение, вынужденное комбинационное рассеяние света и т.д. В этом случае спектр генерации состоит из множества продольных мод лазера накачки, фазово связанных между собой. Это свойство позволяет применять генераторы суперконтинуума для высокоточной метрологии [8].

Такая структура спектра принципиально отличается от спектров, получаемых в суперлюминесцентных источниках, в которых нет модовой структуры из-за отсутствия резонатора. Известно, что добавление обратной связи приводит к возникновению узкополосной лазерной генерации. Кроме того, отсутствие резонатора существенно ограничивает масштабирование выходной мощности суперлюминесцентного источника, любое малое паразитное отражение приводит к появлению лазерной генерации [9]. Для увеличения выходной мощности применяются специальные методы подавления паразитных отражений [9] или усилительные схемы [10]. В этих случаях выходная мощность может достигать сотен ватт. Малая ширина спектра связана с характером однородного (в случае иттербия) усиления и конкуренцией продоль-

ных мод, вызванной эффектом пространственного выжигания дыр в активной среде. В частности, это может приводить к различным динамическим эффектам, таким как самоиндуцированное сканирование оптической частоты [11].

Для подавления эффектов конкуренции мод применяются разные подходы, например добавление различных фазовых модуляторов [12] или высоконелинейных волокон [13]. Как правило, в таких схемах получают многоволновую лазерную генерацию. Так, в работе [13] в кольцевой схеме эрбиевого кольцевого лазера была получена генерация на 24 линиях с полной шириной более 20 нм. В настоящей работе предлагается новый тип источника широкополосного излучения на основе иттербиевого волоконного лазера. Отличительной особенностью источника является наличие широкополосного резонатора, что позволяет получать лазерную генерацию с возможностью достижения высоких выходных мощностей. При этом, в отличие от генератора континуума, в предложенной схеме не требуется применения достаточно сложных техник формирования ультракоротких импульсов. Для подавления конкуренции между модами применена техника модуляции усиления с помощью амплитудной модуляции накачивающего излучения [14]. В этом случае, как предполагается, в течение времени, сравнимом со временем релаксационных осцилляций, в генерацию может одновременно выйти большое количество продольных мод, что проявляется в широкополосной генерации излучения. Полная ширина спектра на полувысоте такого источника составила порядка 8 нм при средней мощности более 100 мВт. При этом пиковая мощность генератора может достигать более 1 Вт. В работе также обсуждаются вопросы увеличения ширины спектра и выходной мощности.

На рис. 1 приведена схема широкополосного волоконного иттербиевого лазера с модуляцией усиления. В качестве активной среды использовалось активное волокно с двойной оболочкой длиной 2,8 м, легированное ионами иттербия (Nuferrn PM-YDF-5/130-VIII). Резонатор лазера был сформирован широкополосным плотным зеркалом с одной стороны и отражением Френеля от торца сколотого под прямым углом волокна с другой. Плотное зеркало было сформировано методом магнитронного распыления титановой и кремниевой мишеней в атмосфере аргона и кислорода. Нанесение слоев диэлектриков проводилось на прямой торец волоконного световода с сохранением линейного со-

стояния поляризации излучения типа PANDA. Контроль нанесения слоев велся интерференционным методом на длине волны 1064 нм. Смена напыляемых материалов производилась при достижении экстремума (максимума для TiO_2 и минимума для SiO_2) коэффициента отражения от торца данного волокна. В итоге было изготовлено многослойное покрытие, содержащее 11 четвертьволновых слоев со структурой $(\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2)^5 + \text{TiO}_2$ (более подробное описание процесса изготовления зеркала приведено в работе [15]). Спектр отражения сформированного зеркала представлен на рис. 2. На данном рисунке можно увидеть, что коэффициент отражения, примерно равный 80 %, слабо меняется с длиной волны в области 950–1100 нм. Дополнительно в резонатор был добавлен волоконный ответвитель 95/5 с целью проведения характеристики излучения. Стоит отметить, что все элементы лазера были изготовлены из волокна типа PANDA с сохранением линейного состояния поляризации.

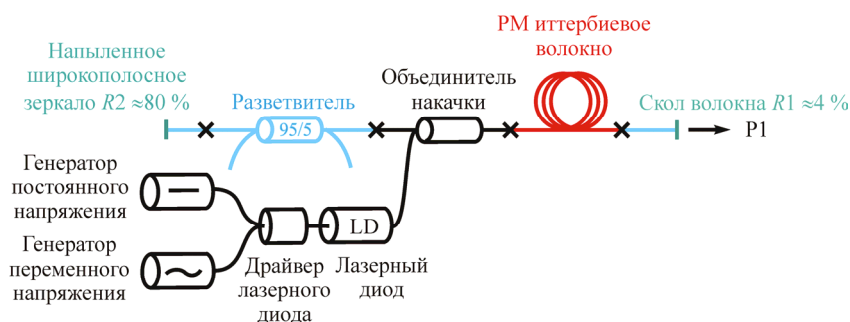


Рис. 1. Схема волоконного иттербиевого лазера с модуляцией усиления

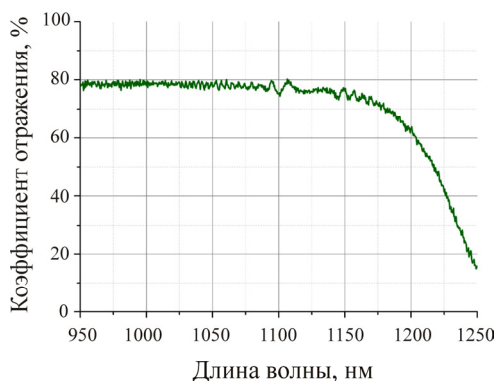


Рис. 2. Спектр отражения напыленного зеркала

Оптическая накачка производилась при помощи многомодового лазерного диода с центральной длиной волны вблизи 975 нм через объединитель накачивающего излучения типа (2+1)×1 с сигнальным входом. При этом на лазерный диод через драйвер подавался сигнал смещения от генераторов непрерывного и переменного напряжения. Синусоидальная модуляция переменной составляющей тока диода осуществлялась с помощью генератора Agilent 33250A с частотой модуляции от 20 до 50 кГц. Типичная временная динамика интенсивности накачивающего излучения представлена на рис. 3. Поскольку излучение накачки формирует инверсию населенности в активной среде, то модуляция накачки приводила к модуляции усиления.

