

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, № 3

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2017

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: Д.Б. Владимирова, канд. физ.-мат. наук, доцент (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. Волынец, 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)

С.Л. Семёнов, д-р физ.-мат. наук, директор НЦВО РАН (Москва, Россия)

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

К.А. Тарабрин, директор департамента (Минпромторг России, Москва, 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 № ФС 77 - 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, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский просп., д. 29.

Тел. +7 (342) 2-198-340, e-mail: photonics.appl.jrn@gmail.com.

СОДЕРЖАНИЕ

Шестая Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО – 2017)	187
<i>В.А. Щербакова, М.В. Ременникова, Е.Е. Самылова, Ю.А. Конин, А.И. Гаранин, П.В. Карнаушкин</i> Оценка параметров оптической ловушки, созданной на конусном волокне	195
<i>Ю.Т. Ларин</i> Новые подходы к созданию полевых оптических кабелей связи	202
<i>А.Г. Андреев, В.С. Ермаков, А.В. Субботин, Д.И. Шевцов, М.К. Цибиногина, А.М. Ханов, М.К. Осипчук, И.А. Мальцев</i> Математическое моделирование волоконных световодов типа «Панда»	208
<i>В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев, А.А. Пестерев</i> Проектирование оптимального стабилизирующего регулятора в MCVD-процессе.....	212
<i>Г.Н. Вотинов, Я.Д. Токарева</i> Датчик высоких температур на основе волоконных брэгговских решеток	222
<i>А.Г. Кузнецов, Д.С. Харенко, В.А. Гонта</i> Усиление диссипативных солитонов тейперным волоконным усилителем	229
Сведения об авторах.....	237

CONTENTS

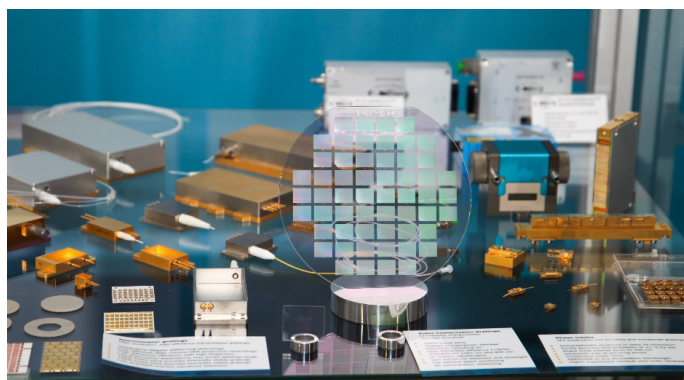
The Sixth All-Russian Conference on Fiber Optics	187
<i>V.A. Shcherbakova, M.V. Remennikova, E.E. Samylova, Iu.A. Konin, A.I. Garanin, P.V. Karnaushkin</i>	
Estimation of the parameters of an optical trap created on a conical fiber	195
<i>Iu.T. Larin</i>	
New approaches to creating field optical communication cables	202
<i>A.G. Andreev, V.S. Ermakov, A.V. Subbotin, D.I. Shevtsov, M.K. Tsibinogina, A.M. Khanov, M.K. Osipchuk, I.A. Mal'tsev</i>	
Mathematical modeling of Panda type fiber waveguides	208
<i>V.P. Pervadchuk, D.B. Vladimirova, D.N. Dektiarev, A.A. Pesterev</i>	
Designing of optimal stabilizing regulator in the MCVD process	212
<i>G.N. Votinov, Ia.D. Tokareva</i>	
High temperature sensor based on fiber Bragg gratings	222
<i>A.G. Kuznetsov, D.S. Kharenko, V.A. Gonta</i>	
Amplification of dissipative solitons with a taper fiber amplifier	229
About the authors	237

ШЕСТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ (ВКВО – 2017)

3–6 октября 2017 г. в г. Перми состоялась 6-я Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО – 2017). Предыдущие конференции проходили в 2007, 2009, 2011, 2013 и 2015 годах также в Перми. Организованная Научным центром волоконной оптики РАН (НЦВО РАН) и Пермской научно-производственной приборостроительной компанией (ПНППК) при поддержке Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) и Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ) ВКВО – 2017 стала крупным научно-техническим мероприятием, стимулирующим развитие волоконной оптики и смежных дисциплин в России. Генеральным спонсором конференции выступило ООО «ОЭС Спецпоставка», С. Петербург.

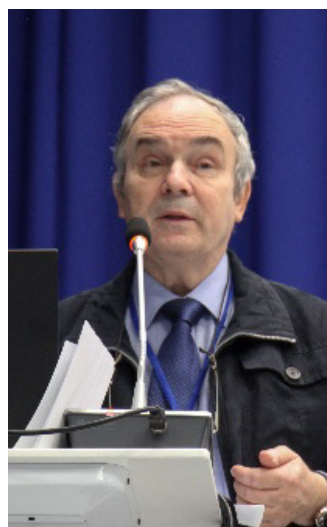
Председатель конференции – академик Евгений Михайлович Дианов, научный руководитель НЦВО РАН; председатель оргкомитета – Алексей Гурьевич Андреев, генеральный директор ОАО «ПНППК»; председатель программного комитета – директор НЦВО РАН Сергей Львович Семенов.

Основными целями конференции были обсуждение последних фундаментальных достижений и прикладных разработок в волоконной оптике и в смежных областях; обмен знаниями и опытом между сотрудниками ведущих российских исследовательских, технологических и образовательных организаций; установление контактов в сфере научных исследований и инновационной деятельности.



Рассматривались вопросы по следующим темам: волоконные световоды, волоконно-оптические кабели, волоконно-оптические линии связи, компоненты и устройства волоконной оптики, волоконные лазеры и усилители, волоконно-оптические датчики и системы измерения физических величин, радиофотоника, а также другие актуальные вопросы современной волоконной оптики и смежных областей.

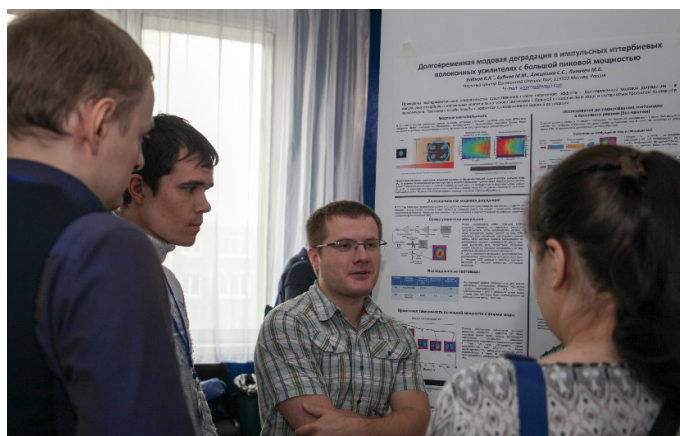
На пленарном заседании, открывающем конференцию, член-корреспондент РАН Игорь Алексеевич Буфетов в докладе «Полые волоконные световоды и источники излучения на их основе» рассказал о свойствах самого необычного вида оптического волокна – с воздушной сердцевиной, которое в перспективе способно совершить прорыв в волоконной оптике. Эта тема позже была развита и в ряде регулярных докладов. Доклады на заседаниях секций и на стендовой сессии показали общий рост уровня проводимых в России работ в области волоконной оптики. Тем не менее многими участниками



отмечались нехватка в нашей стране специалистов по данной тематике, а также недостаточная укомплектованность научных групп современным измерительным и техническим оборудованием.

В рамках конференции было заслушано 1 пленарный, 21 приглашенный и 77 регулярных устных докладов. Было проведено 2 стендовые сессии, на которых было представлено 70 стендовых докладов. Наибольшее количество докладов было представлено по теме «Волоконные лазеры и усилители» (7 приглашенных и 21 регулярный доклад). Следующими по численности выступлений были темы «Волоконные световоды и волоконно-оптические компоненты» (5 приглашенных и 21 регулярный доклад), «Волоконно-оптические системы связи и передачи информации» (6 приглашенных и 11 регулярных докладов), «Волоконно-оптические датчики» (2 приглашенных и 10 регулярных докладов) и «Радиофотоника» (1 приглашенный и 9 регулярных докладов). Наименее представительной была тема «Волоконно-оптические кабели» (5 устных докладов). Это связано с тем, что основными мероприятиями для работающих в этой области

являются специальные кабельные конференции и симпозиумы, регулярно проводимые в России. В рамках конференции также проходили дополнительные мероприятия: семинар по композиционным материалам, организованный компаниями «ПНППК» и «Инверсия-Сенсор», школа «Нелинейная фотоника» для студентов старших курсов и аспирантов под руководством С.К. Турицина, директора Астонского института технологий фотоники, работала секция презентаций производителей «Индустрия фотоники», а также проводилась выставка продукции и оборудования для фотоники.



Председатели секций отметили следующие результаты.

1. Секция «Лазеры и усилители»

- На конференции были представлены доклады по созданию первых в мире эффективных (КПД $\approx 10\%$) волоконных газовых ВКР-лазеров, работающих в среднем ИК-диапазоне на длинах волн от 2,9 до 4,4 мкм. Лазеры созданы на основе изготовленных из кварцевого стекла волоконных световодов с поллой сердцевинкой, точнее на таких световодах специальной конструкции («револьверных световодах», созданных в НЦВО РАН), с сердцевинкой, заполненной различными изотопами водорода. Средняя выходная мощность одномодового излучения на 4,4 мкм составила 200 мВт при пиковой мощности 2 кВт. Такие лазеры могут найти применение в медицине, спектроскопии, детектировании различных веществ, обороне (НЦВО РАН).

- Результаты исследований генерации ВКР-лазеров на многомодовом градиентном световоде представляют особый интерес, поскольку такие лазеры фактически являются альтернативой обычным воло-

конным лазерам на световодах с двойной оболочкой. Они позволяют многократно повышать яркость излучения, как и волоконные лазеры на редкоземельных ионах, но без редкоземельных ионов и, соответственно, без ограничений на длины волн, связанных со свойствами этих ионов (ИАиЭ СО РАН).

- В области создания новых типов волоконных лазеров и усилителей исследованы деградация оптических свойств висмутовых световодов на основе кварцевого стекла с различными легирующими добавками под действием излучения на длинах волн видимого диапазона, а также процессы восстановления свойств световода за счет последующего отжига. Данные работы позволяют получить новую информацию о висмутовых активных центрах, ответственных за усилительные свойства висмутовых световодов, а также пути реализации надежных висмутовых лазеров и усилителей, работающих в очень широком диапазоне длин волн – от 1,15 до 1,75 мкм (НЦВО РАН).

- Создаются волоконные лазеры все большей мощности. На конференции сообщалось о достижении в наносекундном одностотном режиме волоконного эрбиевого лазера рекордной пиковой мощности – 70 кВт. Такой лазер использовался, в частности, для накачки рамановского волоконного лазера, работающего в среднем ИК-диапазоне (НЦВО РАН).

- Исследование волоконных лазеров с самосканированием частоты – уникальных объектов, которые могут найти широкое применение в спектроскопии (ИАиЭ СО РАН).

- Большое количество работ по волоконным лазерам на различных типах волоконных световодов, работающих в разных импульсных режимах и использующих различные нелинейные эффекты (как теоретические, так и экспериментальные работы).

2. Секция «Волоконно-оптические системы связи и передачи информации»

- Секция стала рабочей площадкой для обсуждения текущих проблем и планов для ученых и инженеров, занимающихся широким спектром исследований – от фундаментальных вопросов оптических связи и поиска новых физических принципов передачи информации до практических разработок нового высокоскоростного и высокопроизводительного оборудования систем волоконно-оптической связи. Сложившаяся творческая обстановка способствовала ускорению внедрения новых идей и под-

ходов в производство конкретных новых изделий и усовершенствование систем связи российского производства. Высокий технический уровень российского оборудования, не уступающий уровню мировых производителей, был наглядно и аргументированно продемонстрирован в докладе «Развитие скоростных DWDM-систем связи российского производства», сделанном генеральным директором ООО «Т8» В.Н. Трещиковым.

- Новые подходы к компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических системах связи были представлены в докладе «Нелинейное преобразование Фурье в оптоволоконных линиях связи» С.К. Турицыным, представляющим Новосибирский и Астонский университеты. Сделанные им оценки говорят о возможности существенного улучшения технических характеристик систем передачи при использовании новых подходов к оптимизации параметров передатчиков и приемников, основанных на реализации новых нелинейных режимов их работы.

- Среди большого числа докладов, связанных с решением задачи компенсации нелинейных искажений в ВОЛС, следует отметить доклад «Сравнительный анализ алгоритмов компенсации нелинейных искажений в волоконно-оптических линиях передачи», подготовленный учеными из ПГУТИ (Самара) В.А. Бурдиным, А.В. Бурдиным и И.В. Григоровым, и доклад «Методы компенсации нелинейных эффектов в многомодовых линиях связи на основе динамических нейронных сетей», подготовленный сотрудниками ИВТ РАН, НГУ и Университета Астана О.С. Сидельниковым, А.А. Редюком и С. Сиглетосом.

