

Министерство науки и высшего образования 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. 7, № 1

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2020

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:

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

В.П. Матвеевко, 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. Волинцев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Пермь, Россия)

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

В.П. Драчев, 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. Семенов, 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

Всероссийская стратегическая сессия по развитию «сквозной» технологии НТИ «Фотоника».....	5
<i>Афанасьев В.М., Пономарев Р.С.</i> Определение величины полуволнового напряжения электрооптического модулятора интенсивности излучения на основе интерферометра Маха – Цендера.....	16
<i>Казанцев Е.И., Шелемба И.С.</i> Волоконно-оптический датчик для непрерывного контроля вязкости текучей среды.....	25
<i>Кузнецов А.Г., Харенко Д.С., Достовалов А.В.</i> Исследование процесса формирования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур с помощью полностью волоконного источника чирпованных диссипативных солитонов.....	39
<i>Цибиногина М.К., Шарипов Я.М., Осипчук М.К., Пищальников К.Д., Гагарина К.И., Перетрухина И.А.</i> Повышение оптических и прочностных свойств активного кварцевого волоконного световода	49
<i>Вахрушев А.С., Нурмухаметов Д.И., Вохмянина О.Л., Азанова И.С., Яшков М.В.</i> Влияние структуры пористого слоя кварцевого стекла на процесс изготовления активных оптических волокон методом пропитки	55
<i>Селезнев Д.А., Ременникова М.В., Заболотных А.А., Кашина Р.Р.</i> Разработка волоконного импульсного гольмиевого лазера для медицинского применения.....	62
Сведения об авторах.....	76

CONTENTS

All-Russian strategic session on the development of “end-to-end” technology NTI photonics	5
<i>Afnas'ev V.M., Ponomarev R.S.</i>	
Experimental determination of the half-wave voltage of the Mach – Zender electro-optical amplitude modulator	16
<i>Kazantsev E.I., Shelemba I.S.</i>	
Fiber optical sensor for continuous control of viscosity of a fluid	25
<i>Kuznetsov A.G., Kharenko D.S., Dostovalov A.V.</i>	
Amplification of dissipative solitons with a taper fiber amplifier	39
<i>Tsibinogina M.K., Sharipov Ya.M., Osipchuk M.K., Pishchalnikov K.D., Gagarina K.I., Peretrukhina I.A.</i>	
Improving optical and mechanical properties of the active optical fiber	49
<i>Vakhrushev A.S., Nurmukhametov D.I., Vokhmyanina O.L., Azanova I.S., Yashkov M.V.</i>	
The influence of the porous layer structure of quartz glass on the active optical fibers manufacturing process by impregnation method	55
<i>Seleznev D.A., Remennikova M.V., Zabolotnykh A.A., Kashina R.R.</i>	
Development of pulse fiber holmium laser for medical use	62
Information about authors	76

ВСЕРОССИЙСКАЯ СТРАТЕГИЧЕСКАЯ СЕССИЯ ПО РАЗВИТИЮ «СКВОЗНОЙ» ТЕХНОЛОГИИ НТИ «ФОТОНИКА»

По решению межведомственной рабочей группы по разработке и реализации национальной технологической инициативы (далее – НТИ) при президиуме Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и инновационному развитию России в 2019 году был расширен перечень «сквозных» технологий НТИ – в него вошли «фотоника» и «моделирование материалов с заданными свойствами».

В ходе рабочей встречи делегации Пермского края с руководством федеральных институтов развития (АО «РВК», АНО «Платформа НТИ», Фонд содействия инновациям) в рамках состоявшегося в декабре 2019 года в г. Сочи итогового форума НТИ «Глобальное технологическое лидерство» для определения направлений и дальнейших шагов по развитию фотоники в качестве «сквозной» технологии НТИ было принято решение о проведении в феврале 2020 года в г. Перми всероссийской стратегической сессии.

Организаторами мероприятия выступили правительство Пермского края, Агентство инвестиционного развития Пермского края совместно с предприятиями кластера волоконно-оптических технологий «Фотоника» при поддержке АО «РВК» и АНО «Платформа НТИ».

К участию в работе стратегической сессии были приглашены представители ведущих российских вузов, научных организаций и промышленных предприятий, заинтересованных в развитии и внедрении технологий фотоники, институтов развития, органов власти.

Сессия была посвящена обсуждению вероятных путей развития фотоники как научной дисциплины и как группы технологий, а также новых рынков. В работе стратегической сессии приняли участие 108 представителей 60 организаций из 14 городов России и зарубежья.

Перед участниками стояли следующие задачи:

- спрогнозировать влияние фотоники на технологические рынки в перспективе до 2035 года;
- определить перечень технологических барьеров, преодоление которых возможно с помощью технологий фотоники;

– определить возможные кооперационные связи для совместной работы по преодолению технологических барьеров с помощью технологий фотоники;

– сформировать концепцию «дорожной карты» развития фотоники как «сквозной» технологии.

С приветственным словом на открытии мероприятия выступил глава Пермского края Дмитрий Махонин. По его словам, в дни работы сессии Пермский край станет центром обсуждения одной из самых «молодых» научно-технических отраслей в российской экономике – фотоники. При этом он отметил деятельность одноимённого пермского кластера, уже давно известную за пределами региона. «Перед участниками этой сессии стоит серьёзная задача – наметить пути развития фотоники и понять, какие шаги нужно сделать, чтобы с её помощью выйти в лидеры в сфере высоких технологий, которые через 15–20 лет станут основой мировой экономики».



Губернатор Пермского края Дмитрий Махонин

Генеральный директор Пермской научно-производственной приборостроительной компании, якорной организации кластера «Фотоника», Алексей Гурьевич Андреев в своем выступлении определил, что «приземление» такого Центра компетенций в Пермском крае даст региону много возможностей для развития. «Центр компетенций по фо-

тонике будет являться продолжением и углублением рационального недропользования, потому что во всех разработках по недропользованию можно использовать эту технологию».