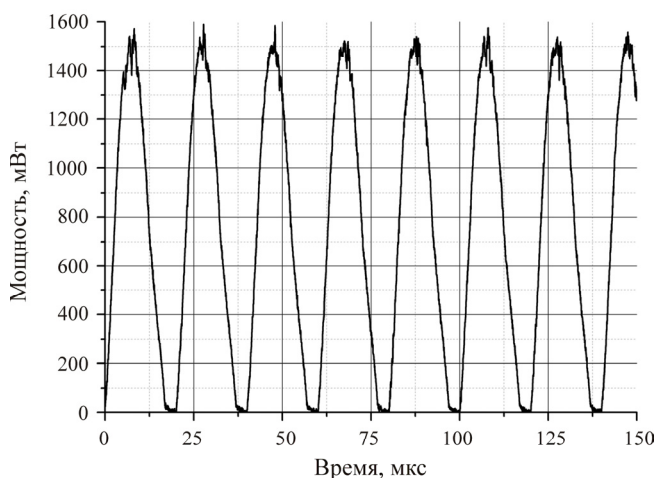


Рис. 3. Динамика интенсивности лазера накачки при модуляции тока от 0 до 4,4 А и частоте модуляции 50 кГц

В ходе экспериментов измерялись временная динамика интенсивности, спектр генерации, мощность и состояние поляризации генерируемого излучения. Измерения динамики интенсивности проводились при помощи быстрого фотодиода и осциллографа LeCroy WavePro 7Zi-A. Спектр генерации измерялся с помощью анализатора спектров Yokogawa AQ6370. Анализ выходной поляризации излучения производился с помощью поляриметра ThorLabs, TXP PAX5720IR2-T.

Стоит отметить, что в режиме свободной генерации (т.е. в отсутствии модуляции усиления) временная динамика интенсивности состояла из нерегулярных импульсов, а спектр генерации – из неста-

бильных узкополосных пиков вследствие конкуренции большого количества продольных мод.

При некоторых параметрах модуляции накачивающего излучения можно было получить генерацию регулярных импульсов с практически одинаковой амплитудой. Например, при рабочих параметрах модуляции – частоте модуляции тока лазерного диода 50 кГц с амплитудой от 0 до 4,4 А (динамика интенсивности накачки представлена на рис. 3) – была получена генерация регулярных импульсов (рис. 4, *а*). Радиочастотный спектр при этом состоит из множества узких пиков, отстоящих друг от друга на частоту модуляции (рис. 4, *б*). Высокое значение отношения сигнал – шум (≈ 40 дБ) и малая ширина каждой линии (≈ 30 Гц) свидетельствуют о высокой степени регулярности импульсов. Каждый импульс имеет колоколообразную

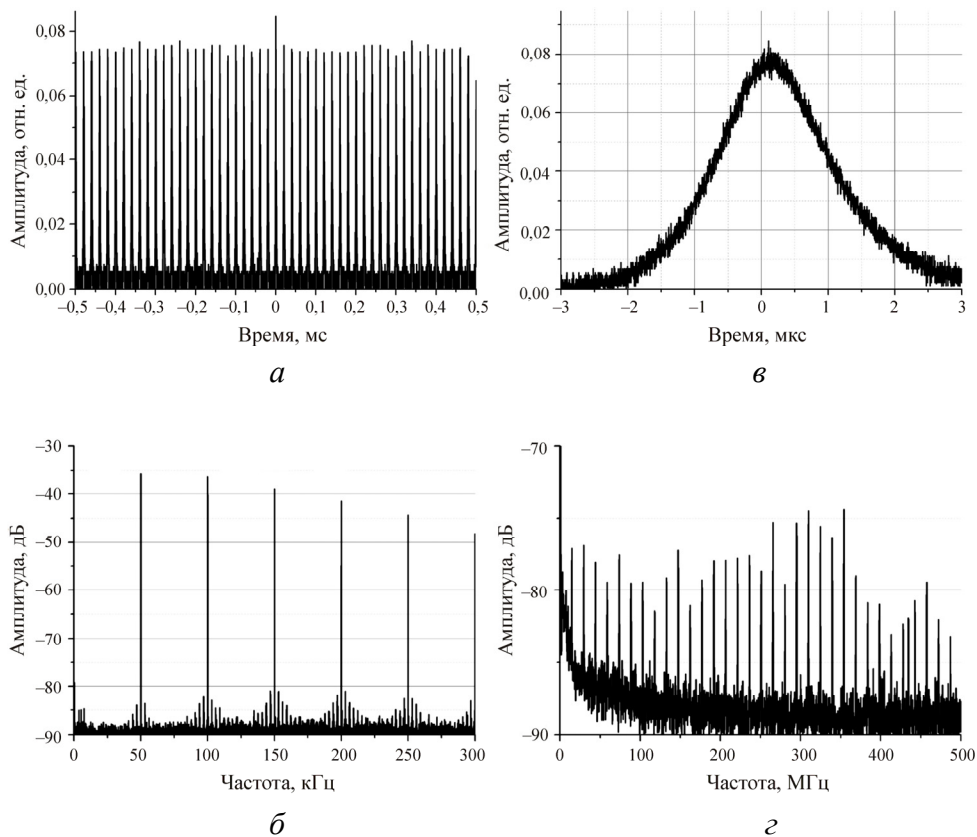


Рис. 4. Динамика интенсивности сигнала лазера (*а*) и соответствующий радиочастотный спектр (*б*), динамика интенсивности на масштабе одного импульса (*в*) и соответствующий радиочастотный спектр (*г*)