Практические вопросы эксплуатации ВОЛС в условиях высокого уровня линейного и нелинейного шума были рассмотрены в двух работах, представленных компанией «Т8», НТЦ и МГУ: «Нелинейные искажения как нелинейный шум в когерентных волоконно-оптических линиях связи» (А.Е. Жителев и др.) и «Оценка запаса по OSNR в DWDM-линии связи по величине BER до FEC» (В.А. Конышев, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков).

- Очень важно, что в работе конференции ВКВО – 2017 принимали участие ведущие специалисты мировых научных коллективов. В секции «Волоконно-оптические системы связи и передачи информации» в этом году выступили с докладами представители ведущих мировых компаний – производителей оборудования для волоконно-оптических сетей связи: OFS, NOKIA и TE SubCom.

3. «Волоконно-оптические датчики»

Можно с уверенностью констатировать возросший научный и технический уровень разработок по актуальным направлениям при-

менения волоконно-оптических датчиков, включающих системы распределенного акустического и сейсмического мониторинга скважин и недр углеводородов, распределенного и раздельного сверхдлинного мониторинга температуры и механических напряжений оптического кабеля и конструкций, на которых они установлены, прогнозирование прочности и мониторинг конструкций из новых полимерных композитных материалов с помощью волоконных датчиков акустической эмиссии, которые можно применять взамен пьезоэлектрических преобразователей в режимах испытаний и в режиме онлайн при рабочей эксплуатации, волоконные датчики тока, состава, температуры и показателя преломления веществ с высокими метрологическими характеристиками и чувствительностью.



По существу, каждая разновидность волоконных датчиков иллюстрирует направление разработок и применения, максимально приближенного к практике. Продолжаются исследования фундаментальных основ функционирования различных волоконно-оптических датчиков физических воздействий.

- Традиционно широко представлено использование волоконных брэгговских решеток показателя преломления в одномодовых волокнах в качестве чувствительных датчиков. Обобщаются результаты исследований, и даже доказывается теорема о сравнительной чувствительности волоконных интерферометрических датчиков, которая обосновывает преимущества датчиков, в частности на волоконных интерферометрах Саньяка для разработки измерительных волоконных приборов со стабильным

нулем шкалы измерений и линейным динамическим диапазоном по отношению к измеряемым внешним воздействиям.



- Целый ряд работ по своему уровню соответствует крупным международным конференциям и даже превосходит их. Отмечено желание иностранных участников, чтобы в материалах конференции публиковались аннотации докладов на английском языке. Можно перечислить ряд российских организаций, которые представили серии докладов: ОАО «ПНППК» (Пермь), НЦВО РАН, ПНИПУ, ООО «Инверсия-Сенсор» (Пермь), ИРЭ им. В.А. Котельникова, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Самара), КНИТУ-КАИ (Казань), Новосибирский государственный университет и др.



Всего на конференции было зарегистрировано 198 участников. Можно отметить представительство научных кадров: члены-корреспонденты РАН – 4 человека, доктора наук – 23 человека, кандидаты наук – 50 человек, аспиранты – 17 человек. На заключительном заседании, посвященном итогам конференции, председатель программного комитета, директор Научного центра волоконной оптики РАН, доктор физико-математических наук С.Л. Семенов и председатель оргкомитета, генеральный директор ОАО «ПНППК» Алексей Гурьевич Андреев отметили важность проведения

национальной конференции для привлечения многочисленных отечественных специалистов с целью обмена результатами, повышения квалификации и главное – для установления новых связей между ними.

Конференция должна способствовать пониманию общего положения дел в оптико-волоконной отрасли страны. Они также выразили уверенность в продолжении регулярного проведения конференции в будущем, подчеркнув, что это одно из важнейших условий для роста данной отечественной отрасли. Одним из решений заключительного заседания конференции ВКВО – 2017 было поручение ее организаторам продолжить работу по обеспечению государственной поддержки практического развития волоконной оптики и волоконно-оптических линий связи в России, так как, несмотря на заметные достижения исследователей, наблюдается катастрофическое отставание от ведущих мировых держав в области внедрения волоконной оптики.

По материалам докладов, представленных на секциях конференции и сопутствующих семинарах, планируется опубликование ряда статей в журналах «Квантовая электроника» (№ 12, 2017 г.) и «Прикладная фотоника» (№ 3, 4, 2017 г.).

Программный и организационный комитеты ВКВО – 2017

УДК 631.373

**В.А. Щербакова², М.В. Ременникова¹, Е.Е. Самылова²,
Ю.А. Конин¹, А.И. Гаранин^{1, 2}, П.В. Карнаушкин¹**

¹Лаборатория фотоники ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ, СОЗДАННОЙ НА КОНУСНОМ ВОЛОКНЕ

Дается описание эксперимента, демонстрирующего возможность захвата частиц, взвешенных в нефти. Данный тип оптического пинцета можно использовать в научно-исследовательских лабораториях, на химических, фармакологических и других производствах для удержания и сортировки микрочастиц.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптический пинцет, оптоволоконные лазеры, конусное волокно.

**V.A. Shcherbakova², M.V. Remennikova¹, E.E. Samylova²,
Yu.A. Konin¹, A.I. Garanin^{1, 2}, P.V. Karnaushkin¹**

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

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF AN OPTICAL TRAP CREATED ON A CONICAL FIBER

The paper describes the experiment demonstrating the possibility of trapping particles suspended in oil. This type of optical tweezers can be used in scientific research laboratories of chemical, pharmacological and other industries for confinement and sorting of microparticles.

Keywords: optical fiber, optical tweezers, fiber optic lasers, cone fiber.

Введение

Оптоволоконные лазеры с каждым годом все шире внедряются в различные сферы промышленности и научной деятельности. Свойства лазерного излучения широко востребованы в медицине. Интересен

способ манипулирования клетками в автоматизированном режиме, без внедрения и с минимальными человеческими трудозатратами.

Принцип работы оптического пинцета основан на явлении самофокусировки лазерного луча и захвата частицы в поле излучения лазера. Под действием излучения микрочастицы втягиваются и удерживаются в фокусе в направлении луча света.

Свободно взвешенные микрочастицы ускоряются в направлении луча света за счет силы давления света и попадают в устойчивые потенциальные ямы [1].

Геометрически выстроить микроскопические объекты можно с помощью аксиконного наконечника оптического волокна [2]. Путем формирования нужного угла конуса посредством химического травления плавиковой кислотой достигается одиночное оптическое улавливание и связывание частиц в ближнем (а также в дальнем) поле [3].

По теореме равного распределения было установлено [4], что жесткость удержания частицы зависит от размера объекта и угла конуса аксикона. Крепче удерживаются частицы с большим размером при большем угле конуса наконечника волокна.

Нельзя исключить влияние тепловых сил [5, 6] на среду и на сами частицы под действием непрерывного излучения лазера. Это является основной проблемой существующих лазерных пинцетов.

1. Методика эксперимента

Для опытов был изготовлен макет иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1080 нм [7], схема которого изображена на рис. 1. В качестве активной среды использовалось волокно с многокомпонентной оболочкой GTWave, легированное ионами иттербия; длина активного контура составила 34 м. Накачка лазера производилась лазерным диодом с мощностью 8 Вт и центральной длиной волны 976 нм через пассивную жилу волокна GTWave. Лазерный диод был приварен к пассивной жиле со смещением для ограничения выходной оптической мощности лазера ниже порогов лучевой стойкости исследуемой среды.

К концам активной жилы были приварены брэгговские решетки с резонансной длиной волны $\lambda_{BG} = 1080$ нм, коэффициент отражения решеток R составлял 100 и 30 %. Волоконный лазер работал в непрерывном режиме, спектральная ширина лазера – 0,2 нм.

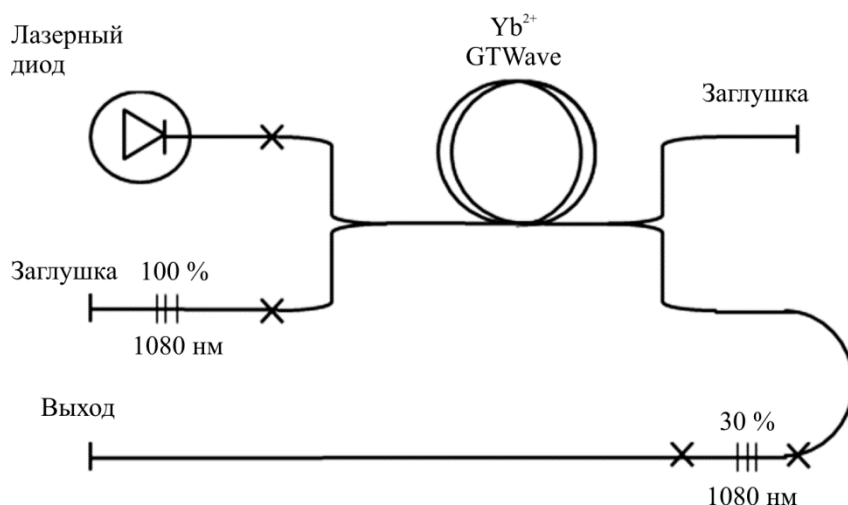


Рис. 1. Схема экспериментального иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1080 нм

Максимальная мощность излучения данного лазера с учетом встроенного аттенюатора составила 44 мВт. Величину выходной мощности можно было варьировать (рис. 2).

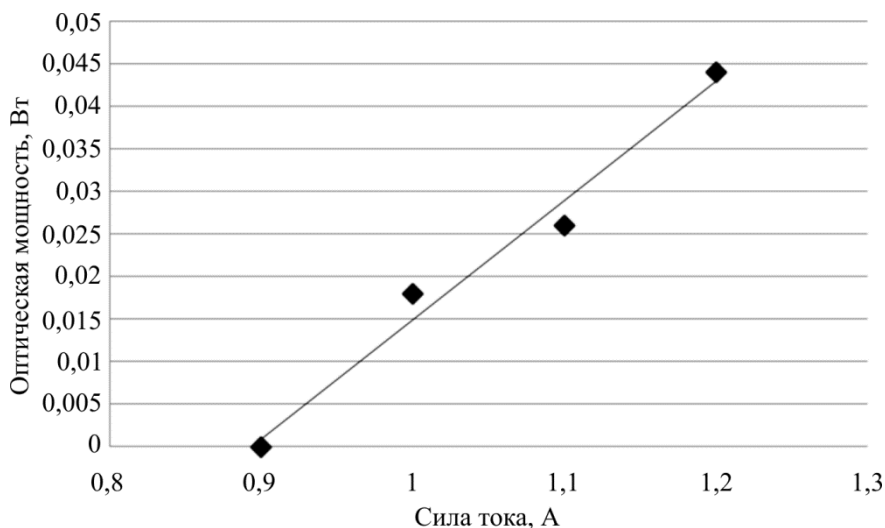


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от тока накачки лазерного диода

К выходу лазера было приварено волокно SMF 28 производства компании Corning. На выходном торце данного волокна с помощью химического травления в плавиковой кислоте был сформирован акси-

кон с углом раствора конуса 26° . Данная линза имеет фокусное расстояние не более 5 мкм и диаметр перетяжки 2 мкм в воздухе. Геометрические параметры аксикона представлены на рис. 3.

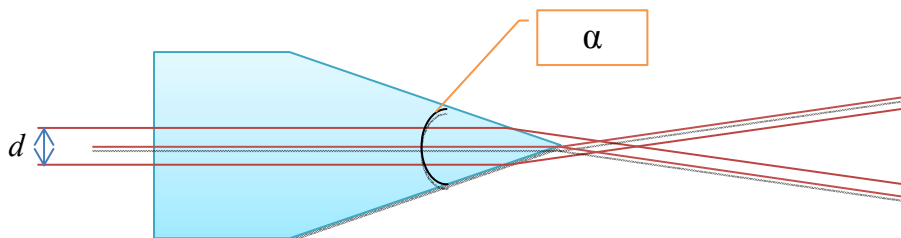


Рис. 3. Геометрические параметры аксикона:
 d – ширина пучка, равная 10 мкм; α – угол раствора конуса

В качестве исследуемой среды использовалась неочищенная нефть с месторождения Талакан, НГДУ «Сургутнефтегаз», с точки отбора УДР ДНС 1СТ (Северный Талакан), без примеси реагентов, которая была отобрана 3 марта 2015 г. Физико-химические параметры и углеводородный состав нефти Талаканского месторождения указаны в отчете [8]. Жидкость встряхивалась перед исследованием для устранения расслоения компонентов.

Образец исследуемой жидкости помещался на лабораторное стекло. Выходной конец волоконного световода с аксикомом погружался в жидкость и фиксировался малярным скотчем. Лабораторное стекло закреплялось на предметном столике микроскопа Levenhuk 320 с цифровой камерой Levenhuk D320L NG. Далее производилась фото- и видеофиксация действия лазерного излучения на исследуемую жидкость и измерялись геометрические параметры (рис. 4).