Генеральный директор Пермской научно-производственной приборостроительной компании А.Г. Андреев

По мнению директора Института автоматизации и электротехники Сибирского отделения Российской академии наук, член-корреспондента РАН Сергея Бабина, создание Центра НТИ по фотонике – важный шаг в развитии технологии, и у Перми есть все шансы стать этим центром. «В Перми есть отличный промышленный кластер, который может объединить усилия ученых, инженеров и производителей. Важно не просто разрабатывать технологии, важно их внедрять в производство и масштабировать. Если здесь это все пойдет, то Пермь станет фотонной столицей России».

В ходе стратегической сессии эксперты определили наиболее перспективные направления развития фотоники и областей применения сквозной технологии.

Для оценки влияния фотоники на технологические рынки в перспективе до 2035 года участниками были оценены тренды, характер-

ные для данного рынка. В общей сложности экспертами были выделены 39 главных трендов, условно разделенных на пять групп.



Директор Института автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, член-корреспондент РАН Сергей Бабин

Первая группа – «Общие тренды» – включает:

- рост количества сфер прикладного применения фотоники в России;
- рост количества людей, задействованных в сфере фотоники в мире;
- рост объемов частного и государственного финансирования, выделяемых на фотонику в мире;
- рост рынка, слияний и поглощений, укрупнение игроков в сфере кремневой фотоники.

По мнению экспертов, эта группа свидетельствует о все более возрастающем влиянии фотоники на технологические рынки и росте интереса к этой технологии во всем мире.

Вторая группа – «Общие технологические тренды» – конкретизирует перспективные рынки/продукты и технологии, в которых могут использоваться те или иные технологические решения, связанные с фотоникой. В эту группу входят следующие тренды:

- уменьшение размеров элементной базы;
- рост повсеместного использования дополненной реальности;
- рост применения технологии управления световым потоком для развития растений;
- рост скорости передачи данных, построенных в формате 5g-сетей;
- рост объемов инвестиций в применение полупроводниковых лазеров и светодиодов;
- расширение номенклатуры, повышение мощности волоконно-оптических датчиков;
- рост количества аналоговых технологий обработки данных;
- рост применения фотонных технологий для получения изображений на 2 «гнущихся/мнущихся» устройствах;
- рост яркости и снижение энергопотребления осветительных приборов, оптимизация спектра;
- увеличение доли рынка радиофотонных устройств;
- увеличение доли устройств виртуальной и дополненной реальности на основе технологий XG;
- увеличение числа производственных процессов, в которых используются источники оптического излучения;

Третья группа включает в себя технологии, которые будут способствовать ускорению развития вычислительных мощностей. В группу под названием **«Вычислительные мощности на базе фотоники»** входят следующие тренды:

- рост количества фотонно-аналоговых процессов для ИИ с более чем двумя состояниями;
- рост количества разработок технологий, основанных на квантовой передаче данных;
- рост внедрения метаматериалов на базе квазикристаллов;
- рост количества разработок, основанных на технологиях квантовых вычислений;
- рост объема данных, получаемых путем динамического мониторинга объектов при помощи оптических сенсоров;
- рост числа фотонных чипов;
- увеличение количества новых продуктов на основе интегральной фотоники в обработке больших потоков информации;
- рост числа областей науки и отраслей промышленности, требующих высокоточных измерений с использованием фотонных технологий.

Четвертая группа под общим названием «**Биофотоника**» включает в себя тренды, относящиеся к здоровью и долголетию человека (медицина), а также к сельскому хозяйству:

- рост количества применений лазеров в медицине в качестве инструмента диагностики и лечения (тераностика);
- рост применения технологий излучения среднего диапазона в медицине и газоанализе;
- совершенствование методов лечения онкозаболеваний. Неинвазивная терапия по уничтожению раковых клеток лазерным излучением;
- рост числа оптических самообучающихся нейронных систем;
- рост применения лазеров в медицине для печати органов;
- рост гидропонофотоники, переход на интеллектуальное искусственное освещение объектов сельского хозяйства;
- рост использования ТГц-излучения, в том числе модулированного в биологических сферах (медицина и агрофотоника);
- совершенствование сенсоров, используемых в биомедицине и основанных на фотонных технологиях;
- рост фотонных технологий (датчики, спектральный анализ, геопозиционирование, цифровое сельское хозяйство), связанный с увеличением количества населения и ограниченными ресурсами.

В пятую группу вошли «прорывные» технологии, зачастую только перешедшие в стадию прикладных исследований, а также технологии, включающие в себя множество потенциальных сфер применения. Среди них:

- рост использования технологий одиночного фотона (генерация и детектирование);
- рост применения ультракоротких частот в мире (модификация материалов, стандарт частоты);
- расширение спектрального диапазона одновременно регистрируемых данных и обработки оптических сигналов;
- рост количества разрабатываемых технологий на базе оптического супер-разрешения;
- рост объемов преобразования энергии солнца в тепловую и электрическую энергию.

Таким образом, этот перечень трендов является основой для определения технологических барьеров, преодоление которых возможно с помощью технологий фотоники, внедрения конкретной технологии, а

также формулирования мер поддержки для реализации этих возможностей и нейтрализации угроз. В результате был сформирован список по следующим группам:

- регуляционные,
- технологические/продуктовые,
- образовательные/научные.



Совместная работа участников в группах

По итогам работы стратегической сессии участниками были сформулированы подходы к формированию концепции «дорожной карты» развития фотоники как «сквозной» технологии и сделаны следующие общие выводы:

1. Российское экспертное сообщество испытывает потребность в нормах и стандартах, отвечающих современному запросу в использовании технологии фотоники. Предпринимались разрозненные попытки сформулировать требования к технологическому пакету, необходимому для развития технологии. Однако необходимы системный подход и общее видение, сформулированные и поддержанные максимально широким кругом заинтересованных сторон, для формирования «правил игры», определения мер поддержки и обслуживания технологической базы.

2. У большинства экспертов отрасли нет четкого понимания категории «потребитель технологии». На сегодняшний день в представлении большинства участников таким условным потребителем (или «интересантом» в развитии технологии) является государство. При этом не отменяются понятие «конечный потребитель» и необходимость акцентировать внимание на длинных цепочках создания стоимости. Необходимо организовать системную работу по вовлечению всех участников рынка в процесс рабочего диалога и четкого понимания своего возможного участия в цепочке «технология – решение – конечный продукт» на рынке фотоники как на территории России, так и в мире.