форму с длительностью порядка 2 мкс (рис. 4, в). Длительность импульсов практически не зависела от частоты модуляции. Анализ радиочастотного спектра на высоких частотах показал, что генерация состоит из множества продольных мод резонатора (рис. 4, г). Из-за большого количества мод и случайных соотношений между фазами мод импульс представляет собой квазинепрерывный сигнал с медленной амплитудной огибающей.

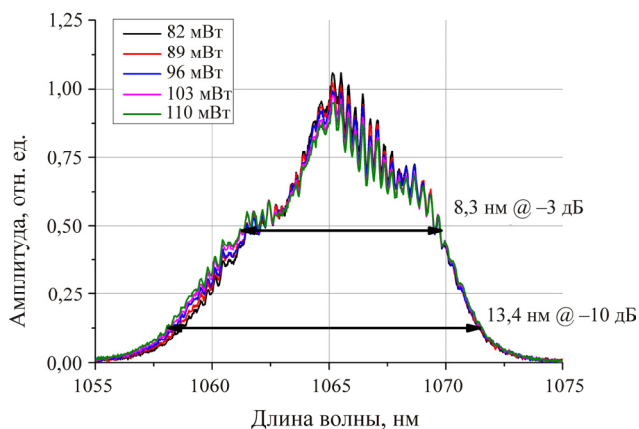


Рис. 5. Нормированные спектры генерации лазера при различных средних выходных мощностях

Важной особенностью реализованного лазера стало достаточно большое значение ширины спектра генерации. Оптический спектр данного лазера расположен в диапазоне 1055–1075 нм (рис. 5). Ширина составила порядка 8,3 и 13,4 нм по уровню -3 и -10 дБ соответственно. На рис. 5 показаны нормированные спектры генерации при различных выходных мощностях. Можно заметить, что форма практически не зависит от средней мощности в рабочей области параметров. Кроме того, форма спектра была стабильной во времени и воспроизводилась. Можно также увидеть небольшую модуляцию в спектре с периодом порядка 0,3 нм (≈ 100 ГГц). Такая модуляция соответствует спектральному селектору типа Фабри–Перо с базой порядка 1 мм. Предполагается, что модуляция может быть следствием поляризационных эффектов. Действительно, несмотря на то что лазер был изготовлен на основе волокон с поддержкой линейного состояния поляризации, измеренная степень поляризации составила всего $\approx 7\%$. При этом состояние поляри-

зации поляризованной составляющей имеет линейный характер. Это свидетельствует о том, что в лазере может происходить частичная поляризационная селекция на некоторых элементах лазера: одна поляризационная мода имеет несколько большие потери, чем ортогональная.

Выходная мощность лазера зависит от параметров модуляции: чем больше частота повторения, тем выше мощность. На рис. 6 приведена зависимость выходной мощности от средней мощности накачки при рабочих значениях модуляции. На графике можно увидеть, что порог генерации составляет порядка 350 мВт, а дифференциальная эффективность – более 20 %.

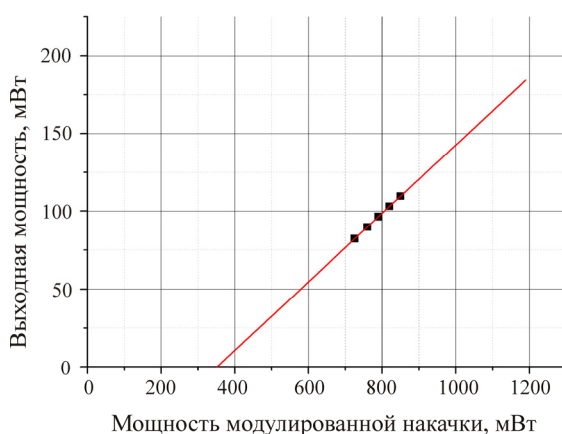


Рис. 6. Зависимость средней выходной мощности генерации лазера от средней мощности накачки

Подобный режим можно было получить в ограниченной области значений параметров накачивающего излучения. При неоптимальных параметрах модуляции режим исчезает, сигнал становится непериодичным, амплитуда импульсов и спектр – хаотичными. Предполагается, что оптимальная частота модуляции должна быть вблизи частоты релаксационных осцилляций [14]. Режим удалось наблюдать в диапазоне от 2,1 до 2,6 А среднего тока накачки, с амплитудой модуляции от 1,5 до 3 А, частотой модуляции от 30 до 60 кГц. При этом значение частоты на нижней границе возрастало при увеличении тока накачки.

Таким образом, в ходе работы был собран и исследован волоконный иттербиевый лазер с модуляцией усиления. Отличительной особенностью источника стал воспроизводимый широкополосный спектр генерации с шириной порядка 13 нм по уровню –10 дБ. Анализ радио-

частотного спектра показал, что генерация состоит из множества продольных мод, что свидетельствует о лазерном характере генерации. Этот факт принципиально отличает реализованный источник от источника усиленной спонтанной эмиссии. При этом относительные фазы между продольными модами не являются постоянными, что принципиально отличает источник от генератора суперконтинуума. Последний факт подтверждается тем, что результат сложения множества мод представляет собой квазинепрерывный сигнал с медленной амплитудной огибающей.