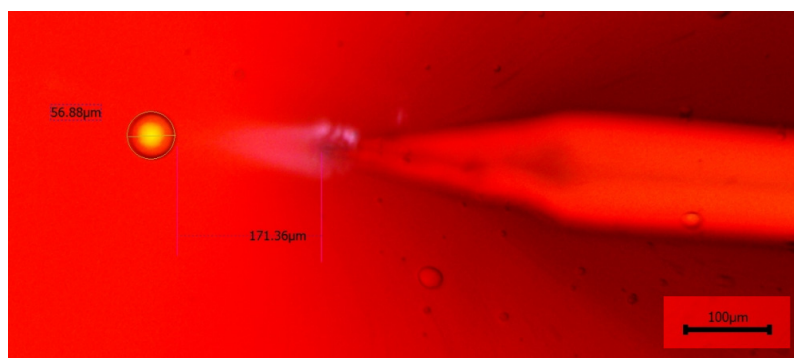


Рис. 4. Геометрические параметры частицы, захваченной в оптическую ловушку

Для количественной оценки производилось моделирование скорости втягивания частиц и силы воздействия на них со стороны лазерного излучения. Полученные данные сравнивались с экспериментальными.

2. Результаты эксперимента

В результате лазерного воздействия через аксикон на нефть был выявлен эффект захвата лазерным излучением содержащейся в нефти капли воды; масса капли составляла 0,771 мкг. Мощность лазерного излучения варьировалась от 0 до 44 мВт. Нефть из Талаканского месторождения имела плотность $\rho = 844,1 \text{ кг/м}^3$, кинематическую вязкость $\nu = 17,68 \text{ мм}^2/\text{с}$ и динамическую вязкость $\eta = 0,01492369 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Оценка предельной скорости частиц в вязкой среде производится по формуле

$$\nu = \frac{2qPr}{3\pi c\omega_0^2\eta},$$

где q – доля света, эффективно отраженного от сферы, $q = 0,062$; P – мощность излучения; c – скорость света; η – динамическая вязкость жидкости.

Соответствующая сила, действующая на частицу, рассчитывается из закона Стокса:

$$F = 6\pi\eta\nu.$$

Расчетные данные были сведены в таблицу.

Сила втягивания частиц

P , Вт	ν , мкм/с	F , нН
0	0	0
0,018	240,70	1,93
0,026	347,68	2,78
0,044	588,38	4,71

Измеренная скорость капли воды при мощности лазера 0,018 Вт составила $282,0 \pm 14,1 \text{ мкм/с}$. Сила, действующая на нее, равна $2,26 \pm 0,11 \text{ нН}$ соответственно.

Кроме того, при увеличении мощности лазерного излучения наблюдается смещение центра оптической ловушки ближе к концу аксикона (рис. 5). Экспериментальные данные представлены на рис. 6.



Рис. 5. Смещение центра оптической ловушки к концу аксикона:
а – на 172,73 мкм; б – на 11 мкм

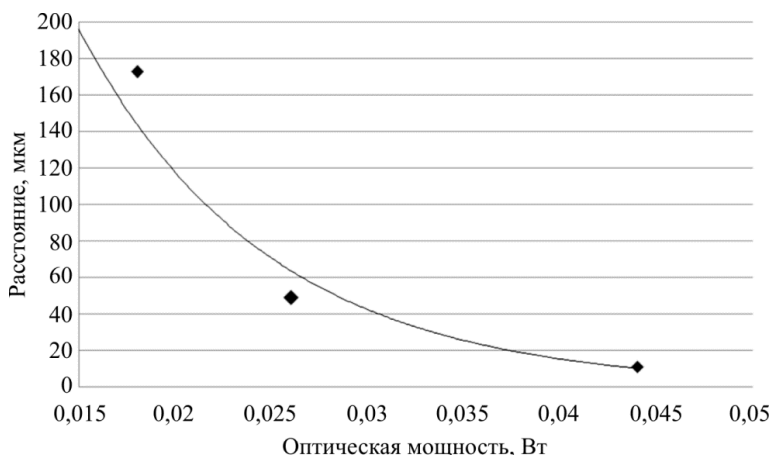


Рис. 6. Зависимость центра оптической ловушки от мощности излучения

За счет рассеяния излучения на частицах жидкости наблюдается визуализация перетяжки лазерного луча (см. рис. 5, а).

3. Обсуждение результатов

Результаты работы показывают, что оптическое волокно с конусным торцом можно использовать для создания оптического пинцета. В ходе эксперимента было произведено воздействие лазерным излучением с длиной волны 1,08 мкм на эмульсию нефти и воды.

Лазерное излучение фокусируется линзой аксиконом и создает потенциальную яму, в которую стремятся взвешенные в нефти капельки воды размером 20–60 мкм. Вокруг центра оптической ловушки возникают конвекционные потоки, в которые устремляются капельки воды. Наиболее крупные из них попадают в центр оптической ловушки и фиксируются там. Измеренная сила втягивания пинцета для мощности излучения 0,018 Вт составила $2,26 \pm 0,11$ нН. Кроме того, было обнаружено смещение центра оптической ловушки (см. рис. 5) к концу аксикона при увеличении оптической мощности. Это свидетельствует об увеличении силы втягивания. Расчетные значения приведены в таблице.

Проведенный эксперимент показал возможность захвата частиц, взвешенных в нефти. Данный тип оптического пинцета можно использовать в научно-исследовательских лабораториях, на химических, фармакологических и других производствах для удержания и сортировки микрочастиц.

Список литературы

1. Ashkin. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure // *Phys. Rev. Lett.* – 1970. – Vol. 24, № 4.
2. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Organization of micro-scale objects using a microfabricated optical fiber. – 2008. – Vol. 33, № 18.
3. Mellor C.D., Bain C.D. Array formation in evanescent waves // *Chem. Phys. Chem.* – 2006. – № 7.
4. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Single-fiber optical tweezers for cellular micro-manipulation // *Biomed J. Opt.* – 2008. – № 13. – P. 42–54.
5. Nichols E.F., Hull G.F. The Pressure Due to Radiation // *Phys. Rev.* – 1903. – Vol. 17, № 26.
6. Debye P. *Ann. Physik.* – 1909. – Vol. 30. – № 57.
7. Курков А.С. Волоконные лазеры: принципы построения и основные свойства. – М., 2012. – 184 с.
8. Захарова С.С. Химико-технологические основы переработки углеводородного сырья Якутии. – 2014.

References

1. Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, vol. 24, no. 4, pp. 156–159.
2. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Organization of microscale objects using a microfabricated optical fiber, 2008, vol. 33, no. 18.
3. Mellor C.D., Bain C.D. Array formation in evanescent waves. *Chem. Phys. Chem*, 2006, vol. 7, no. 2, pp. 329–332.
4. Mohanty S.K., Mohanty K.S., Berns M.W. Single-fiber optical tweezers for cellular micro-manipulation. *Biomed. J. Opt.* 2008, 13, pp. 42–54.
5. Nichols E.F., Hull G.F. The pressure due to radiation. *Phys. Rev*, series I, 1903, vol. 17, iss. 1, pp. 26–50.
6. Debye P. *Ann. Physik*, 1909, vol. 30, no. 57.
7. Kurkov A.S. Volokonnye lazery: printsipy postroeniia i osnovnye svoistva. Moscow, 2012, 184 p.
8. Zakharova S.S. Khimiko-tehnologicheskie osnovy pererabotki uglevodorodnogo syr'ia Iakutii. 2014.

Получено 27.09.2017

УДК 621.39

Ю.Т. Ларин

Всероссийский научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и технологический институт
кабельной промышленности (ОАО «ВНИИКП»), Москва, Россия

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ПОЛЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Представлен обзор характеристик и возможностей применения полевых оптических кабелей ОАО «ВНИИКП» и ООО «ВНИИКП-ОПТИК». Приводятся и уточняются их конструкционные особенности, описывается их функциональная классификация.

Ключевые слова: кабели связи, оптические линии, передача информации.

Iu.T. Larin

Design and Technological Institute of Cable Industry,
Moscow, Russian Federation

NEW APPROACHES TO CREATING FIELD OPTICAL COMMUNICATION CABLES

The article gives an overview of the characteristics and possibilities of using field optical cables of VNIKP and VNIKP-OPTIK. Their design features are specified and their functional classification is described.

Keywords: communication cables, optical lines, information transfer.

Основами конструирования полевых оптических кабелей можно считать ОТТ 2.1.225–92 «Кабели связи полевые оптические. Общие тактико-технические требования» и появившийся в 2010 г. ГОСТ РВ6015-003–2010 «Компоненты волоконно-оптических систем передачи информации. Кабели оптические специального назначения для военной техники. Общие технические требования». На основе этих документов были разработаны полевые кабели различного назначения (таблица).

Лидирующая роль в их создании принадлежит ОАО «ВНИИКП» и ООО «ВНИИКП-ОПТИК». Остальные разработки можно считать более или менее удачными вариантами существующих конструкций.

Полевые кабели различного назначения

№ п/п	Номер технического условия	Наименование	Разработчик
1	ТУ 16.К71. 026-88	«Кабели полевой связи»	ОАО «ВНИИКП»
2	ТУ 16.К71-298-2001 ЛУ	«Кабели связи оптические полевые неармированные многомодовые»	ОАО «ВНИИКП»
3	ТУ 1314-002-38984341-02	«Комплекты кабелей П-294»	ЗАО «ТЕХНОМАШ-ВОС»
4	ТУ 16.К71-380-2007	«Кабель оптический полевой».	ОАО «ВНИИКП»
5	ТУ 3587-005-18562069–2007	«Кабель ОК-В-М-4Т-2000»	ООО «ВНИИКП-ОПТИК»
6	ТУ 3587-014-24118545–2011	«Кабели оптические полевые марок ОК-ПН01, ОК-ПН02»	ОАО «Псковгеокабель»
7	Полевые кабели связи армированные	ОСРП58.5/1-4/ОР-L	«Волиоптика»

Современная стратегия ведения полевых действий диктует новую философию развития полевой техники связи. Монументальность элементов линий проводной связи уже не обеспечивает требований по скорости развертывания пунктов связи, их свертывания и перемещения. К тому же объемы передаваемой информации, скорость передачи, защищенность от внешних влияний и скрытность ставят оптику вне конкуренции по сравнению с электрическими кабелями и их атрибутами в виде техники прокладки (рис. 1–6).

Оптические линии связи и оптические кабели в том числе формируют новую философию создания современных информационных сетей. Она заключается в трех словах:

- интеграция,
- универсализация,
- многофункциональность.

В настоящее время в соответствии с ГОСТ РВ 6015-003–2010 кабели разделены на три группы по назначению: Пл – легкие, для использования на оперативных линиях связи в низших звеньях управления; По – облегченные, для использования на оперативных линиях дальней связи, в том числе проложенные в грунте; Пу – упрочненные, для длительной работы в полевых условиях, в том числе проложенные в грунт.

Поставлена задача создать такое изделие, которое объединит (интегрирует) в себе все качества этих кабелей.



Рис. 1. Кабелеукладчик гусеничный



Рис. 2. Кабелеукладчик внутриузлового кабеля



Рис. 3. Мотоцикл связи

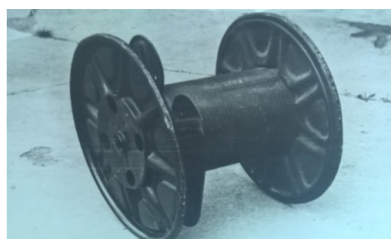


Рис. 4. Металлический барабан

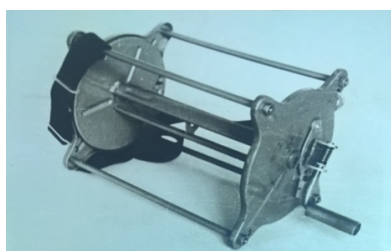


Рис. 5. Катушка ТК-2

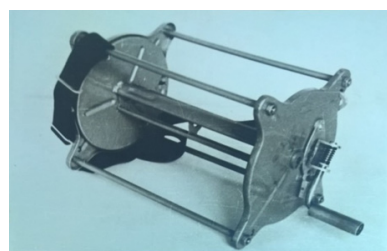


Рис. 6. Кабельная тележка

Если принять данный тезис за достигнутое, то вступает в действие принцип универсализации. Он связан с обобщением многих требований различных областей применения. Легко расширить область распространения от наземной до подводной, от установки на аэрокосмических объектах до судовой техники. Это автоматически делает изделие многофункциональным, позволяющим выполнять сразу несколько задач.

Что мешает этому процессу? Казалось бы, первой преградой может служить техническая сложность поставленной задачи. Конечно, упрочненный и легкий кабели достаточно далеки друг от друга по конструктивному исполнению, но это только на первый взгляд.

Уже в настоящее время для 12-волоконных кабелей внешний диаметр не превышает 5,2 мм против 6 мм для четырехволоконных ка-

белей ОКПН образца 1988 г. при рабочем усилии на растяжение до 7000 Н (в два раза больше, чем у ОКПН).

Применение оптического волокна со значением растягивающего усилия при перемотке с натяжением (ProofTest) до 2,41 ГПа и внешним диаметром 200 мкм позволит полностью исключить необходимость в трех типах кабелей.

Не надо забывать и об аппаратных кабелях, которые позволяют за счет уплотнения передаваемых сигналов и их модуляции уменьшить физическое количество каналов при общем увеличении пропускной способности.

Второй барьер – это набор требований к кабелям, который базируется на устаревших принципах эксплуатации и необъективной необходимости многократного завышения требований к условиям эксплуатации. Если механические, климатические и прочие внешние воздействующие факторы понятны, то этого нельзя сказать о требованиях к эксплуатации.