3. У участников существует очень высокий уровень ожидания относительно потенциальных возможностей технологий будущего (где может применяться фотоника). Однако нет четкого представления о возможности, сроках и путях внедрения разработок и продуктов фотоники в широкий рынок промышленности страны и всего мира.

4. Эксперты рассматривают имеющиеся политические и экономические санкции как возможности в развитии технологии фотоники. В связи с возникшими сложностями во взаимодействии с зарубежными партнерами и инвесторами по кооперации и участию в международных программах эксперты видят необходимость усиления роли государства как источника финансирования развития отрасли «фотоника». Однако «прорывы» российской фотоники на мировой рынок требуют колоссальных организационных усилий.

5. Фотонике как «сквозной» технологии требуются «продвижение» и «брендинг» – необходимо создать у потребителя понимание того, что такое фотоника. При этом популяризация технологии – необходимый этап для культурного принятия массами не только на поверхностном уровне (фотоника зачастую воспринимается только как сфера разработок и производства дисплеев, систем освещения и оборудования для высокоскоростной передачи Интернета), но и на более глубоком уровне. Необходимо показать примеры решения нестандартных задач в технике или медицине с помощью инструментов фотоники. Это позволит раскрыть место фотоники как инструмента для преодоления технологических барьеров НТИ.

6. Требуется подготовка кадров с релевантными знаниями, в том числе подразумеваются широкий кругозор по отрасли в целом, глубо-

кие узкоспециализированные знания и навыки с пониманием их «точки приложения» на общей карте фотоники.

Таким образом, с учетом выводов экспертов и результатов сессии дорожная карта сквозной технологии «фотоника» национальной технологической инициативы должна представлять собой комплекс мероприятий, реализуемых в рамках государственно-частного партнерства в развитии: 1) самой технологии; 2) реализации технологии на существующих и потенциальных рынках.



Обсуждение вопросов и обмен мнениями

Главная стратегическая цель «дорожной карты» – превращение фотоники к 2035 году в глобально конкурентоспособную отрасль российской экономики, занятие лидирующих позиций в ряде сегментов мирового рынка фотоники, в частности, в волоконной и интегральной оптике, лазерных системах, агробиофотонике, квантовых вычислительных системах, квантовых коммуникациях. Данная главная стратегическая цель декомпозируется на следующие задачи.

Задача 1: рынки. Четкое понимание возможностей фотоники всеми технологическими рынками НТИ. Определение конкурентных позиций на мировом рынке по сравнению с ведущими компаниями.

Задача 2: институты/инфраструктура. Создание условий для развития различных направлений фотоники как науки. Выстраивание кооперационных связей и создание сбалансированной системы государственных, частных и государственно-частных институтов на основе уже существующих цепочек разработки и производства. Создание условий для формирования новых законченных цепочек с привлечением институтов, КБ и производств.

Задача 3: человеческий капитал. Анализ существующего научно-го и производственного потенциала фотоники (ревизия), а также разработка мероприятий по его сохранению и приращению.

Задача 4: инновации и управление знаниями. Коммерциализация знаний и выход на конечные продукты (определение «лидера»).

Задача 5: инвестиции. Ревизия существующих программ и организация системной работы по структурированию инвестиций для ритмичного финансирования потребностей научно-технических проектов, стартапов, растущих производственных компаний, вновь формируемых научно-производственных цепочек.



Совместное фото участников стратегической сессии

Для решения поставленных стратегических задач необходима координация действий всех участников процесса, т.е. создание феде-

рального Центра развития фотоники (аналог Центра компетенций НТИ), объединяющего всех игроков: федеральные власти, институты развития, промышленников, научное сообщество, образовательные институты, в единое научно-техническое сообщество в сфере фотоники. Этот Центр будет координировать усилия разрозненных членов рынка, обеспечивать «стыковку» заказчиков с разработчиками (в том числе на уровне бизнес – наука), предлагать общие форматы работы, укрепляя взаимосвязи между всеми заинтересованными сторонами и осуществляя системный подход к общим задачам, лежащим перед отраслью фотоники.

Организационный комитет стратегической сессии

УДК 681.7.068/.069

В.М. Афанасьев¹, Р.С. Пономарев²

¹Коломенский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), Коломна, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОЛУВОЛНОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА – ЦЕНДЕРА

К основным электрическим параметрам модуляторов Маха – Цендера относятся статическое полуволновое напряжение и динамическое полуволновое напряжение. В документации на электрооптические модуляторы не всегда приводятся исчерпывающие характеристики. Особенно трудно определить динамическое полуволновое напряжение на интересующей частоте.

Предложен способ экспериментального определения статического полуволнового напряжения и динамического полуволнового напряжения модуляторов Маха – Цендера. Эффективность способа подтверждена имитационным экспериментом в среде OptiSystem 16.

Ключевые слова: электрооптический модулятор Маха – Цендера, рабочая точка модулятора, модулирующий сигнал, схема подключения, статическое полуволновое напряжение, динамическое полуволновое напряжение.

V.M. Afanas'ev¹, R.S. Ponomarev²

¹Kolomna Institute (branch) of Moscow State Engineering University (MAMI),
Kolomna, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HALF-WAVE VOLTAGE OF THE MACH-ZENDER ELECTRO-OPTICAL AMPLITUDE MODULATOR

The main electrical parameters of Mach-Zehnder modulators include static half-wave voltage and dynamic half-wave voltage. The documentation for electro-optical modulators does not always provide exhaustive characteristics. It is particularly difficult to determine the dynamic half-wave voltage at the frequency of interest.

A method for experimentally determining the static half-wave voltage and dynamic half-wave voltage of Mach-Zehnder modulators is proposed. The effectiveness of the method was confirmed by a simulation experiment in the OptiSystem 16 environment.

Keywords: Mach-Zehnder electrooptic modulators, the controller operating point, the driver of the modulating signal, wiring diagram, static half-wave voltage, dynamic half-wave voltage.

Введение

Улучшение характеристик обработки радиосигналов в системах передачи, приема и обработки информации достигается методами и средствами радиофотоники. Эффективным средством обработки радиотехнических сигналов в оптическом диапазоне служат электрооптические модуляторы Маха – Цендера [1, 2, 3].