Подобный спектр удалось получить с помощью модуляции усиления сигнала. В этом случае импульсы являются достаточно регулярными, о чем свидетельствует малая ширина пиков в радиочастотном спектре. Оптимальная частота модуляции, исходя из общих соображений, должна быть согласована с частотой релаксационных осцилляций [14]. Результаты свидетельствуют о том, что при такой частоте модуляции конкуренция мод не успевает развиться и в генерацию одновременно выходит множество продольных мод. При большом количестве мод эффектом пространственного выжигания дыр в инверсии населенности можно пренебречь. С другой стороны, спектр генерации существенно уже, чем спектр люминесценции в иттербии. Это говорит о том, что существует иной механизм, ограничивающий ширину спектра генерации, который может быть связан со спектральными свойствами потерь или усиления.

Поскольку в работе были применены достаточно широкополосные зеркала, то, вероятнее всего, механизм спектральной селекции связан с характером усиления в иттербии. Подобный эффект селекции наблюдался в лазере на основе вынужденного комбинационного рассеяния света со случайной распределенной обратной связью [16]. Для установления механизма спектральной селекции требуются дополнительные исследования. На данный момент времени ширина спектра полученной генерации меньше, чем у рассмотренных во введении источников. Ожидается, что установление механизмов формирования спектра в комплексе с подбором соответствующих характеристик потерь в резонаторе (например, см. работу [17]) помогут существенно увеличить значение ширины спектра до десятков нанометров.

Другой важной особенностью реализованного источника являются наличие резонатора и импульсный характер генерации, что позволя-

ет получать достаточно высокие выходные мощности. В частотности, пиковая мощность широкополосного источника составила более 1 Вт. Высокие значения пиковой мощности в комплексе с детектированием, синхронизованным с модуляцией накачки, позволяют производить высокочувствительные измерения.

Ожидается, что разработанный источник излучения может быть применен в схемах низкокогерентной интерферометрии или для характеристики спектральных свойств элементов. В частности, полученная ширина спектра генерации соответствует требованиям, предъявляемым к ширине спектров источников ИК-излучения волоконно-оптических гироскопов [18], и близка к результатам, полученным в работе [19]. Однако для практического применения требуется количественно исследовать вопрос временной стабильности разработанного источника.

Экспериментальная работа частично была выполнена на оборудовании центра коллективного пользования «Спектроскопия и оптика» при Институте автоматики и электрометрии СО РАН. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда. Работа И.А. Лобача произведена при частичной финансовой поддержке Комплексной программы УрО РАН № 15-10-6-25.

Список литературы

1. Optical coherence tomography – principles and applications / A.F. Fercher [et al.] // Rep. Prog. Phys. – 2003. – № 66. – P. 239.
2. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. – Artech House Publishers, 2014.
3. Brinkmeyer E., Waterholter T. Fiber optic CW doppler lidar using a synthetic broadband source // Proc. SPIE 8894. Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IX. – 2013. – P. 889402.
4. Cusano A., Cutolo A., Albert J. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. – Bentham Science Publisher, 2011.
5. Широкополосный источник излучения на основе квантоворазмерных суперлюминесцентных диодов для оптической когерентной томографии высокого разрешения / Д.С. Адлер, Т.Х. Ко, А.К. Конорев, Д.С. Мамедов, В.В. Прохоров, Д.Д. Фуджимото, С.Д. Якубович // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 10. – С. 915–918.

6. Широкополосный источник излучения на основе иттербиевого волоконного световода с распределенной по длине накачкой / Д.А. Грух, В.А. Богатырев, А.А. Сысолятин, В.М. Парамонов, А.С. Курков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2004. – № 34 (3). – С. 247–248.

7. Generation of broadband noise-like pulse from Yb-doped fiber laser ring cavity / M. Suzuki, R.A. Ganeev, S. Yoneya, H. Kuroda // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40. – P. 804–807.

8. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // УФН. – 2006. – № 176. – С. 623–649.

9. Wang P., Sahu J.K., Clarkson W.A. 110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with $M^2 = 1,6$ // Opt. Lett. – 2006. – № 31. – P. 3116–3118.

10. High power narrow-band fiber-based ASE source / O. Schmidt, M. Rekas, C. Wirth, J. Rothhardt, S. Rhein, A. Kliner, M. Strecker, T. Schreiber, J. Limpert, R. Eberhardt, A. Tünnermann // Opt. Express. – 2011. – № 19. – P. 4421–4427.

11. Дробышев Р.В., Лобач И.А., Каблуков С.И. Волоконный иттербиевый лазер с самосканированием частоты на основе волокна с увеличенной площадью поля моды // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 4. – С. 413–426.

12. Multiwavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating an SOA-based phase modulator / J. Yao, J. Yao, Z. Deng, J. Liu // IEEE Photonics Technology Letters. – 2005. – Vol. 17, № 4. – P. 756–758.

13. Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber / A. Zhang, H. Liu, M.S. Demokan, H.Y. Tam // IEEE Photonics Technology Letters. – 2005. – Vol. 17, № 12. – P. 2535–2537.

14. The all-fiber cladding-pumped Yb-doped gain-switched laser / C. Larsen, K.P. Hansen, K.E. Mattsson, O. Bang // Opt. Express. – 2014. – № 22. – P. 1490–1499.

15. Терентьев В.С., Симонов В.А. Волоконный отражательный интерферометр на основе диэлектрической дифракционной структуры для селекции мод волоконного лазера // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 3. – С. 321–330.