Уже давно понятно, что уставные требования 1972–1975 гг. в части прокладки и техники эксплуатации не выдерживают никакой критики. При скоротечности и маневренности действий заглубление кабеля в грунт на 90 см вызывает просто недоумение, а требование последующего извлечения кабеля, смотки, послеэксплуатационного ремонта и хранения достаточно спорно. Никто не требует смотки проводов управления движущимися высокоточными объектами после завершения ими установленных действий. Это расходный материал, потеря которого запрограммирована в процессе проведения действий.

Непонятна тяга к круглой форме оптических соединителей и выбору диаметра, которая основывается на мифической возможности бойца в ватных варежках открыть байонетный замок при морозе минус 60 °С. При этом оговаривается величина крутящего момента замка.

Отдельно стоит вопрос по катушкам, на которые наматывается кабель.

Катушка тяжела, неудобна, материалоемка, демаскирующая и не соответствует возможностям легкого, прочного и миниатюрного полевого кабеля. Масса кабеля 5 кг/км уже не предел, и наматывать его на катушки (см. рис. 4, 5) – все равно, что совмещать модели от Гуччи с лаптями. Сегодня существуют дистанционно управляемые средства механизированной доставки (рис. 7) и современные безынерционные катушки (рис. 8) для прокладки оптических кабелей.



Рис. 7. Вариант самоходной платформы (робот) для прокладки оптических кабелей

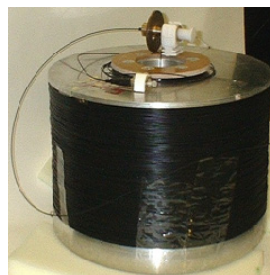


Рис. 8. Безынерционная катушка с 10 км оптического модифицированного кабеля одной строительной длиной

Можно и дальше заниматься критикой. Покажем лишь несколько разработок, которые в свое время были начаты для войск связи нашими собственными силами.

Они обладают преимуществами скрытности, отсутствия человека, дальности без необходимости соединения с помощью промежуточных соединителей, при наличии системы GPS есть возможность самоориентирования и контроля, имеется ТВ-камера и пр. Их недостаток – маленькая скорость – 15–20 км/ч. Возможны другие способы, включающие малые летательные аппараты или испытанную в начале 1990-х гг. управляемую по радио парашютную систему, которая с точностью до 10 м доставляла все необходимое, в том числе кабели, в заданную точку.

Третий барьер – цена вопроса. Кабель должен быть дешевым и одноразовым. В условиях динамики движения частей и подразделений прокладка линий связи преобладает над смоткой порой уже никому не нужного изделия, ремонт которого может быть убыточным как по времени, так и по затратам.

Отсюда возникают дополнительные требования миниатюризации, что вполне сочетается с использованием новых скоростных методов прокладки, о которых говорилось ранее.

Важным компонентом полевых оптических кабелей связи является соединитель. В настоящее время применяются цилиндрические соединители, требования к которым нуждаются в новом осмыслении.

При диаметре кабеля менее 4 мм диаметр силуминового корпуса 30–32 мм явно не способствует применению оптики для систем связи.

Принципы миниатюризации и разумной достаточности должны способствовать созданию конструкции, обеспечивающей не только работоспособность в полевых условиях, но и ремонтпригодность кабельной линии.

Технические решения, используемые в полевых оптических кабелях, достаточно универсальны и могут быть применены для решения других проблем кабельной техники.

Получено 28.09.2017

УДК 517.9

**А.Г. Андреев¹, В.С. Ермаков¹, А.В. Субботин¹,
Д.И. Шевцов^{1, 2}, М.К. Цибиногина^{1, 2}, А.М. Ханов²,
М.К. Осипчук^{1, 2}, И.А. Мальцев^{1, 2}**

¹ОАО «Пермская научно-производственная
приборостроительная компания», Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ ТИПА «ПАНДА»

Предложено математическое моделирование (ММ) анизотропных волоконно-оптических световодов (ВС) типа «Панда» с сохранением линейной поляризации, имеющих оптимальную конструкцию с точки зрения максимального двулучепреломления, получаемых методом химического парового осаждения (MCVD) с целью повышения производительности технологического процесса изготовления световодов и применения в волоконно-оптическом контуре гироскопа. ММ включает математическое описание физико-химических процессов MCVD-метода и определение поляризационной анизотропии в ВС.

Ключевые слова: анизотропные волокна, световоды типа "Панда", MCVD, конструкция оптических волокон, поляризационная анизотропия.

**A.G. Andreev¹, V.S. Ermakov¹, A.V. Subbotin¹,
D.I. Shevtsov^{1, 2}, M.K. Tsibinogina^{1, 2},
A.M. Khanov², M.K. Osipchuk^{1, 2}, I.A. Mal'tsev^{1, 2}**

¹ Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company,
Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF PANDA TYPE FIBER WAVEGUIDES

A mathematical modeling of the anisotropic fiber optic waveguides of the Panda type with the maintaining of linear polarization, having an optimal design from the point of view of maximum birefringence obtained by the chemical vapor deposition (MCVD) method with the aim of increasing the productivity of the manufacturing process of optical fibers and the application in the fiber optic contour of the gyroscope. Modeling includes a mathematical description of the physicochemical processes of the MCVD method and the determination of the polarization anisotropy in the optical fibers.

Key words: anisotropic fibers, Panda type optical fibers, MCVD, optical fiber design, polarization anisotropy.

Введение

Технология изготовления анизотропных одномодовых волоконных световодов (АОВС) типа «Панда» с сохранением линейной поляризации излучения постоянно совершенствуется. Однако основной способ их изготовления модифицированным методом химического парофазного осаждения (MCVD) не оптимизирован.

В связи с этим в настоящей работе представлено аналитическое описание физико-химических процессов MCVD-метода изготовления АОВС с целью повышения эксплуатационных характеристик изготавливаемого на основе таких АОВС контура гироскопа.

1. Методики эксперимента и исследований

В ходе исследования была составлена общая схема моделирования (рисунок), которая включает входные технологические параметры MCVD (концентрацию исходных веществ, их расходы, температуру нагрева опорной трубки, скорость перемещения горелки и количество ее проходов), прогнозируется основной радиальный профиль показателя преломления (ППП) заготовки и при заданной оптимальной конструкции анизотропных световодов рассчитывается конструкция заготовок АОВС.

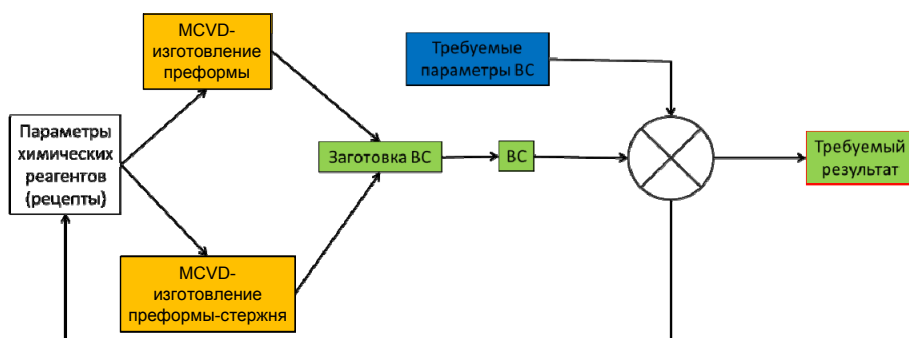


Рис. Общая схема процесса моделирования

Для получения прогнозируемого ППП решаются кинетические и термодинамические задачи процессов образования тонкодисперсных оксидов [1] и эффективности их осаждения, определяющей толщиной стенки опорной трубки, скоростью перемещения горелки, длиной

пути ее сканирования, условиями охлаждения трубки и малозависящей от скорости парогазового потока и диаметра трубки [2].

2. Результаты и их обсуждение

В ходе проведения математических расчетов и анализа полученных результатов составлена программа расчета целевой конструкции анизотропных световодов. Ее основные этапы:

1. Расчет технологического режима изготовления материнских преформ и преформ-стержней для получения требуемого ППП с учетом степени химического превращения галогенидов при взаимодействии с кислородом в оксиды и эффективностью осаждения оксидов. Сравнение расчетных данных и экспериментальных, определяемых с помощью рефрактографического способа в преформах, корректировка расчетных параметров.

2. Расчет параметров заготовки на основе технических требований к световодам.

2.1. Подбор коэффициента K , определяющего угол раскрытия $\alpha_{ов}$ оптимальной конструкции АОВС и расстояние от центра сердцевинки до края канала L в заготовке согласно работе [4] при заданных фактических параметрах заготовки: $D_{кан}$ – диаметр канала; $D_{лег. ст}$ – диаметр сердцевинки нагружающего стержня; z – зазор между каналом и стержнем:

$$K = (1 + \sin \alpha_{ов}/2)/(1 - \sin \alpha_{ов}/2),$$

$$L = \frac{D_{заг}}{2,66K} - \frac{D_{кан} - D_{лег. ст}}{2}.$$

2.2. Расчет угла раскрытия заготовки АОВС $\alpha_{заг}$ с учетом зазора z и δ – толщины кварцевой оболочки нагружающего стержня:

$$\alpha_{заг} = \left(\alpha \sin \left(\frac{D_{лег. ст}}{2} / \left(L + \delta + \frac{D_{лег. ст}}{2} + z \right) \right) \right).$$

2.3. Расчет геометрических параметров АОВС через параметры заготовки методом подобия.

2.4. Сравнение расчетных данных и экспериментальных, измеренных в АОВС; коррекция расчетных параметров.

3. По результатам п. 1 и 2.4 введение поправок в технологический режим.

Выводы

В результате моделирования оптимизированы технологический процесс и конструкция АОВС, на основе которых волоконно-оптические контуры гироскопа имеют h -параметр не более $5 \cdot 10^{-6}$ 1/м, что на порядок меньше результатов до моделирования.

Список литературы

1. Исследование процессов легирования кварцевого стекла фтором методом модифицированного химического парофазного осаждения / А.Г. Андреев, В.С. Ермаков, И.И. Крюков, М.К. Цибиногина, К.В. Дукельский, М.А. Ероньян, Г.Т. Петровский, М.М. Серков // Физика и химия стекла. – 2006. – Т. 32, № 1. – С. 49–55.
2. Walker K.L., Geyling F.T., Nagel S.R. Thermoforetic deposition of small particles in the modified chemical vapor deposition (MCVD) process // J. Am. Ceram. Soc. – 1980. – Vol. 63, № 9-10. – P. 552–558.
3. Small form-factor Panda type HiBi fiber for sensing applications / M. Alam, D. Guertin, J. Farroni, J. Abramczyk, N. Jacobson, K. Tankala. – 2003.
4. Способ получения одномодового волоконного световода: пат. № 2164698 Рос. Федерация / Курбатова А.М. – 2001.

References

1. Andreev A.G., Ermakov V.S., Kryukov I.I., Cibirnagina M.K., Dukel'skij K.V., Eron'yan M.A., Petrovskij G.T., Serkov M.M. Issledovanie processov legirovaniya kvarcevoogo stekla ftorom metodom modifitsirovannogo himicheskogo parofaznogo osazhdeniya. *Fizika i himiya stekla*, 2006, vol. 32, no. 1, pp. 49-55.
2. Walker K.L., Geyling F.T., Nagel S.R. Thermoforetic deposition of small particles in the modified chemical vapor deposition (MCVD) process. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1980, vol. 63, no. 9-10, p. 552-558.
3. Alam M., Guertin D., Farroni J., Abramczyk J., Jacobson N., Tankala K. Small form-factor PANDA type HiBi fiber for sensing applications, 2003
4. Kurbatov A.M. Sposob polucheniya odnomodovogo volokonnoogo svetovoda. Patent no. 2164698, 2001.

Получено 28.09.2017

УДК 681.7.068

**В.П. Первадчук¹, Д.Б. Владимирова¹,
Д.Н. Дектярев¹, А.А. Пестерев²**

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²ОАО «Пермская научно-производственная
приборостроительная компания», Пермь, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО СТАБИЛИЗИРУЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА В MCVD-ПРОЦЕССЕ

В настоящее время активно развивается теория оптимального управления систем с распределенными параметрами, в том числе систем с подвижным источником воздействия. Температурное поле в процессе MCVD характеризуется пространственной протяженностью, и его следует рассматривать как объект с распределенными параметрами. В данной работе рассматриваются вопросы проектирования оптимального стабилизирующего регулятора для управления температурным полем в процессе MCVD.

Ключевые слова: оптимальное управление, оптимальный стабилизирующий регулятор, подвижный тепловой источник, MCVD-процесс.

**V.P. Pervadchuk¹, D.B. Vladimirova¹,
D.N. Dektiarev¹, A.A. Pesterev²**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company,
Perm, Russian Federation

DESIGNING OF OPTIMAL STABILIZING REGULATOR IN THE MCVD PROCESS

Now, the theory of optimal control of systems with distributed parameters is actively developing, including systems with a moving heat source. The temperature field in the MCVD process is characterized by spatial extent and should be considered as an object with distributed parameters. In this paper, we will consider the design process of an optimal stabilizing regulator for controlling the temperature field in the MCVD process.