Модуляторы интенсивности Маха – Цендера основаны на интерферометрическом принципе. Модулятор состоит из двух разветвителей, которые соединены двумя волноводами одинаковой длины [4]. С помощью электрооптического эффекта внешнее приложенное напряжение изменяет показатель преломления в ветвях волновода. Электрические сигналы, приложенные к электродам одного или обоих оптических плеч, определяют интенсивность излучения на выходе модулятора.

К основным электрическим параметрам модуляторов Маха – Цендера относятся статическое полуволновое напряжение и динамическое полуволновое напряжение. В документации на электрооптические модуляторы не всегда приводятся исчерпывающие характеристики. Часто приводится диапазон их значений. Особенно трудно определить динамическое полуволновое напряжение на интересующей частоте [5].

В статье [3] приведены результаты экспериментальных исследований модуляционной характеристики модулятора Маха – Цендера путем непосредственного и косвенного измерений. Для экспериментального исследования был собран стенд, состоящий из лазерного излучателя EMCORETTX 1994, модулятора интенсивности излучения OptilabIM-1550-20-а и PIN-фотодиода EMCORE 2522В. Элементы соединены с помощью оптического волокна CorningSMF-28e+. Структурная схема лабораторного стенда для исследования сигнала фотодиода содержала источник питания БЗ-701.4, генератор ВЧ-сигналов AgilentTechnologies 83711В и анализатор радиочастотного спектра R&SFSU50.

Для непосредственного измерения модуляционной характеристики электрооптического модулятора на его вход подавался стабильный уровень оптической мощности, а на выходе подключался измеритель оптической мощности. Изменяя напряжение смещения, поданного на модулятор от источника питания, наблюдалось изменение уровня выходной мощности оптического излучения. Полученное в данном случае статическое полуволновое напряжение смещения равно 5,1 В.

В варианте косвенного измерения к выходу фотоприемника подключался анализатор радиочастотного спектра. При этом на управляющие входы модулятора подавались напряжение смещения от источника питания (для изменения положения рабочей точки на модуляционной характеристике) и высокочастотный сигнал от генератора ВЧ-сигналов. При изменении напряжения смещения отслеживался уровень первой гармоники на экране анализатора спектра. Если рабочая точка находилась в области квадратуры модуляционной характеристики, то уровень первой гармоники на выходе фотоприемника достигал своего максимального значения. Если же рабочая точка находилась в максимуме или минимуме модуляционной характеристики, наблюдались минимальные значения уровня первой гармоники на выходе фотодиода и максимальное значение второй гармоники. При косвенном измерении статическое полуволновое напряжение модулятора равно 5,3 В.

Рассмотрим возможность экспериментального определения статического полуволнового напряжения и динамического полуволнового напряжения модуляторов Маха – Цендера в имитационном эксперименте в среде OptiSystem 16. Типичная схема подключения двухпортового модулятора Маха – Цендера в среде OptiSystem приведена на рис. 1.

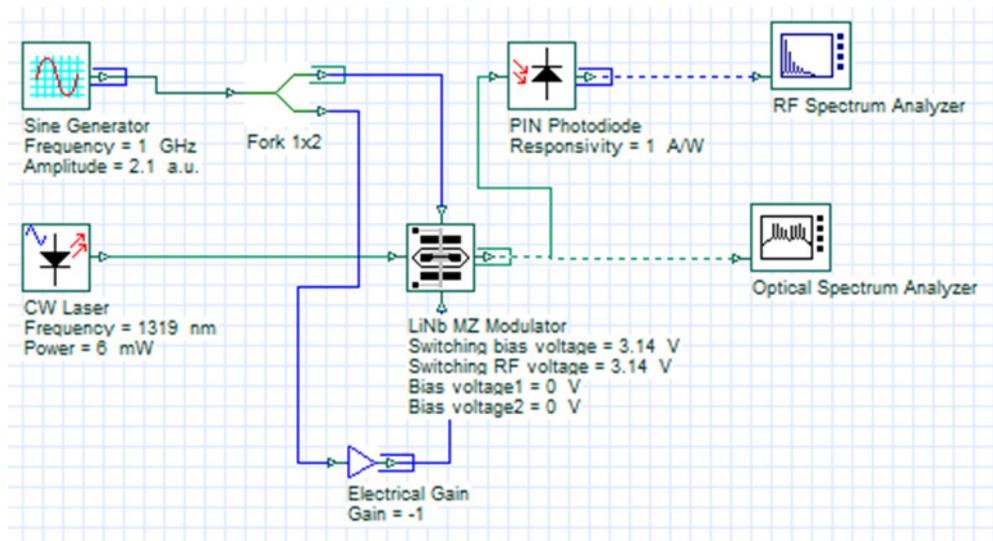


Рис. 1. Типичная схема подключения двухпортового модулятора Маха – Цендера

При моделировании систем с модулятором Маха – Цендера в среде OptiSystem используются: CW Laser-CW лазер (генератор непрерывного оптического излучения); Sine Generator – генератор синусоидального модулирующего напряжения; PIN Photodiode – PIN-фотодиод, преобразующий оптический сигнал в электрический; визуализаторы RF Spectrum Analyzer – анализатор радиочастотного спектра и Optical Spectrum Analyzer – оптический анализатор спектра; Electrical Gain – идеальный усилитель электрического сигнала; Fork 1x2 – вилка, копирующая входной сигнал в два выходных сигнала.

Экспериментальное определение статического полуволнового напряжения

Статическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора (Static half-wave voltage) характеризует напряжение, используемое для задания положения рабочей точки. Это – минимальное статическое напряжение, подаваемое на электрооптический модулятор и необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального или наоборот, или изменения фазовой задержки на π радиан [6].

Величину статического полуволнового напряжения $V_{\pi DC}$ определим как минимальную разницу напряжений смещения рабочей точки V_{DC} между соседними точками «Quadrature» в функции пропускания модулятора Маха – Цендера (рис. 2). В точках «Quadrature» – максимальная крутизна функции пропускания модулятора, что способствует более точному определению напряжений по сравнению с характерными точками «MAX» и «MIN».