16. High-order random Raman lasing in a PM fiber with ultimate efficiency and narrow bandwidth / S.A. Babin [et al.] // *Sci. Rep.* – 2016. – № 6. – P. 22625. DOI: 10.1038/srep22625

17. Harumoto M., Shigehara M., Suganuma H. Gain-flattening filter using long-period fiber gratings // *J. Lightwave Technol.* – 2002. – № 20. – P. 1027.

18. Characteristics of Erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications / P.F. Wysocki, M.J.F. Digonnet, B.Y. Kim, H.J. Shaw // *Journal of Lightwave Technology.* – 1994. – Vol. 12, № 3. – P. 550–567.

19. Широкополосный волоконный источник инфракрасного излучения на основе высоколегированного $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ композитного оптического волокна с накачкой в оболочку / Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.А. Камынин, А.А. Поносова, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, В.Б. Цветков // *Прикладная фотоника.* – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 146–157.

References

1. A.F. Fercher [et al.]. “Optical coherence tomography - principles and applications”, *Rep. Prog. Phys.* 66 239 (2003).

2. H.C Lefevre, “The Fiber-Optic Gyroscope” (Artech House Publishers, 2014).

3. E. Brinkmeyer, T. Waterholter, “Fiber optic CW doppler lidar using a synthetic broadband source”, *Proc. SPIE 8894, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing IX*, 889402 (2013).

4. A. Cusano, A. Cutolo, J. Albert, “Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation” (Bentham Science Publisher, 2011).

5. D.S. Adler, T.H. Ko, A.K. Konorev, D.S. Mamedov, V.V. Prohorov, D.D. Fudzhimoto, S.D. Jakubovich, “Shirokopolosnyj istochnik izlucheniya na osnove kvantovorazmernih superljuminescentnyh diodov dlja opticheskoy kogerentnoj tomografii vysokogo razresheniya”, *Kvantovaja elektronika*, 34:10, 915–918 (2004).

6. D.A. Gruh, V.A. Bogatyrev, A.A. Sysoljatin, V.M. Paramonov, A.S. Kurkov, E.M. Dianov, “Shirokopolosnyj istochnik izlucheniya na os-

nove itterbievogo volokonного svetovoda s raspredelennoj po dline nakhachkoj", *Kvantovaja jelektronika*, 34 (3), 247–248 (2004).

7. M. Suzuki, R.A. Ganeev, S. Yoneya, and H. Kuroda, "Generation of broadband noise-like pulse from Yb-doped fiber laser ring cavity," *Opt. Lett.* 40, 804-807 (2015).

8. A.M. Zheltikov, "Da budet belyj svet: generacija superkontinuuma sverhkorotkimi lazernymi impul'sami", *UFN* 176 623–649 (2006).

9. P. Wang, J.K. Sahu, W.A. Clarkson, "110 W double-ended ytterbium-doped fiber superfluorescent source with M²=1.6" *Opt. Lett.* 31, 3116-3118 (2006).

10. O. Schmidt, M. Rekas, C. Wirth, J. Rothhardt, S. Rhein, A. Kliner, M. Strecker, T. Schreiber, J. Limpert, R. Eberhardt, and A. Tünnermann, "High power narrow-band fiber-based ASE source" *Opt. Express* 19, 4421-4427 (2011).

11. R.V. Drobyshev, I.A. Lobach, S.I. Kablukov "Volokonnyj itterbievyj lazer s samoskanirovaniem chastoty na osnove volokna s uvelichennoj ploshhad'ju polja mody", *Prikladnaja fotonika*, t.3, №4, 413-426 (2016).

12. J. Yao, J. Yao, Z. Deng and J. Liu, "Multiwavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating an SOA-based phase Modulator", in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 4, pp. 756-758, (2005).

13. A. Zhang, H. Liu, M.S. Demokan and H.Y. Tam, "Stable and broad bandwidth multiwavelength fiber ring laser incorporating a highly nonlinear photonic crystal fiber", in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 12, pp. 2535-2537, Dec. 2005.

14. C. Larsen, K.P. Hansen, K.E. Mattsson, and O. Bang, "The all-fiber cladding-pumped Yb-doped gain-switched laser" *Opt. Express* 22, 1490-1499 (2014).

15. V.S. Terent'ev, V.A. Simonov, "Volokonnyj otrazhatel'nyj interferometr na osnove dijelektricheskoy difrakcionnoj struktury dlja selekcii mod volokonного lazera", *Prikladnaja fotonika*, t.3, №3, 321-330 (2016).

16. S.A. Babin et al. High-order random Raman lasing in a PM fiber with ultimate efficiency and narrow bandwidth. *Sci. Rep.* 6, 22625; doi: 10.1038/srep22625 (2016).

17. M. Harumoto, M. Shigehara, and H. Suganuma, "Gain-Flattening Filter Using Long-PeriodFiber Gratings" *J. Lightwave Technol.* 20, 1027 (2002).

18. P.F. Wysocki, M.J.F. Digonnet, B.Y. Kim, H.J. Shaw, “Characteristics of Erbium-doped superfluorescent fiber sources for interferometric sensor applications”, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 12, № 3. – P. 550–567. (1994).

19. B.I. Galagan, B.I. Denker, O.N. Egorova, V.A. Kamynin A.A. Ponosova, S.E. Sverchkov, S.L. Semenov, V.B. Cvetkov “Shirokopolosnyj volokonnyj istochnik infrakrasnogo izlucheniya na osnove vysokolegirovanogo Er³⁺/Yb³⁺ kompozitnogo opticheskogo volokna s nakachkoj v obolochku”, *Prikladnaja fotonika* T. 3, № 2 (2016), pp. 146-157.