Keywords: optimal control, optimal stabilizing regulator, moving heat source, MCVD process.

Введение

Технология получения кварцевых заготовок методом MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) была открыта еще в конце 70-х гг. прошлого века. Универсальность MCVD-технологии заключается в возможности изготовления кварцевых заготовок требуемого качества практически для всех видов оптических волокон.

На рис. 1 схематически показан процесс MCVD. В опорную кварцевую трубку подают пары четыреххлористого кремния (SiCl_4) и галогенидов легирующих компонентов (GeCl_4 , BCl_3 , POCl_3 и т.д.), а также очищенный и осушенный кислород.

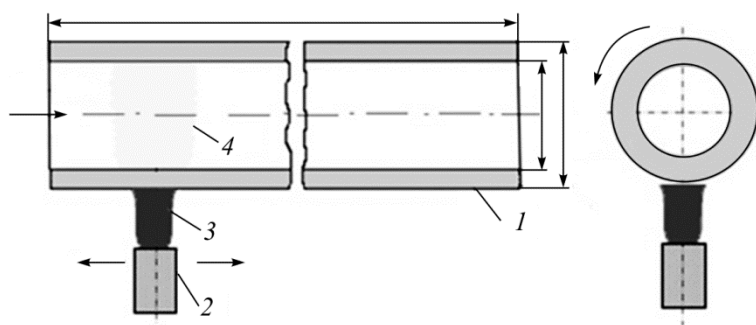


Рис. 1. Схематическое изображение процесса MCVD: 1 – кварцевая труба; 2 – движущаяся горелка (стрелки показывают направление движения); 3 – пламя горелки; 4 – зона реакции

В зоне нагрева трубки кислородно-водородной горелкой, перемещающейся вдоль трубки с заданной скоростью (100–120 мм/мин), происходит окисление галогенидов с образованием оксидов кремния и легирующих компонентов. Далее эти оксиды осаждаются за счет термофореза на внутреннюю поверхность опорной трубки перед горелкой и проплавляются ею, образуя прозрачный стеклообразный слой.

Процесс переноса оксидов легирующих веществ на внутреннюю поверхность трубы определяется действием термофоретических сил, возникающих ввиду наличия внутри трубки градиента температур. Опираясь на источники [1–6], в которых представлены результаты изучения процесса MCVD в России и за рубежом, можно выделить некоторые общие умозаключения, выполненные на базе фундаментальных исследований, свойственные в общем случае процессам протекания физико-химических реакций в MCVD-процессе.

1. Как следует из теории уравнений математической физики, температурному полю внутри кварцевой трубы, находящейся в зоне разогрева кислородо-водородной горелки, может быть поставлено в соответствие температурное поле поверхности кварцевой трубы, в частности профиль температурного распределения.

2. Эффективность образования оксидов в зоне окисления находится в жесткой зависимости от температурных условий. Причем для различных легирующих компонентов эти температуры различны, более того полнота протекания реакций окисления у каждого компонента своя. Эти знания позволяют обеспечивать требуемое температурное поле для оптимального с точки зрения полноты реакции процесса окисления паров легирующих компонентов.

3. Эффективность осаждения частиц под действием термофоретических сил определяется градиентом температур внутри трубы.

Движущаяся кислородо-водородная горелка – это подвижный тепловой источник воздействия, который создает определенное температурное поле в зоне разогрева кварцевой трубы. Температурное поле определяет эффективность протекания физико-химических реакций и качество заготовки ОВ.

В настоящее время активно развивается теория систем с распределенными параметрами, в том числе системы с подвижным источником воздействия [7–11]. Развитие технологий плавки, термообработки и напыления металлов с использованием электронно-лучевых и лазерных установок способствовало развитию систем управления с подвижным источником воздействия [12].

Объект управления в процессе MCVD характеризуется пространственной протяженностью, и его следует рассматривать как систему с распределенными параметрами.

Цель работы состоит в проектировании оптимального стабилизирующего регулятора температурного поля на поверхности кварцевой трубы в процессе MCVD.

1. Описание объекта управления

Будем считать, что нам заранее известно желаемое распределение температуры в цилиндрической трубе. Это известное распределение температуры и соответствующую ему интенсивность (мощность) теплового источника (при заданной скорости движения горелки) назовем

оптимальным процессом. Оптимальное распределение температуры $\Theta^*(t, z)$ – оптимальная программная траектория – будет отличаться от фактического распределения температуры $\Theta(t, z)$ на величину $\Delta\Theta(t, z)$, причем величина отклонения $\Delta\Theta(t, z)$ будет небольшой относительно оптимальной программной траектории, т.е.

$$\Theta(t, z) = \Theta^*(t, z) + \Delta\Theta(t, z). \quad (1)$$

Аналогичным образом представим функцию управления $u(t, z)$:

$$u(t, z) = u^*(t, z) + \Delta u(t, z), \quad (2)$$

где $u^*(t, z)$ – оптимальное программное управление; $u(t, z)$ – фактическое управление.

С учетом этого было получено линейное уравнение теплообмена для $\Delta\Theta(t, z)$, имеющее вид [13, 14]

$$\frac{\partial \Delta\Theta}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta\Theta}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial z} + \beta \Delta\Theta = \gamma^2 \Delta u, \quad (3)$$

где t – время; z – пространственная переменная; $\Delta u(t, z)$ – управление; α , β и γ – коэффициенты, полученные при линеаризации уравнения теплообмена.

Заметим, что в данной задаче управлением является мощность подвижного источника нагрева (горелки), тепловой поток $q(z, t)$ которого описывается функцией Гаусса [13]:

$$q(z, t) = q_{\max} \cdot e^{-\left(\frac{z - \int_0^t v(\xi) d\xi}{H} \right)^2}, \quad (4)$$

где $v(\xi)$ – скорость движения теплового источника; H – ширина пламени горелки; $q_{\max}$ – интенсивность (мощность) горелки.

Целью оптимального стабилизирующего управления является подбор такой интенсивности $q_{\max}$ горелки, при которой

$$|\Delta\Theta(t, z)| \rightarrow 0. \quad (5)$$

В качестве функции управления $\Delta u(t, z)$ определим мощность горелки $q_{\max}$. Функционал для задачи оптимального управления (1) примет следующий вид [13]:

$$F(\Delta u, \Delta \Theta) = \int_0^\tau \int_0^L \Delta \Theta^2 dz dt + \sigma \int_0^\tau \int_0^L \Delta u^2 dz dt, \quad (6)$$

где σ – параметр (цена управления).

Согласно работе [14] система оптимальности, соответствующая поставленной задаче, включает в себя дифференциальные уравнения для функции $\Delta \Theta(t, z)$ и сопряженной с ней вспомогательной функции $p(t, z)$ и имеет вид

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta \Theta}{\partial t} - a \frac{\partial^2 \Delta \Theta}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \Delta \Theta}{\partial z} + \beta \Delta \Theta = -\frac{\gamma^2 p}{\sigma}, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + a \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial z} - \beta p = -\Delta \Theta, \\ \Delta \Theta|_{t=0} = \Theta_0(z), p|_{t=\tau} = 0, \\ \Delta \Theta|_{z=0} = \Theta_1(z), p|_{z=0} = 0, \\ \left. \frac{\partial \Delta \Theta}{\partial z} \right|_{z=L} = \Theta_2(z), \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=L} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Важно отметить ключевую особенность системы оптимальности (7): она позволяет получить функции $\Delta \Theta(t, z)$ и $\Delta u(t, z)$ в аналитическом виде, которые могут быть использованы в режиме реального времени для систем автоматического управления.

Следует отдельно отметить, что управление скоростью движения горелки и расходом азота на обдув горелки в проектируемой системе управления осуществляется по программному закону.

2. Проектирование оптимального стабилизирующего регулятора

Поясним принцип действия проектируемой системы управления. Предположим, что длительность процесса MCVD равна T . Под процессом в данном случае будем иметь ввиду проход горелки в направлении подачи паро-газовой смеси от $z = 0$ до $z = L$. Тогда для любого t из

$[0, T]$ нам известны распределение температуры $\Theta^*(t, z)$ и соответствующее управление $u^*(t, z)$. Пусть контроль фактической температуры осуществляется с помощью сканирующего пирометра через равные промежутки времени τ , кратные t . Тогда решение задачи оптимального стабилизирующего управления тепловым источником будет происходить на временном промежутке $[0, \tau]$. Причем при $t_1 = 0$ ($t_1 \in [0, \tau]$) нам известны значения

$$\Delta\Theta(z, 0) = \Theta(z, 0) - \Theta^*(t, z), \quad (8)$$

где $\Theta(z, 0) = \Theta(t, z)$ – это фактическая температура, полученная с помощью сканирующего пирометра в момент времени t . Принимая $\Delta\Theta(z, 0)$ за начальное условие, а граничные условия для $\Delta\Theta(t, z)$ – равными нулю, вычислим температуру $\Delta\Theta(t, z)$ и изменение во времени теплового потока (управления) $\Delta u(t, z)$. Это управление будет действовать только на временном промежутке $[0, \tau]$, по истечении которого происходит новый замер температуры, вычисляем $\Delta\Theta(z, 0)$ и т.д.

3. Реализации алгоритма оптимального стабилизирующего управления

Алгоритм оптимального стабилизирующего управления реализуется на базе управляющего компьютера станка MCVD.

На рис. 2 представлена структурная схема основных модулей управляющего компьютера, задействованных в работе проектируемой системы управления.

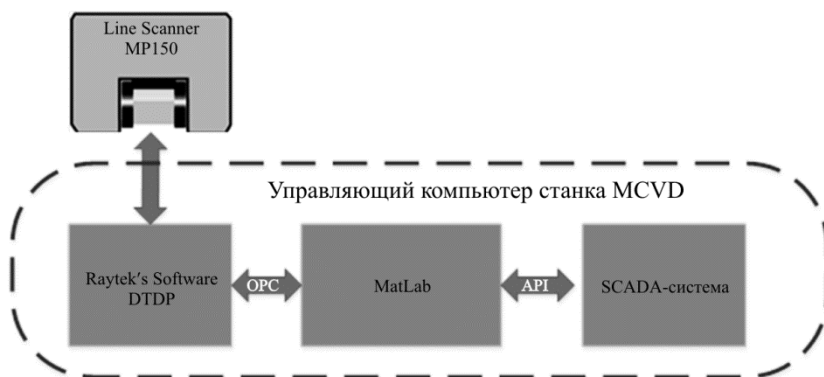


Рис. 2. Структурная схема управляющего компьютера

Кратко опишем функции каждого модуля, изображенного на рис. 2.

Raytek's Software DTDP – специализированное программное обеспечение фирмы Raytek, позволяющее получать данные со сканирующего пирометра Raytek MP150. Обладает опцией OPC-сервера для передачи данных в другие приложения. В работе алгоритма, представленного на рис. 2, выступает в роли сервера фактического температурного поля объекта управления в каждый момент времени.

MatLab – центральный модуль в реализации проектируемой системы управления. Алгоритм, изображенный на рис. 2, полностью реализуется на базе пакета MatLab. Ключевые задачи алгоритма: аппроксимация массива $\Delta\Theta(t, z)$ полиномиальной функцией и решение системы уравнений (7) – реализуются с помощью набора стандартных функций MatLab. Наличие собственного языка программирования позволяет реализовать логику работы алгоритма.

MatLab выступает в качестве OPC-клиента по отношению к Raytek's Software DTDP. MatLab обеспечивает двустороннюю связь со SCADA-системой станка MCVD, запрашивая величины фактических параметров процесса MCVD, участвующих в оптимальном стабилизирующем управлении, и передавая величину $\Delta u(t, z)$ для корректировки расхода водорода. Связь между пакетом MatLab и SCADA-системой реализована через программный интерфейс приложения SCADA-системы (API).

SCADA-система – программный пакет, предназначенный для разработки и обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте, а также возможного контроля и управления данным объектом. Двусторонняя связь между SCADA-системой MatLab позволяет осуществлять обмен ключевыми параметрами процесса, необходимыми для реализации алгоритма оптимального стабилизирующего управления: скоростью движения горелки, позицией горелки, расходом водорода на горелку, расходом азота на обдув горелки и др.

Заключение

В работе представлена система управления температурным полем, построенная на базе математической модели нагрева кварцевой трубы подвижным источником воздействия. Проектируемая система управления относится к классу систем с распределенными параметра-

ми. Спроектирован оптимальный стабилизирующий регулятор на основе представленной системы управления с распределенными параметрами. Реализован алгоритм оптимального стабилизирующего управления на базе математического пакета MatLab, адаптированный со SCADA-системой станка MCVD.