Эксперимент моделируется в среде OptiSystem 16. Схема эксперимента представлена на рис. 3. Вначале подается напряжение смещения, равное нулю. Затем повышается напряжение смещения до величины, при которой на выходе фотодиода присутствуют только нечетные гармоники. Спектр напряжения на выходе фотодиода контролируется с помощью RF Spectrum Analyzer (радиочастотного анализатора спектра). Спектр состоит из первой и третьей гармоник. Рабочая точка модулятора в «-Quadrature». Напряжение смещения рабочей точки равно Bias voltage1 = $V_{\pi DC}/2$. При заданном на схеме (рис. 3) статическом полуволновом напряжении 6,28 В (Switching bias voltage = 6,28V) напряжение смещения, удовлетворяющее этому условию, равно 3,14 В.

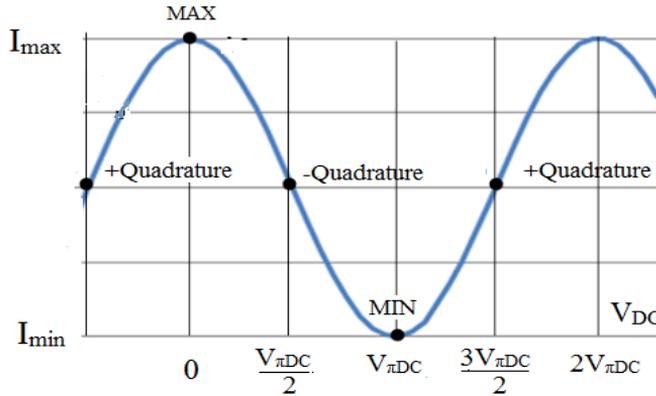


Рис. 2. Функция пропускания идеального модулятора Маха – Цендера: I_{\max} и I_{\min} – максимальная и минимальная величины излучения на выходе модулятора; V_{DC} – напряжение смещения рабочей точки; $V_{\pi DC}$ – статическое полуволновое напряжение; MAX и MIN – максимальная и минимальная рабочие точки; +Quadrature и –Quadrature – рабочие точки в квадратуре

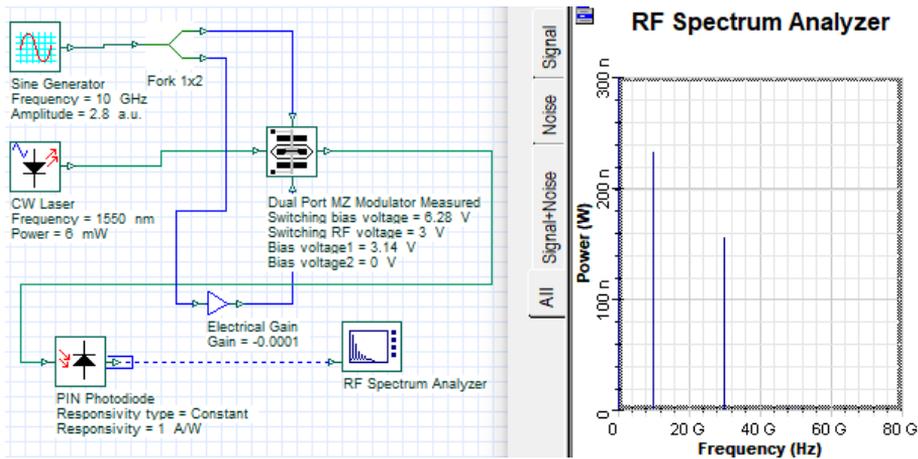


Рис. 3. Эксперимент в среде OptiSystem 16 (рабочая точка в «-Quadrature»).
 Напряжение смещения рабочей точки $V_{DC} = \text{Bias voltage1} = V_{\pi DC}/2 = 3,14$ В
 (спектр сигнала фотодиода состоит из первой и третьей гармоник)

Далее, увеличивая напряжение смещения рабочей точки Bias voltage 1, устанавливается режим, при котором также присутствуют только нечетные гармоники. На рис. 4 представлен вариант, при котором установлена рабочая точка «+Quadrature» путем увеличения напряжения смещения.

Спектры сигнала фотоприемника при напряжениях смещения 3,14 и 9,42 В (в точках «-Quadrature» и в «+Quadrature») одинаковые,

присутствуют только нечетные гармоники. Статическое полувольтное напряжение определяется как:

$$V_{\pi DC} = V_{2DC} - V_{1DC} = 9,42 - 3,14 = 6,28 \text{ В.}$$

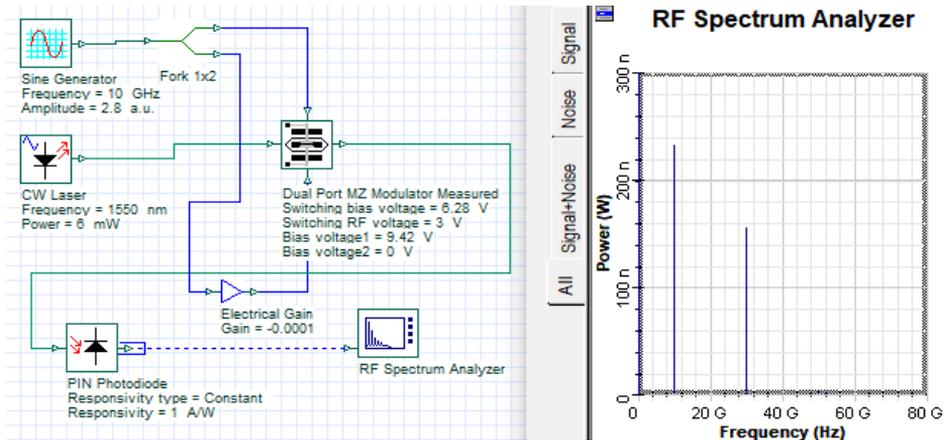


Рис. 4. Эксперимент в среде OptiSystem (рабочая точка в «+Quadrature»).
Напряжение смещения рабочей точки $V_{2DC} = \text{Bias voltage } 1 = 3V_{\pi DC}/2 = 9,42 \text{ В}$

Полученный результат соответствует заданному статическому полувольтному напряжению модулятора $\text{Switching bias voltage} = 6,28 \text{ В}$ (см. рис. 3 и 4).