Получено 10.04.2017

**ИТОГИ 12-Й МЕЖДУНАРОДНОЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ
ВЫСТАВКИ ЛАЗЕРНОЙ, ОПТИЧЕСКОЙ
И ОПТОЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
«ФОТОНИКА. МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ – 2017»**

С 28 февраля по 3 марта 2017 года в Центральном выставочном комплексе «Экспоцентр» прошла 12-я Международная специализированная выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2017». Она была организована АО «Экспоцентр» совместно с Лазерной ассоциацией при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь, Европейского оптического общества, Европейского индустриального консорциума по фотонике (EPIC) и проходила под патронатом Торгово-промышленной палаты Российской Федерации.

События выставки вызвали огромный интерес в профессиональном сообществе и на государственном уровне.

Министр промышленности и торговли РФ Денис Мантуров:

– Фотоника является одним из высокоэффективных направлений инновационного развития мировой экономики. Темпы и масштабы освоения лазерно-оптических технологий существенно определяют конкурентоспособность обрабатывающей промышленности. Оптоэлектроника стала базой для систем связи и информатики. Технологии фотоники открывают принципиально новые возможности в медицине, сельском хозяйстве и других самых разных областях деятельности. За 12 лет проведения выставка стала ведущим отраслевым форумом. Ее участники свидетельствуют о замечательных достижениях российских ученых и их творческом потенциале.

В торжественной церемонии открытия выставки приняли участие вице-президент Торгово-промышленной палаты РФ Дмитрий Курочкин, заместитель директора Департамента промышленности обычных

вооружений, боеприпасов и спецхимии Минпромторга РФ Дмитрий Капранов, заместитель генерального директора АО «Экспоцентр» Михаил Толкачев, президент Лазерной ассоциации Иван Ковш, президент Лазерной ассоциации провинции Хубэй (КНР) Чжу Сяо и другие официальные лица.

Дмитрий Капранов:

– Данная выставка, несмотря на экономические потрясения на протяжении последних лет, демонстрирует устойчивую положительную динамику по количеству экспонентов, посетителей и занимаемым площадям. Сама выставка и ее насыщенная деловая программа являются ярким подтверждением того, что фотоника у нас развивается благодаря прежде всего участникам отрасли, Лазерной ассоциации, техплатформе «Фотоника». Потенциал у отрасли есть. И данная выставка является важнейшим вкладом в его реализацию.

Участие в выставке ведущих научно-исследовательских центров, производственных предприятий России и зарубежных стран обеспечивает высокий статус главного отраслевого события. Для экспонентов она стала уникальной площадкой для демонстрации широкой аудитории новейших разработок, поиска поставщиков и заключения контрактов.

Иван Ковш:

– С нынешней замечательной выставки начинаются дни фотоники в Москве. Я очень рад ее объективному росту, что говорит о развитии фотоники в стране. Фотоника – стратегически важное направление, и выставка это доказывает постоянным появлением на ее стендах новой продукции. Данная выставка – это рабочая площадка, дающая возможность экспонентам получать новые контакты, заказы, интересные предложения по сотрудничеству, добиваться коммерческого успеха, а профессиональные посетители получают здесь новые идеи, побуждающие использовать увиденное на стендах в своей производственной деятельности.

В выставке 2017 года приняли участие 170 компаний из 13 стран. Национальные экспозиции представили Германия и Китай. Премьерой в этом году стало участие Армении.

На площади свыше 6500 м² была сформирована насыщенная новыми разработками экспозиция. Выставку посетили более 8000 человек.

В этом году достижения нашей страны представили холдинги «Швабе» и «Росэлектроника» госкорпорации «Ростех», ведущие отраслевые предприятия и научные центры (НПП «Инжект», ЛОМО, НПК «СПП», ПНППК, ЦТСС, НТО «ИРЭ-Полюс», ФТИ РАН, ИТМО, МГТУ, ВНИИОФИ и т.д.), десятки широко известных малых предприятий («Авеста-проект», «Булат», «Лазерный центр», «Лазеры и аппаратура», «НЦВО – Фотоника», «Макрооптика», «Электроника», «Т8» и др.). Были также широко представлены разработки белорусских компаний: «Солар ЛС», «Лотис ТИИ», «Изовак», «ЭссентОптикс», СЗОС и др.

Кроме того, свою продукцию на выставке продемонстрировали такие известные зарубежные компании, как Hamamatsu, Optotech Optikmaschinen GmbH, Schott AG, Trumpf Laser- und Systemtechnik GmbH, Ekspla, Infratec, Oхара и др., а также LOT-Quantum Design, Unioriental Optics, которые впервые приняли участие в выставке.

В этом году экспозиция выставки стала еще разнообразнее. Посетители ознакомились с оригинальной аппаратурой, комплектующими изделиями, лазерными источниками излучения, оптоволоконной техникой, лазерным оборудованием для резки, сварки, маркировки и других технологий обработки материалов, оптоэлектроникой, нанофотоникой, биомедицинским оборудованием на основе фотонных технологий, лазерно-оптической аппаратурой для обеспечения безопасности.

Участники выставки продемонстрировали дисплеи, оборудование для световых шоу, аппаратуру и оборудование для научных исследований, оборудование для сервиса лазерно-оптической аппаратуры, лазерные технологии в рекламе и производстве сувениров, информационное обеспечение.

Интересные экспозиции представили Российская академия наук, инновационные центры, центры трансфера технологий, а также стенды по подготовке кадров.

Деловую программу выставки открыло совместное заседание научно-технического совета лазерной ассоциации, секретариата техплатформы РФ «Фотоника» и совета учредителей евразийской техплатформы «Фотоника».