Список литературы

1. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 222 с.
2. Choi M., Park K.S., Cho J. Modelling of chemical vapor deposition for optical fiber manufacture // Optical and Quantum Electronics. – 1995. – № 27. – P. 327–335.
3. Dependence of equilibria in the modified chemical vapor-deposition process on SiCl_4 , GeCl_4 , and O_2 / K.B. McAfee, K.L. Walker, R.A. Laudise, R.S. Hozack // Journal of the American Ceramic Society. – 1984. – № 67 (6). – P. 420–424.
4. Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1982. – № 18 (4).
5. Cognolato L. Chemical vapour deposition for optical fiber technology // Journal de Physique IV. – 1995. – № 5.
6. Germanium chemistry in the MCVD process for optical fiber fabrication / D.L. Wood, K.L. Walker, J.B. Macchesney, J.R. Simpson, R. Csencsits // Journal of Lightwave Technology. – 1987. – № 5 (2).
7. Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980.
8. Кубышкин В.А. Подвижное управление колебаниями в системах с распределенными параметрами // Автомат. и телемех. – 2011. – № 10. – С. 117–128.
9. Фурсиков А.В. Оптимальное управление распределенными системами. Теория и приложения: учеб. пособие. – Новосибирск: Научная книга, 1999. – 352 с.
10. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. – М.: Наука, 1978. – 464 с.
11. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.

12. Кубышкин В.А., Суховеров В.С. Система моделирования и управления подвижным воздействием на базе программных средств MATLAB // Пробл. управл. – 2008. – № 2. – С. 64–69.

13. Первадчук В.П., Шумкова Д.Б. Оптимальное управление подвижным тепловым источником // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб., 2010. – С. 37–44.

14. Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Дектярев Д.Н. Оптимальное управление распределенными системами с подвижным тепловым источником // Наука и бизнес: пути развития. – 2016. – № 3 (57). – С. 25–31.

References

1. Burkov V.D., Ivanov. G.A. Fiziko-tekhnologicheskiye osnovy volokonno-opticheskoy tekhniki. Moscow: GOU VPO MGUL. 2007, 222 p.

2. Choi M., Park K.S., Cho J. Modelling of Chemical Vapor Deposition for Optical Fiber Manufacture. *Optical and Quantum Electronics*, 1995, no. 27, pp. 327–335.

3. McAfee K.B., Walker K.L., Laudise R.A., Hozack R.S. Dependence of equilibria in the modified chemical vapor-deposition process on SiCl_4 , GeCl_4 , O_2 . *Journal of the American Ceramic Society*, 1984, no. 67 (6), pp. 420–424.

4. Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and performance. *IEEE journal of quantum electronics*, 1982, no. 18 (4).

5. Cognolato L. Chemical vapour deposition for optical fiber technology. *Journal de physique IV*. 1995, no. 5.

6. Wood D.L., Walker K.L., Macchesney J.B., Simpson J.R., Csencsits R. Germanium chemistry in the MCVD process for optical fiber fabrication. *Journal of lightwave technology*, 1987, no. 5 (2).

7. Butkovskiy A.G., Pustynnikov L.M. Teoriya podvizhnogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami. Moscow: Nauka, 1980.

8. Kubyshekin V.A. Podvizhnoye upravleniye kolebaniyami v sistemakh s raspredelennymi parametrami. *Avtomatika i telemekhanika*, 2011, no. 10, pp. 117–128.

9. Fursikov A.V. Optimalnoye upravleniye raspredelennymi sistemami. Teoriya i prilozheniya. Novosibirsk: Nauchnaya kniga, 1999, 352 p.

10. Egorov A.I. Optimalnoye upravleniye teplovymi i diffuzionnymi protsessami. Moscow: Nauka, 1978, 464 p.

11. Rapoport E.Ya. Analiz i sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya s raspredelennymi parametrami. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 292 p.

12. Kubyshkin V.A., Sukhoverov B.C. Sistema modelirovaniya i upravleniya podvizhnym vozdeystviyem na baze programmnykh sredstv MATLAB. *Probl. uprav.*, 2008, no. 2, pp. 64–69.

13. Pervadchuk V.P., Shumkova D.B. Optimalnoye upravleniye podvizhnym teplovym istochnikom. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*, 2010, pp. 37–44.

14. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Dektyarev D.N. Optimalnoye upravleniye raspredelennymi sistemami s podvizhnym teplovym istochnikom. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2016, no. 3 (57), pp. 25–31.

Получено 29.09.2017

УДК 681.7.068

Г.Н. Вотинов, Я.Д. Токарева

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ДАТЧИК ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Представлены экспериментальные исследования поведения датчика температуры на основе волоконных брэгговских решеток в диапазоне от 300 до 450 °С по результатам показателей сдвига брэгговской длины волны. Используемая при этом методика является нечувствительной к механическому напряжению, поскольку один конец оптического волокна остается свободным и не деформируется. Предложена математическая модель расчета сдвига пика длины волны в зависимости от температуры.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, оптическое волокно, датчик температуры, защитно-упрочняющее покрытие, полиимид.

G.N. Votinov, Ia.D. Tokareva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

HIGH TEMPERATURE SENSOR BASED ON FIBER BRAGG GRATINGS

The paper presents experimental studies of the temperature sensor behavior based on fiber-Bragg gratings in the range from 300 to 450 °C according to the results of the Bragg wavelength shift parameters. The used technique is insensitive to mechanical stress, since one end of the optical fiber remains free and does not deform. A mathematical model is proposed for calculating the shift of the wavelength peak depending on temperature.

Keywords: fiber Bragg grating, optical fiber, temperature sensor, protective-consolidating coverage, polyimide.

Введение

В настоящее время получили распространение датчики температуры на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Данные датчики исследованы до температур, не превышающих 300 °С [1].

Возникает необходимость изучения поведения датчиков на основе ВБР при более высоких температурах, что актуально в устройствах, в которых невозможно установить электрические датчики температуры.

Возможные трудности: наиболее распространенные высокотемпературные защитно-упрочняющие покрытия (ЗУП) изготавливаются из полиимида, для которого верхняя температурная граница составляет 300 °С [2].

ЗУП, выдерживающие более высокие температуры, например покрытие из металла, сложны в производстве, нуждаются в специальном технологическом оборудовании и требуют дополнительного исследования, связанного с влиянием температуры на расширение материала. При этом небольшой объем выпускаемой продукции оказывается нерентабельным.

В данной работе предлагается конструкция датчика и исследуется принципиальная возможность работоспособности ВБР при высоких температурах.

1. Описание экспериментального исследования

В качестве исследуемых объектов были записаны четыре волоконных брэгговских решетки методом фазовой маски [3], покрытых полиимидным защитно-упрочняющим покрытием. Длина каждой ВБР составила 30 мм, центральные длины волн: $\lambda_1 = 1516,98$ нм, $\lambda_2 = 1529,12$ нм, $\lambda_3 = 1538,11$ нм, $\lambda_4 = 1579,08$ нм.

Определение смещения пика брэгговской длины волны производилось с использованием устройства опроса – спектроанализатора (СП) FiberSensing FS2200 Industrial BraggMETER – согласно схеме, представленной на рис. 1. Четыре ВБР, каждый конец которой был закреплен полиимидным скотчем, были помещены в капилляры, что обеспечивало равномерное нагревание всей поверхности ВБР. Один конец оптоволокна был оставлен свободным, т.е. было исключено механическое напряжение в ВБР, капилляры были помещены в температурную камеру МТХ-225НК с помощью жароустойчивого цилиндра. Длинные концы оптоволокна были сварены со сплавным разветвителем 50/50, который, в свою очередь, был подключен к самому спектроанализатору. Температура измерялась термометром сопротивления платиновым эталонным ПТСВ-3-3.

После помещения ВБР в камеру и подключения к СП были сняты начальные значения длины волны спектра при комнатной температуре. Дальнейшие испытания производились в термокамере с калибровкой по поверенной термопаре с шагом 10 °С от 300 до 450 °С с выдержкой 10 мин в каждой точке.

Особенность эксперимента состояла в высокой температуре нагрева, критичной для ЗУП ВБР.

Предполагаем, что при $T > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ полиимидное ЗУП постепенно испарится с ВБР и при отсутствии механического напряжения в волокне ВБР будет продолжать работать, поскольку температура плавления чистого кварца превышает $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пик длины волны отражения будет смещаться [4, 5].

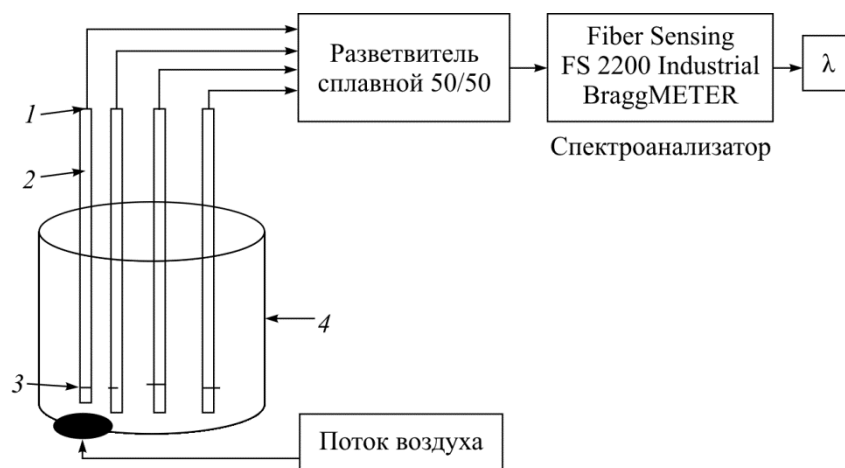


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – полиимидный скотч; 2 – капилляр; 3 – ВБР; 4 – цилиндр

2. Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость длины волны отражения от температуры и ее смещение от исходных значений представлены в таблице.

Влияние температуры на длину волны ВБР

$T, ^{\circ}\text{C}$	Длина волны, нм				Изменение длины волны, нм			
25	1516,9	1529,1	1538,08	1579,08	1516,899	1529,1	1538,08	1579,08
300	1520,07	1532,35	1541,28	1582,32	3,1711	3,2507	3,2009	3,2362
310	1520,2	1532,47	1541,4	1582,42	3,2968	3,369	3,3188	3,3419
320	1520,33	1532,58	1541,53	1582,55	3,4266	3,4836	3,448	3,4703
330	1520,45	1532,72	1541,66	1582,69	3,5555	3,6172	3,5811	3,6057
340	1520,59	1532,85	1541,8	1582,83	3,6875	3,7499	3,7156	3,7475
350	1520,72	1532,99	1541,93	1582,98	3,8164	3,8853	3,8505	3,8965
360	1520,85	1533,13	1542,07	1583,13	3,9488	4,0288	3,9907	4,0445
370	1520,98	1533,27	1542,22	1583,27	4,0826	4,1704	4,1396	4,1864
380	1521,12	1533,4	1542,36	1583,41	4,2191	4,3038	4,2759	4,3295
390	1521,26	1533,55	1542,5	1583,55	4,3591	4,4458	4,4168	4,471

Окончание таблицы

$T, ^\circ\text{C}$	Длина волны, нм				Изменение длины волны, нм			
400	1521,4	1533,68	1542,63	1583,69	4,498	4,5839	4,5506	4,6138
410	1521,53	1533,82	1542,77	1583,83	4,6341	4,7237	4,6907	4,7522
420	1521,67	1533,97	1542,92	1583,98	4,7736	4,8652	4,8356	4,8944
430	1521,81	1534,1	1543,06	1584,12	4,9118	5,0036	4,9768	5,0379
440	1521,95	1534,24	1543,21	1584,26	5,0512	5,1435	5,1279	5,1825
450	1522,09	1534,39	1543,35	1584,4	5,1881	5,2851	5,2663	5,3221

На графиках (рис. 2) представлены результаты температурной зависимости смещения центральной длины волны для всех четырех образцов ВБР. Добавлены линии аппроксимации, рассчитанные методом наименьших квадратов.

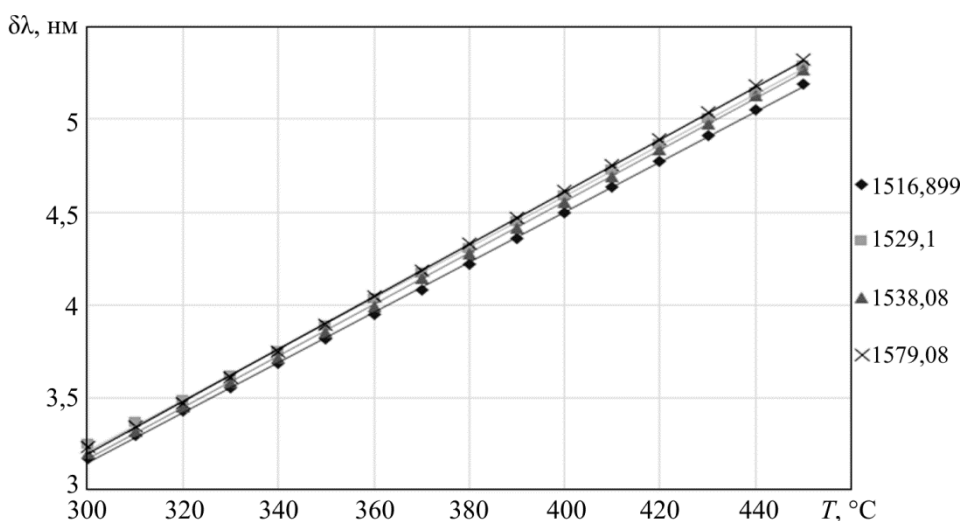


Рис. 2. Отклонение длины волны от исходной (при 25 °C)

Анализ зависимости (см. рис. 2) показал, что все ВБР ведут себя однотипно и в интересующем нас интервале температур могут быть легко интерполированы линейно:

$$\lambda_i(T) = \lambda_i(300) + k(T - 300), \quad i = 1 \dots 4, \quad (1)$$

где k можно рассчитать по данным таблицы:

$$k = 0,01367 \pm 0,00023 \text{ нм/}^\circ\text{C}.$$

При этом $\lambda_i(300)$ также может быть рассчитана добавлением к исходной длине волны отклонения, которое оказывается практически одинаковым для всех изготовленных решеток:

$$\lambda_i(300) = \lambda_i(T_k) + k_0(300 - T_k), \quad i = 1 \dots 4, \quad (2)$$

где T_k – комнатная температура, а k_0 также можно рассчитать по данным таблицы:

$$k_0 = 0,01169 \pm 0,00014 \text{ нм/}^\circ\text{С}.$$

Максимальный разброс значений составляет 0,08 нм, что по порядку величины совпадает с точностью записи ВБР.