Экспериментальное определение динамического полувольтного напряжения

Динамическое полувольтное напряжение электрооптического модулятора (Dynamic half-wave voltage) характеризует модулирующее напряжение. Это минимальное амплитудное напряжение на частоте модуляции, подаваемое на электрооптический модулятор и необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального или наоборот, или изменения фазовой задержки на π радиан [6].

Определим динамическое полувольтное напряжение $V_{\pi RF}$ на частоте 10 ГГц в режиме работы модулятора в точке «-Quadrature»:

1. У генератора Sine Generator устанавливается амплитуда напряжения модуляции менее предполагаемого значения динамического полувольтного напряжения (на рис. 3 Amplitude = 2,8 a.u.) и частота модуляции 10 ГГц (Frequency = 10 GHz).

2. Изменяя напряжение смещения рабочей точки, устанавливается режим, при котором присутствуют только нечетные гармоники: $V_{DC} = V_{\pi DC}/2 = 3,14$ В (см. рис. 3).

3. Увеличивая амплитуду модулирующего сигнала V_M (Amplitude у генератора Sine Generator), устанавливается сигнал фотодиода со спектром без первой гармоники (рис. 5). При этом амплитуда третьей гармоники будет близка к максимальной.

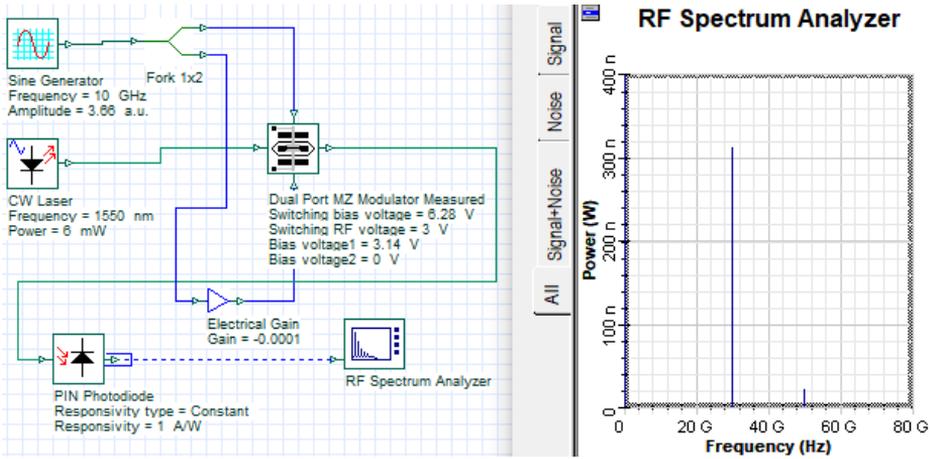


Рис. 5. Эксперимент в среде Opti System (Sine Generator, Amplitude = 3,66 В). Амплитуда напряжения модуляции $V_M = 3,66$ В (спектр сигнала фотодиода без первой гармоники)

4. В точке «–Quadrature» сигнал фотоприемника $U_{ФП}$ состоит из постоянной составляющей и нечетных гармоник:

$$U_{ФП} = U_m \left(1 - 2J_1(\Delta\phi) \sin \omega t - 2J_3(\Delta\phi) \sin 3\omega t - 2J_5(\Delta\phi) \sin 5\omega t \dots \right)$$

Амплитуду первой гармоники определяет функция Бесселя первого рода первого порядка $J_1(\Delta\phi)$. Она равна нулю (или минимальна) при $\Delta\phi = 3,83170597025677$. Тогда динамическое полуволновое напряжение исследуемого модулятора на частоте модуляции 10 ГГц при амплитуде напряжения модуляции $V_M = 3,66$ В определяется как

$$V_{\pi RF} = \pi V_M / \Delta\phi = 3,14 \cdot 3,66 / 3,8317 = 2,999 \text{ В} \approx 3 \text{ В}.$$

В результате получили $V_{\pi RF} = 3$ В, что соответствует запрограммированному значению Switching RF voltage = 3 В (см. рис. 5).

Заключение

Предложен простой и доступный способ измерения статического и динамического полуволнового напряжений электрооптического модулятора Маха – Цендера. Для определения полуволнового напряжения требуется минимальный состав оборудования. Эффективность способа подтверждена в среде Opti System 16.

Результаты будут полезны для инженерного проектирования и настройки аналоговых волоконно-оптических систем с использованием электрооптических модуляторов Маха – Цендера.

Список литературы

1. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин, А.В. Гамиловская, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 65–86.

2. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 6–42.

3. Применение электрооптического модулятора интенсивности в устройствах преобразования частоты радиосигналов./ В.В. Бирюков, В.А. Грачев, С.Г. Лобин, М.А. Палачев, А.С. Раевский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Энергетические системы и комплексы. – 2017. – № 2 (117). – С. 49–55.

4. Афанасьев В.М., Пономарев Р.С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха – Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. – 2017. – № 4. – С. 337–360.

5. 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator JDS Uniphase Corporation. – URL: http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/OSC...pdf1.pdf.

6. ГОСТ 15093–90. Лазеры и устройства управления лазерным излучением. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 30 с.

7. DIN EN 62802-2018 (МЭК 62802:2017). Measurement methods of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder opti-

cal modulators in high-frequency radio on fibre (RoF) // Systems (IEC 62802:2017). English version EN 62802:2017.

References

1. Belousov A.A., Vol'khin Iu.N., Gamilovskaia A.V., Dubrovskaiia A.A., Tikhonov E.V. O primeneniі metodov i sredstv radiofotoniki dlia obrabotki signalov detsimetrovogo, santimetrovogo i millimetrovogo diapazonov dlin voln [Radiophotonical methods and tools used for microwave analog and digital signal processing]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 65-86.

2. Morozov O.G., Il'in G.I. Amplitudno-fazovaia moduliatsiia v sistemakh radiofotoniki [Amplitude-phase modulation in microwave photonics systems]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2014, no. 1(20), pp. 6-42.