Представители предприятий, внедряющих лазерно-оптические технологии, профильных российских вузов и других научных организаций обсуждали, как механизм техплатформы может использоваться для ускорения процесса широкого практического освоения технологий фотоники в России и странах ЕАЭС.

Президент Лазерной ассоциации Иван Ковш:

– Главная цель фотоники – способствовать развитию экономики. Актуальным остается вопрос освоения технологий фотоники в реальном секторе. В числе факторов, препятствующих этому в странах ЕАЭС, являются отсутствие у предприятий ресурсов на модернизацию и создание современного производства, слабая доступность кредитов, отсутствие господдержки в освоении новой техники.

Президент ассоциации подчеркнул значимость проводимой в «Экспоцентре» международной специализированной выставки «Фотоника. Мир лазеров и оптики» для популяризации и продвижения продукции и разработок российских предприятий.

Работа Лазерной ассоциации и техплатформы РФ «Фотоника» направлена на преодоление трудностей в продвижении технологий фотоники. Участники заседания обменялись опытом практического использования лазерно-оптических технологий и обсудили пути активизации их внедрения*.

Центральным событием деловой программы выставки стал VI Конгресс технологической платформы «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии – фотоника». Участники состоявшихся двух пленарных заседаний и 14 научно-практических конференций обсудили проблемы и перспективы развития фотоники в стране.

Представитель Минпромторга РФ Дмитрий Капранов посвятил свое выступление стратегической программе в области фотоники и ее применению на 2017–2025 гг.

* Более подробная информация о заседании представлена на сайте www.photonics-expo.ru.

О ходе реализации Межведомственной координационной программы исследований и разработок в области фотоники на 2017–2020 гг. рассказал начальник отдела Департамента науки и технологий Министерства образования и науки РФ Андрей Лышенко.

Генеральный директор ЦНИИ «Циклон» Виктор Тарасов выступил с презентацией на тему «Современные системы ночного видения». Тему современных полупроводниковых лазеров и их перспективного технологического применения раскрыл генеральный директор ФГУП «НПП «ИНЖЕКТ»» Геворк Микаелян.

О возможностях и практической реализации терагерцовых технологий рассказал профессор МГУ Александр Шкуринов. Современное состояние работ по твердотельным лазерным генераторам и усилителям фемтосекундных импульсов осветил профессор БГУ Николай Кулешов. О лазерном микро- и наноструктурировании для фотоники и биомедицины рассказал сотрудник ИФТ Олег Минаев.

На тематических конференциях VI Конгресса техплатформы «Фотоника» было представлено более 120 докладов.

Опыт и перспективы совместных работ по фотонике и применению лазерных технологий обсудили участники российско-китайского семинара.

Иван Кови:

– Соглашение о сотрудничестве между лазерными ассоциациями России и Китая было подписано в 2006 г. Оно развивается вполне успешно: осуществляются регулярный обмен делегациями, взаимные поездки, каждый год появляются совместные проекты.

Новые возможности взаимодействия с китайскими коллегами президент Лазерной ассоциации связывает с активизацией работ по фотонике в рамках БРИКС.

Профессор Чжу Сяо, президент Лазерной ассоциации провинции Хубэй, оценил высокий уровень организации и проведения выставки в этом году. По его мнению, она продемонстрировала существенный прогресс российской лазерной отрасли, представила много новых участников, что, с его точки зрения, открывает большие возможности для российско-китайского сотрудничества.

Чжу Сяо:

– Нужно искать новое применение лазерных технологий и совместными усилиями продвигать их. Конечная цель нашей работы в рамках БРИКС – создание системной лазерной отрасли, охватывающей полный цикл производства, сервиса и применения лазерных технологий. Началом такой работы могло бы стать сотрудничество России, Китая и Индии, направленное на освоение индийского рынка и развитие лазерных технологий в этой стране.

Руководители ведущих предприятий Китая, представители российского и китайского бизнеса и науки обсудили приоритетные для обеих сторон направления сотрудничества, возможности подготовки и продвижения совместных проектов.

В рамках выставки прошел круглый стол «Поддержка малого предпринимательства в сфере высоких технологий». Фотоникой в России преимущественно занимаются малые предприятия, но они не имеют больших возможностей для выхода на международный рынок. По мнению выступающих, у многих российских инноваторов есть перспективы выхода на внешние рынки.

На круглом столе речь также шла о привлечении молодых специалистов. Многие учебные организации не могут позволить приобрести необходимое современное оборудование. Не имея возможности реализовать свои планы и проекты на родине, молодые специалисты вынуждены принимать участие в иностранных проектах. Правительство Москвы принимает меры по стимулированию высокотехнологичных предприятий: субсидирование, вручение грантов и премий молодым ученым.

В мероприятиях деловой программы выставки приняли участие представители бизнеса и государственных органов, разработчики лазерно-оптической техники и авторы инновационных разработок.

На выставке были подведены итоги традиционного конкурса Лазерной ассоциации на лучшую отечественную разработку в области лазерной аппаратуры и лазерно-оптических технологий, а также впервые проведенного конкурса на лучшую дипломную (выпускную) работу в области лазерной техники и ее применения.

В этом году победителями в различных номинациях стали ООО «НПП “Инжект”» (Саратов), ООО «Федал» (Санкт-Петербург), ООО «Технологи» (Оренбург), ЗАО «Региональный центр лазерных технологий» (Екатеринбург), АО «ЦТСС» (Санкт-Петербург), АО «НИИ “Полюс” им. М.Ф. Стельмаха» (Москва), ООО «Лазервариоракурс» (Рязань), Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск), ООО «ИП “НЦВО-Фотоника”», АО «НИИТеплоприбор» (Москва), Институт физики твердого тела РАН (Черноголовка).