Таким образом, зависимость длины волны от температуры в интервале от 300 до 450 °С может быть (с погрешностью около 3 °С) интерполирована следующим соотношением:

$$\lambda_i(T) = \lambda_i(T_k) + k_0(300 - T_k) + k(T - 300), \quad i = 1 \dots 4. \quad (3)$$

Для повышения точности до 1 °С вычисления длины волны в зависимости от температуры (или температуры от длины волны – в датчиках) нужно пользоваться соотношением (1), где $\lambda_i(300)$ должна быть определена экспериментально.

Таким образом, зависимость длины волны отражения от ВБР при температурах, превышающих 300 °С, можно моделировать (рис. 3) линейно с помощью соотношений (1), (3). Данная модель позволяет определять с высокой точностью пик длины волны отражения в зависимости от температуры в отсутствие защитно-упрочняющего покрытия.

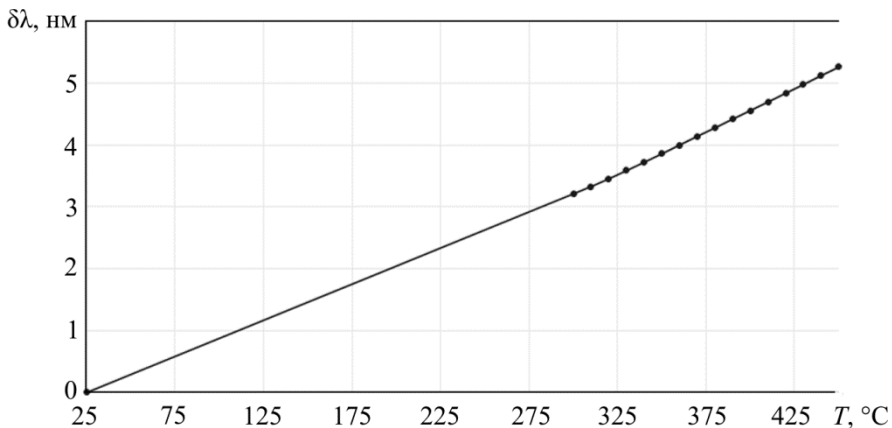


Рис. 3. Модель поведения ВБР

За время эксперимента (двое суток) наблюдалась повторяемость результата для различных волоконных брэгговских решеток в диапазоне температур от 300 до 450 °С.

При температуре 350 °С полиимидное защитно-упрочняющее покрытие испаряется, однако это не влияет на работу датчика. Повторные измерения, проведенные в этом интервале температур, подтверждают это. По достижении 450 °С собранный датчик температуры подавал сигнал с неизменной точностью. Таким образом, предельная температура работоспособности решетки не была достигнута.

Выводы

Проведенное исследование поведения датчиков температуры на основе ВБР при температурах, превышающих 300 °С, свидетельствует о принципиальной возможности их использования при высоких температурах.

Зависимость длины волны отражения от ВБР в датчиках температуры в отсутствие защитно-упрочняющего покрытия в диапазоне от 300 до 450 °С можно моделировать линейно с помощью соотношений (1), (3) с точностью до 1 °С.

Список литературы

1. Высокотемпературный датчик [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.i-sensor.ru/index.php/production/tochechnye-datchiki/sensors/90-produktsiya/tochechnye-volonno-opticheskie-datchiki/147-astro-a514> (дата обращения: 31.08.2017).
2. Biswas D.R. Opt. Eng. – 1991. – № 30 (6).
3. Результаты записи волоконных брэгговских решеток на кварцевых градиентных многомодовых оптических волокнах разных поколений / А.В. Бурдин, А.А. Васильцев, В.А. Бурдин [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 129–137.
4. Моделирование волоконно-оптических сенсоров температуры на основе брэгговской решетки / W. Waldemar, К.Х. Жунисов, Н.К. Смайлов [и др.] // Велес. – 2016. – № 4-2 (34). – С. 71–76.
5. Управление резонансной длиной волны волоконных брэгговских решеток с использованием резистивного покрытия на основе однослойных углеродных нанотрубок / Ю.Г. Гладуш, О.И. Медведков, С.А. Васильев [и др.] // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 10. – С. 919–923.

References

1. High Temperature sensor, available at: <http://www.i-sensor.ru/index.php/production/tochechnye-datchiki/sensors/90-produktsiya/tochechnye-volokonno-opticheskie-datchiki/147-astro-a514> (accessed 31 August 2017).
2. Biswas D.R. *Opt. Eng.*, 1991, no. 30 (6), 772 p.
3. Burdin A.V., Vasil'tsev A.A., Burdin V.A. etc. The results of recording of fiber Bragg gratings on silica graded multimode optical fibers of different generations. *Information and communication technology*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 129-137.
4. Waldemar W., Zhunisov K.Kh., Smailov N.K. et al. Modeling of fiber-optic temperature sensors based on the bragg grating. *Veles*, 2016, no. 4-2 (34), pp. 71-76.
5. Gladush Yu.G., Medvedkov O.I., Vasilev S.A. et al. Control over the resonance wavelength of fibre Bragg gratings using resistive coatings based on single-wall carbon nanotubes. *Quantum electronics*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 919-923.

Получено 29.09.2017

УДК 621.373.8

А.Г. Кузнецов¹, Д.С. Харенко¹, В.А. Гонта²¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

УСИЛЕНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ ТЕЙПЕРНЫМ ВОЛОКОННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Техника генерации сильночирпованных диссипативных солитонов открывает большие возможности для получения мощных лазерных импульсов с короткой длительностью. В данной работе демонстрируется возможность усиления таких импульсов в тейперном волокне с диаметром моды на выходном конце 100 мкм. Сильночирпованные импульсы длительностью 10 пс с центральной длиной волны 1040 нм и шириной спектра 13 нм были усилены в полностью волоконной схеме до пиковой мощности 69 кВт и сжаты дифракционными решетками до ≈800 фс.

Ключевые слова: синхронизация мод, диссипативный солитон, фемтосекундный лазер, тейпер, волокно, иттербиевый усилитель.

A.G. Kuznetsov¹, D.S. Kharenko¹, V.A. Gonta²

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

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

AMPLIFICATION OF DISSIPATIVE SOLITONS WITH A TAPER FIBER AMPLIFIER

The regime of highly chirped dissipative solitons is a powerful technique for generating high energy short pulses. In this work a possibility of amplification of such pulses with taper active fiber having 100 micron output core diameter is demonstrated. Highly chirped pulses with 10 ps duration, 1040 nm central wavelength and 13 nm spectral width were amplified in all-fiber scheme up to 69 kW peak power and compressed to 800 fs duration.

Keywords: mode locking, dissipative soliton, femtosecond laser, taper fiber, ytterbium amplifier.

Введение

Полностью волоконные лазеры с синхронизацией мод позволяют генерировать короткие импульсы с высоким качеством пучка, обладают хорошей стабильностью и не требуют юстировок оптических элементов. Недавно были продемонстрированы новые схемы резонаторов, исполь-

зующие как одномодовое волокно, где происходит нелинейное вращение поляризации, так и волокно с сохранением поляризации, в котором формируется диссипативный солитон. Энергия импульса в таких лазерах ограничена уровнем ≈ 20 нДж [1], при превышении которого формируется шумовой импульс в другой спектральной области за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Использование в резонаторе волокон с большим диаметром моды или LMA-волокна (large mode area) позволяет повысить порог генерации вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) и увеличить энергию импульса до 50 нДж [2], однако и этой энергии недостаточно для многих прикладных задач, таких как микрообработка и фотомодификация материалов. Дальнейшее увеличение выходной мощности лазера возможно при использовании дополнительного волоконного усилителя, например на основе LMA-световода. Так, например, в работе [3] авторы, используя 3 каскада усиления, с помощью LMA-волокон усилили 120 пс импульс до энергии 1,85 мкДж. Дальнейшее увеличение энергии импульса сопровождается сильными нелинейными эффектами. С использованием микроструктурированных оптических волокон (или так называемых PCF – photonic crystal fibers – фотонно-кристаллические волокна) удалось достичь еще больших пиковых мощностей, вплоть до нескольких гигаватт [4]. Однако PCF-усилители не являются полностью волоконными схемами, так как требуют использования объемной оптики для ввода и вывода излучения, кроме того, PCF-волокно должно быть уложено в прямую линию, что делает проблематичным создание компактных устройств. С этой точки зрения перспективным методом усиления является использование тейперного волокна с плавно меняющимся диаметром сердцевины [5, 6], что позволяет существенно повысить порог возникновения различных нелинейных эффектов.

Целью данной работы являлось исследование возможности усиления сильночирпованных диссипативных солитонов иттербиевым волоконным усилителем на основе тейперного волокна с последующим их сжатием.

1. Экспериментальная установка

Схема генератора чирпованных диссипативных солитонов представлена на рис. 1. Лазер выполнен в кольцевой схеме, состоящей из двух функциональных частей: короткого участка из стандартного од-

номодового волокна, в котором происходит синхронизация мод за счет эффекта нелинейного вращения поляризации, и длинного участка из волокна с сохранением состояния поляризации (PM – polarization maintaining), в котором формируется диссипативный солитон [1]. Лазер также включает в себя волокно, легированное Yb^{3+} , длиной 20 см, делитель поляризации (PBS – polarization beam splitter), пигтейлированное волокном, волоконный спектральный фильтр Лию, реализованный привариванием секции PM-волокна под углом 45° , контроллер поляризации и спектрально-селективный ответвитель (WDM – wavelength division multiplexer), с помощью которого в резонатор заводится излучение накачки мощностью до 300 мВт на длине волны 980 нм от лазерного диода. Направление распространения излучения по волокну задается поляризирующим оптическим изолятором с выводами из PM-волокна.

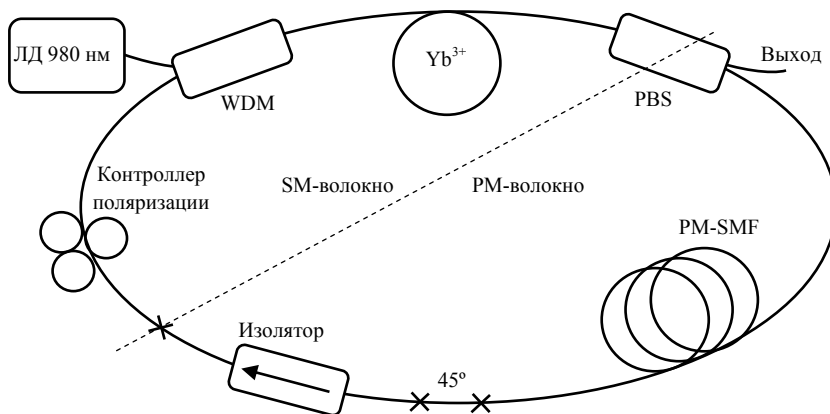


Рис. 1. Схема лазерного источника диссипативных солитонов

Поскольку генератор диссипативных солитонов позволяет генерировать достаточно длинные импульсы с относительно низкой пиковой мощностью, для усиления не требуется использование дополнительного стретчера, и сигнал с выхода задающего осциллятора через изолятор направляется непосредственно на вход усилителя, принципиальная схема которого приведена на рис. 2 [6]. Легированное ионами Yb^{3+} -тейперное волокно представляет собой конусообразный световод с двойной оболочкой длиной 6 м и диаметром сердцевины 15 мкм на его входе и 100 мкм на выходе. С узкой стороны тейпера с помощью волоконного объединителя накачки в световедущую оболочку заводится излучение многомодового лазерного диода с длиной волны гене-

рации 976 нм и максимальной мощностью 25 Вт. Для накачки усилителя с выходного конца используются два многомодовых диода мощностью по 55 Вт каждый, излучение которых объединяется комбайнером и коллимируется в оболочку. Усиленный полезный сигнал с выхода тейпера направляется дихроичным зеркалом на двухпроходной компрессор с парой дифракционных решеток (1500 штрихов/мм) [7], и сжатый импульс анализируется с помощью системы FROG. Относительно низкая частота повторения задающего генератора позволяет также отказаться от дополнительного прореживания импульсов перед их усилением.