3. Biriukov V.V., Grachev V.A., Lobin S.G., Palachev M.A., Raevskii A.S. Primenenie elektroopticheskogo moduliatora intensivnosti v ustroistvakh preobrazovaniia chastoty radiosignalov [Application of an electro-optical intensity modulator in radio signal frequency conversion devices]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva. Energeticheskie sistemy i komplekсы*, 2017, no. 2(117), pp. 49-55.

4. Afanas'ev V.M., Ponomarev R.S. Elektroopticheskie amplitudnye modulatory Makha – Tsendera na osnove niobata litiia, ikh modifikatsii i formaty moduliatsii [Electrooptical amplitude Mach-Zehnder modulator based on lithium niobate, their modifications and modulation formats]. *Prikladnaia fotonika*, 2017, no. 4, pp. 337-360.

5. 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator JDS Uniphase Corporation, available at: http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/OSC...pdf1.pdf.

6. GOST 15093-90. Lazery i ustroistva upravleniia lazernym izlucheniem. Terminy i opredeleniia [GOST 15093-90 Lasers and laser modulation devices. Terms and definitions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990, 30 p.

7. DIN EN 62802-2018 (MЭК 62802:2017). Measurement methods of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder optical modulators in high-frequency radio on fibre (RoF). *Systems (IEC 62802:2017)*. English version EN 62802:2017.

Получено 11 марта 2020

УДК 681.586.5

Е.И. Казанцев¹, И.С. Шелемба²¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия²ООО «Инверсия-С», Пермь, Россия

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ТЕКУЧЕЙ СРЕДЫ

Рассмотрена возможность разработки датчика для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости в потоке высоковязких текучих сред (от 20...6000 Па·с) с использованием чувствительных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток.

Исследована возможность прямого замера силы вязкого трения среды, перемещаемой по технологическому трубопроводу, относительно неподвижного чувствительного зонда, погруженного в измеряемую среду.

Ключевые слова: волоконно-оптические брегговские решетки, измерение вязкости, высоковязкие текучие среды.

E.I. Kazantsev¹, I.S. Shelemba²¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia²«Inversion-S» LLC, Perm, Russia

FIBER OPTICAL SENSOR FOR CONTINUOUS CONTROL OF VISCOSITY OF A FLUID

The paper considers the possibility of developing a sensor for a device for continuous measurement and control of viscosity in a flow of highly viscous fluids (from 20 ... 6000 Pa * s) using sensitive elements based on fiber-optic Bragg gratings.

The possibility of direct measurement of the viscous friction force of a medium moving through a process pipeline relative to a motionless sensitive probe immersed in a measured medium is investigated.

Keywords: fiber-optic Bragg gratings, viscosity measurement, highly viscous fluids.

Введение

Высокопроизводительные технологические процессы перерабатывающих производств, например, на горнодобывающих и обогащенных фабриках, гидрометаллургических и химических производствах, предприятиях бумажной промышленности и др., являются, как правило, непрерывными. При этом существуют задачи непрерывного

контроля вязкости различных сырьевых суспензий при их подготовке, транспортировке и в процессе технологической переработки.

На химических предприятиях оборонной отрасли существуют технологические процессы по переработке высоковязких полимеризующихся текучих сред с вязкостями от 100 до 100 тыс. Па·с [1], при этом показатель вязкости таких сред в течение всего технологического цикла является одним из важнейших технологических параметров.

Создание средств непрерывного контроля вязкости реологически сложных текучих сред является актуальной задачей.

Существующие электромеханические устройства, основанные на измерении усилия от натекающей на зонд датчика контролируемой жидкости [2, 3, 4], применяемые для непрерывного контроля вязких сред, характеризуются невысокой точностью измерений и относительно большими габаритами. Использование датчиков вибрационного типа [5] ограничено диапазоном измерения сравнительно маловязких (до 20 Па·с) жидкостей типа нефтепродуктов по причине отслаивания измеряемой среды от колеблющейся поверхности зонда датчика, что не решает проблему контроля вязкости суспензий, паст и других подвижных сред с вязкостями от 50...600 Па·с и выше.

Появление высокочувствительных волоконно-оптических датчиков на основе волоконных брегговских решеток (ВБР), а также оптических интеррогаторов (лазерных интерферометров) позволило в различных областях науки и техники расширить круг решаемых задач по высокоточному измерению микроперемещений, давлений, профилей и скоростей движения потока жидкости, деформации, температуры [6, 7]. Однако возможность использования волоконно-оптических датчиков для прямого измерения сил вязкого трения в движущихся средах нами не была установлена. Возможными причинами такого положения могли стать высокие требования к чувствительности из-за малых сил вязкого трения, возникающих на поверхности измерительного зонда, контактирующего со средой, при измерении маловязких жидкостей, а также относительно высокая стоимость измерительной аппаратуры.

Целью настоящей работы является исследование возможности создания датчика для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости в потоке высоковязких текучих сред (от 20...6000 Па·с) с использованием чувствительных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток (ВБР).

Задачи исследования включают:

- оценку возможности использования в качестве чувствительного элемента датчика для устройства измерения и контроля вязкости в потоке в диапазоне от 20...6000 Па·с и более чувствительного элемента на основе ВБР, выпускаемых серийно;
- разработку конструкции и изготовление опытного образца чувствительного зонда датчика;
- проведение испытаний опытного образца датчика в лабораторных условиях и анализ полученных результатов.

Структурная схема предлагаемого устройства для измерения вязкости, включающая основные конструктивные элементы датчика и их связи, показана на рис. 1.