В конкурсе выпускных работ лауреатами стали студенты Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Томского государственного университета и Московского государственного университета геодезии и картографии. Всем лауреатам были вручены дипломы и памятные знаки.

Интересная экспозиция и все события деловой программы дали четкое понимание процессов, происходящих в отрасли. Положительные отзывы экспонентов, посетителей и гостей выставки стали свидетельством того, что выставка прошла успешно. С отзывами участников можно ознакомиться на сайте www.photonics-expo.ru.

Выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики» представлена в социальных сетях «ВКонтакте» и Facebook.

Следующая выставка «Фотоника. Мир лазеров и оптики – 2018» пройдет с 27 февраля по 2 марта 2018 года в ЦВК «Экспоцентр».

Пресс-служба АО «Экспоцентр»

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Власов Александр Анатольевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: vlasov@iae.nsk.su

Aleksandr A. Vlasov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: vlasov@iae.nsk.su

Акулов Владимир Александрович

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук; директор, ООО «Инверсия – Файбер», Новосибирск, Россия, e-mail: akulov.v84@gmail.com

Vladimir A. Akulov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Head, Inversion Fiber Co. Ltd., Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: akulov.v84@gmail.com

Жлуктова Ирина Вадимовна

магистр кафедры «Оптические и биотехнические системы и технологии», Московский технологический университет (МГУПИ); инженер лаборатории активных сред твердотельных лазеров, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: iv.zhluktova@gmail.com

Irina V. Zhluktova

Master, Moscow Technological University; Engineer of Laboratory of Active Media for Solid-State Lasers, General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: iv.zhluktova@gmail.com

Титаренко Николай Юрьевич

бакалавр кафедры № 69 «Лазерный термоядерный синтез», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, e-mail: titarenknik@gmail.com

Nikolai Iu. Titarenko

Student, National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation, e-mail: titarenknik@gmail.com

Тавлеев Алексей Александрович

бакалавр кафедры № 69 «Лазерный термоядерный синтез», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, e-mail: alaltav@gmail.com

Aleksei A. Tavleev

Student, National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation, e-mail: alaltav@gmail.com

Камынин Владимир Александрович

научный сотрудник лаборатории активных сред твердотельных лазеров, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: kamyninva@gmail.com

Vladimir A. Kamynin

Research Fellow of Laboratory of Active Media for Solid-State Lasers, A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: kamyninva@gmail.com

Цветков Владимир Борисович

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия, e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

Vladimir B. Tsvetkov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, A.M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: tsvetkov@lsk.gpi.ru

Достовалов Александр Владимирович

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории волоконной оптики, Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: dostovalov@iae.nsk.su

Aleksandr V. Dostovalov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Research Fellow of Fiber Optics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: dostovalov@iae.nsk.su

Терентьев Вадим Станиславович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: terentyev@iae.nsk.su

Vadim S. Terent'ev

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: terentyev@iae.nsk.su

Бессмельцев Виктор Павлович

кандидат технических наук, заведующий лабораторией лазерной графики, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Victor P. Bessmel'tsev

Ph.D. in Engineering Sciences, Head of the Laser Graphics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: bessmelt@iae.nsk.su

Ременникова Мария Владимировна

младший научный сотрудник, Пермский научный центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия, e-mail: rmvnpnpk@gmail.com

Mariia V. Remennikova

Junior Research Fellow, Perm Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: rmvnpnpk@gmail.com

Урядова Вероника Константиновна

студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Veronika K. Uriadova

Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Лушникова Мария Константиновна

студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Mariia K. Lushnikova

Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Конин Юрий Александрович

младший научный сотрудник, Пермский научный центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия, e-mail: yuri-konin@yandex.ru

Iurii A. Konin

Junior Research Fellow, Perm Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: yuri-konin@yandex.ru

Гаранин Андрей Иванович

младший научный сотрудник, Пермский научный центр Уральского отделения Российской академии наук; аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: kigaranin@yandex.ru

Andrei I. Garanin

Junior Research Fellow, Perm Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: kigaranin@yandex.ru

Дробышев Роман Владимирович

магистрант, Новосибирский государственный университет; инженер лаборатории волоконной оптики, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: r.drobyshev@mail.ru

Roman V. Drobyshev

Master Student, Novosibirsk State University; Engineer of Fiber Optics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: r.drobyshev@mail.ru

Тимиртдинов Юрий Анатольевич

ведущий инженер-электроник лаборатории волоконной оптики, Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: timirtdinov@ngs.ru

Iurii A. Timirtdinov

Senior Electronics Engineer of Fiber Optics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: timirtdinov@ngs.ru

Иван Александрович Лобач

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории волоконной оптики, Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск; заведующий лабораторией фотоники, Пермский научный центр Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия, e-mail: ivan.lobach@gmail.com

Ivan A. Lobach

Ph.D. in Fisical and Mathematical Sciences, Senior Research Fellow of Fiber Optics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk; the Head of Photonics Laboratory, Perm Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: ivan.lobach@gmail.com

Каблуков Сергей Иванович

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волоконной оптики, Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия, e-mail: kab@iae.nsk.su

Sergei I. Kablukov

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Leading Research Fellow of Fiber Optics Laboratory, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: kab@iae.nsk.su

Научное издание

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 4, № 1

Редактор и корректор *М.А. Капустина*

Выход в свет 31.03.2017. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 6,0. Тираж 10 экз. Заказ № 123/2016.
Свободная цена

Отпечатано в типографии Издательства
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.