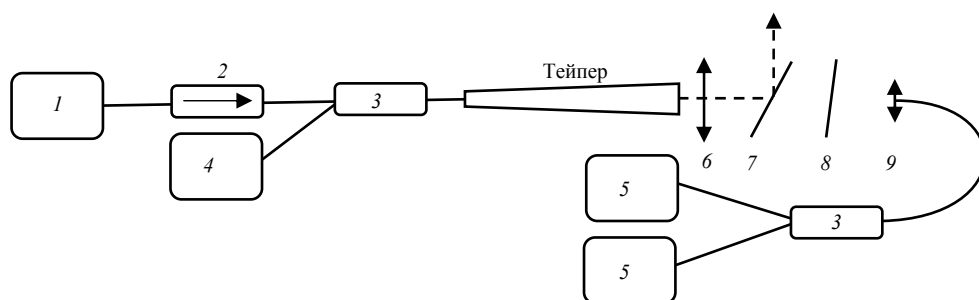


Рис. 2. Схема усиления: 1 – генератор ультракоротких импульсов; 2 – изолятор; 3 – объединитель накачки; 4 – многомодовый диод накачки 976 нм мощностью до 25 Вт; 5 – многомодовый диод накачки мощностью до 55 Вт; 6 – коллиматор; 7 – дихроичное зеркало; 8 – фильтр; 9 – пигтейлированный коллиматор

2. Результаты и обсуждение

Задающий осциллятор (см. рис. 1) генерировал последовательность сильночирпованных импульсов длительностью 10 пс и с частотой повторения 15 МГц. Средняя мощность лазера составила 20 мВт, центральная длина волны – 1040 нм, а ширина спектра излучения ≈ 13 нм (рис. 3). Мощность накачки и длина резонатора были выбраны таким образом, чтобы обеспечить максимальную стабильность при отсутствии генерации импульса ВКР.

Далее излучение, проходя через изолятор, заводилось в усиливающее тейперное волокно с двусторонней накачкой. С узкой стороны мощность накачки составляла 25 Вт, а с широкого конца варьировалась от 0 до 70 Вт. При максимальной мощности накачки с широкого конца (70 Вт) выходная мощность полезного сигнала составила 10,36 Вт, что соответствует пиковой мощности 69 кВт. Его спектр приведен на

рис. 4. Видно, что при усилении форма спектра в значительной степени искажается, из-за того что рабочая длина волны находится на левом краю профиля усиления иттербиевого волокна. Одновременно с этим из-за большого усиления в спектральной области 1050–1060 нм шумовые компоненты, присутствующие в спектре задающего осциллятора (см. рис. 3), усиливаются и приобретают вид узких множественных паразитных пиков. Очевидно, что для исключения паразитных пиков в выходном спектре требуется более тщательная фильтрация шумов исходного сигнала. На рис. 5 приведена зависимость выходной мощности из усилителя от мощности накачки с широкого конца тейпера.

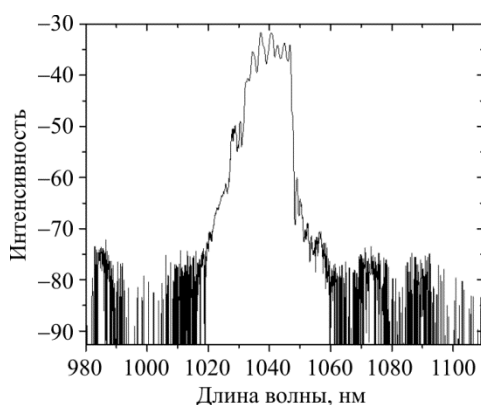


Рис. 3. Спектр излучения задающего осциллятора

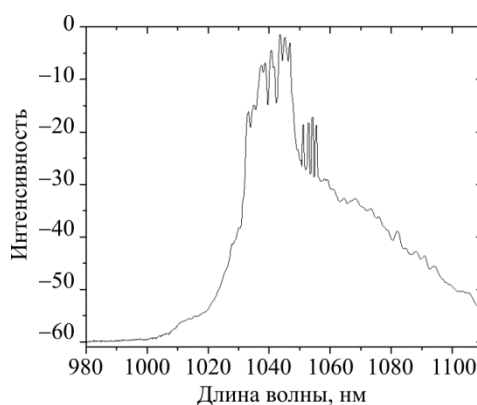


Рис. 4. Спектр усиленного до 10,36 Вт излучения

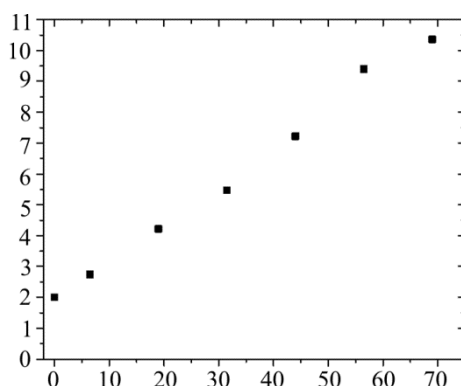


Рис. 5. Зависимость выходной мощности сигнала от мощности накачки с широкого конца тейпера (при включенной накачке 25 Вт с узкого конца)

Усиленные импульсы сжимались внешним компрессором на дифракционных решетках. Их восстановленный профиль приведен на рис. 6. Длительность сжатого импульса при 8 Вт выходной мощности составила 827 фс, однако с увеличением выходного сигнала до 10 Вт длительность возрастает до 890 фс, что может быть связано с неравномерным усилением спектрального профиля.

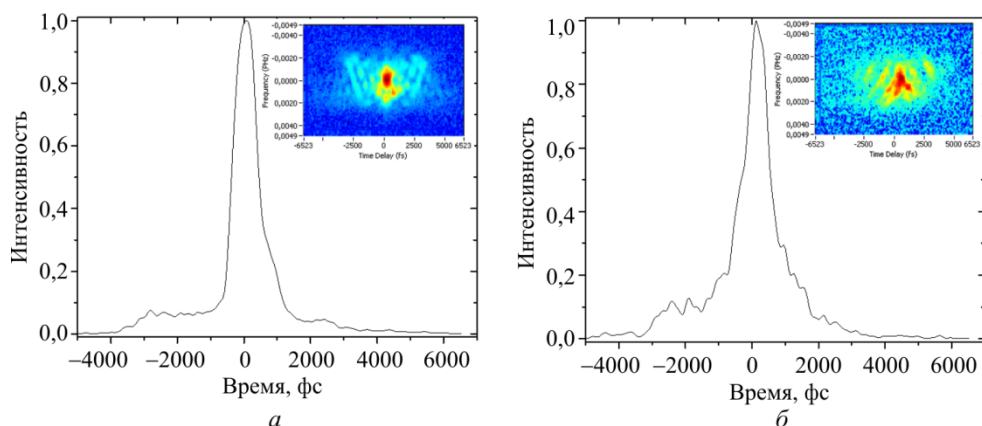


Рис. 6. Профиль сжатых импульсов при выходной мощности 8 Вт (а) и 10 Вт (б) с соответствующими FROG-трейсами (вставка)

Заключение

В работе продемонстрировано усиление тейперным волоконным усилителем сильночирпованных импульсов длительностью 10 пс до пиковой мощности 69 кВт в полностью волоконной схеме. С помощью двухпроходного компрессора с парой дифракционных решеток импульсы были сжаты до ≈ 800 фс. При усилении сигнала происходят искажение спектра солитонов и возрастание шумов, уже присутствующих на выходе из задающего осциллятора. Поскольку искажение спектра приводит к уменьшению степени сжатия импульса, то перестройка длины волны задающего осциллятора в область 1050–1055 нм могла бы существенно повысить как качество конечного импульса, так и выходную мощность лазерного излучения. Данный лазер может применяться для микрообработки, гравировки и фотомодифицирования материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН.

Список литературы

1. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator / D.S. Kharenko, E.V. Podivilov, A.A. Apolonski, S.A. Babin // *Opt. Lett.* – 2012. – Vol. 37, № 19. – P. 4104–4106.
2. 50 nJ 250 fs all-fibre Raman-free dissipative soliton oscillator / D.S. Kharenko, V.A. Gonta, S.A. Babin // *Laser Phys. Lett.* – 2016. – Vol. 13, № 2. – P. 25107.
3. 1016-nm all fiber picosecond MOPA laser with 50W output / X. Qi, S.-P. Chen, H.-Y. Sun, B.-K. Yang, J. Hou // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24, № 15. – P. 16874–16883.
4. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power / T. Eidam [et al.] // *Opt. Express.* – 2011. – Vol. 19, № 1. – P. 255.
5. Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses / M.Y. Koptev [et al.] // *Quantum Electron.* – 2015. – Vol. 45, № 5.
6. Double clad tapered fiber for high power applications / V. Filippov, Y. Chamorovskii, J. Kerttula, K. Golant, M. Pessa, O.G. Okhotnikov // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16, № 3. – P. 1929.
7. Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser / D.S. Kharenko, A.E. Bednyakova, E.V. Podivilov, M.P. Fedoruk, A. Apolonski, S.A. Babin // *Opt. Express.* – 2015. – Vol. 23, № 2. – P. 1857–1862.

References

1. Kharenko D.S., Podivilov E.V., Apolonski A.A., Babin S.A. 20 nJ 200 fs all-fiber highly chirped dissipative soliton oscillator. *Opt. Lett.* 2012, vol. 37, no. 19, pp. 4104-4106.
2. Kharenko D.S., Gonta V.A., Babin S.A. 50 nJ 250 fs all-fibre Raman-free dissipative soliton oscillator. *Laser Phys. Lett.* 2016, vol. 13, no. 2, p. 25107.
3. Qi X., Chen S.-P., Sun H.-Y., Yang B.-K., Hou J. 1016-nm all fiber picosecond MOPA laser with 50W output. *Opt. Express.* 2016, vol. 24, no. 15, pp. 16874-16883.
4. Eidam T. et al. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 1, p. 255.

5. Koptev M.Y. et al. Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses. *Quantum Electron*, 2015, vol. 45, no. 5.

6. Filippov V., Chamorovskii Y., Kerttula J., Golant K., Pessa M., Okhotnikov O.G. Double clad tapered fiber for high power applications. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 3, p. 1929.

7. Kharenko D.S., Bednyakova A.E., Podivilov E.V., Fedoruk M.P., Apolonski A., Babin S.A. Feedback-controlled Raman dissipative solitons in a fiber laser. *Opt. Express*, 2015, vol. 23, no. 2, pp. 1857-1862.

Получено 29.09.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

В.А. Щербакова

студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: of@pstu.ru

V.A. Shcherbakova

Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: of@pstu.ru

М.В. Ременникова

младший научный сотрудник, лаборатория фотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: sergey.zy@gmail.com

M.V. Remennikova

Junior Researcher, Photonics Laboratory of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: sergey.zy@gmail.com

Е.Е. Самылова

студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: of@pstu.ru

E.E. Samylova

Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: of@pstu.ru

Ю.А. Конин

аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: yuri-konin@yandex.ru

Yu.A. Konin

Posrgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: yuri-konin@yandex.ru

А.И. Гаранин

аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: yuri-konin@yandex.ru

A.I. Garanin

Posrgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: yuri-konin@yandex.ru

П.В. Карнаушкин

младший научный сотрудник, лаборатория фотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: pavelkarn@mail.ru

P.V. Karnaushkin

Junior Researcher, Photonics Laboratory of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation, e-mail: pavelkarn@mail.ru

Ю.Т. Ларин

доктор технических наук, директор ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИ КП»), Москва, Россия, e-mail: urylarin@mail.ru

Iu.T. Larin

Doctor of Technical Sciences, Director of OJSC All-Russian Research, Design and Technological Institute of Cable Industry (JSC VNIIPK), Moscow, Russian Federation, e-mail: urylarin@mail.ru

В.П. Первадчук

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: pervadchuk@mail.ru

V.P. Pervadchuk

PhD of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: pervadchuk@mail.ru

Д.Б. Владимирова

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: vladimirova.dar@gmail.com

D.B. Vladimirova

Ph.D. in of Physical and Mathematical sciences, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: vladimirova.dar@gmail.com

Д.Н. Дектярев

ассистент кафедры прикладной математики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: dmitridekt@mail.ru

D.N. Dektiarev

Assistant, Department of Applied Mathematics, Perm State National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: dmitridekt@mail.ru

А.А. Пестерев

аспирант, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия, e-mail: a.a.pesterev@gmail.com

A.A. Pesterev

Postgraduate student, Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russian Federation, e-mail: a.a.pesterev@gmail.com

Г.Н. Вотинов

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: vgn@pstu.ru

G.N. Votinov

Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: vgn@pstu.ru

Я.Д. Токарева

студентка, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия, e-mail: yanoti@yandex.ru

Ia.D. Tokareva

Student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, e-mail: yanoti@yandex.ru

А.Г. Кузнецов

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: leks.kuznecov@gmail.com

A.G. Kuznetsov

Ph.D. in of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: leks.kuznecov@gmail.com

Д.С. Харенко

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: kharenko@iae.nsk.su

D.S. Kharenko

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

В.А. Гонга

аспирант, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия, e-mail: vlad081094@gmail.com

V.A. Gonta

Postgraduate Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: vlad081094@gmail.com

Научное издание

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 4, № 3

Редактор и корректор *М.А. Капустина*

Выход в свет 29.09.2017. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 4,7. Тираж 100 экз. Заказ № 340/2017.
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.