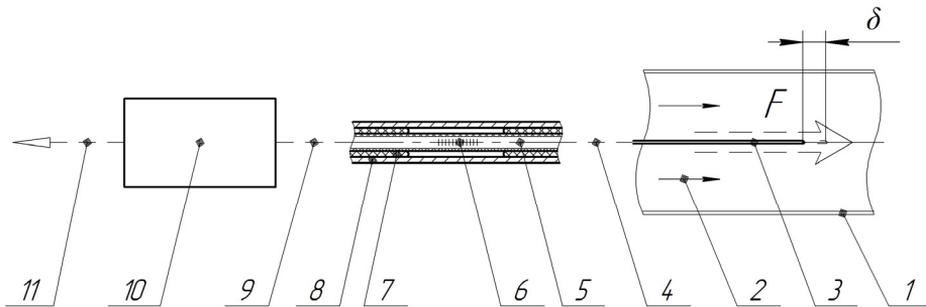


Рис. 1. Структурная схема устройства для измерения вязкости: 1 – технологический трубопровод; 2 – поток текучей среды; 3 – зонд; 4 – силовая связь; 5 – оптическое волокно; 6 – ВБР; 7 – клеевой состав; 8 – защитная оболочка; 9 – информационная оптическая связь; 10 – оптический интеррогатор (лазерный интерферометр); 11 – информационная связь с внешним устройством; F – сила вязкого трения, возникающая на поверхности зонда; δ – деформация зонда от воздействия силы F

Особенностью предложенной конструкции является прямой замер силы вязкого трения среды, перемещаемой по технологическому трубопроводу, относительно неподвижного чувствительного зонда, погруженного в измеряемую среду.

Сила вязкого трения F , приложенная к омываемой текущей средой поверхности зонда 2, деформирует его и размещенные внутри чувствительные волоконно-оптические элементы 5 и 6 на величину δ , которые реагируют на это смещением спектра отражения светового импульса, посылаемого оптическим интеррогатором 10 по волоконно-оптической линии связи 9. Интеррогатор 10 обрабатывает сигналы, оп-

ределяет величину микроперемещения зонда δ и пересчитывает ее в мгновенные значения вязкости с учетом температуры и скорости течения продукта, его реологических характеристик. Далее передает данные II на внешние устройства.

В качестве чувствительного элемента датчика использован серийно выпускаемый волоконно-оптический чувствительный элемент с одиночной ВБР, размещенный в защитной оболочке из тонкостенной металлической или пластмассовой капиллярной трубки, используемой как зонд датчика. Для учета влияния температуры на изменение вязкости продукта, а также термокомпенсации измерения величин деформации ВБР устройство для измерения вязкости должно иметь волоконно-оптический датчик температуры, размещенный в недеформируемой части зонда.

Основные зависимости, поясняющие схему функционирования датчика в условиях ламинарного потока ньютоновской и псевдоньютоновской жидкости, включают в себя известное уравнение силы вязкости (внутреннего трения):

$$F = -\mu (dw/dl)S, \quad (1)$$

где μ – динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения); dw/dl – градиент скорости; S – площадь зонда, на которую действует сила F , и группу формул, связывающих величину деформации ВБР с действующими на поверхности зонда составляющими силы вязкости:

$$F = F_B + F_K = F_B (1 + F_K/F_B), \quad (2)$$

где F_B и F_K – силы, действующие на оптическое волокно и защитную оболочку (корпус зонда) соответственно.

Из условия равенства деформации ε волокна и защитной оболочки на участке ВБР

$$\varepsilon = F_B / (S_B E_B) = F_K / (S_K E_K), \quad (3)$$

где S_B и S_K , E_B и E_K – площади сечений и модули продольной упругости оптического волокна и материала защитной оболочки (корпуса зонда), и представив, зависимость (3) в виде

$$F_K / F_B = S_K E_K / (S_B E_B) = f, \quad (4)$$

где коэффициент f отражает долю общей силы, воспринимаемой защитной оболочкой (корпусом зонда), и характеризует качество конструкции измерительной части датчика, получаем обобщающее выраже-

ние для оценки вязкости по данным гидродинамики течения жидкости и величины деформации ВБР:

$$\mu = k \varepsilon (1 + f) (S_B / S) E_B / (dw/dl), \quad (5)$$

где k – поправочный коэффициент, учитывающий особенности измерения вязкости реологически сложных жидкостей и влияния преднагружения волокна при формировании ВБР.

В частности, течение вязкопластичных жидкостей характеризуется двумя критериями подобия – числом Рейнольдса, определяющим влияние структурной вязкости, и так называемым «параметром пластичности» жидкости. При разработке расчетной модели обработки данных измерения течения таких жидкостей в технологических трубопроводах необходимо будет учитывать данные критерии, вводя существующие графические зависимости, комплексно учитывающие дополнительный параметр [8].

В качестве тестовой задачи для разработки опытного образца датчика для устройства контроля и измерения вязкости был выбран технологический процесс подачи пастообразного топливного состава [9] с динамической вязкостью порядка 100 Па·с с температурой 40 °С при снаряжении корпуса газогенератора [10] через технологический трубопровод диаметром 50 мм с постоянными объемными скоростями подачи порядка 50...150 мм/с.

В качестве чувствительного элемента датчика для устройства контроля и измерения вязкости была выбрана одиночная волоконно-оптическая брегговская решетка ASTRO F [11], выполненная на оптическом кварцевом волокне типа Панда ($D = 0,125$ мм, $E = 7,2 \cdot 10^{10}$ Па).

В качестве защитной оболочки чувствительного элемента – корпуса зонда была выбрана капиллярная трубка из нержавеющей стали ($D = 0,8 / 0,75$ мм, $L = 50$ мм, $E = 20 \cdot 10^{10}$ Па).

Из зависимости (5) следует, что чувствительность и точность измерений вязкости существенно зависят от конструктивного исполнения зонда и характеристик применяемых для его изготовления материалов.

Для оценки работоспособности устройства были рассчитаны величины усилий F , возникающие на поверхности зонда при его обтекании вязкой средой с выбранными параметрами вязкости, скорости движения и конструктивными особенностями технологического тру-

бопровода. Определены расчетные величины деформации зонда δ в зависимости от его конструктивного исполнения. При разработке использовался опыт создания оптических датчиков [12, 13].

По результатам оценки выбранной конструкции датчика установлено, что его чувствительность с защитным корпусом из металлической капиллярной трубки достаточна лишь при измерении сред с вязкостями более 300 Па·с и выше.

Для повышения показателя чувствительности было принято решение заменить защитную оболочку датчика из металлической трубки на защитное покрытие оптического волокна в виде полимерной оболочки, имеющей меньший модуль продольной упругости. В качестве материала для полимерного покрытия была выбрана акриловая композиция ($E = 3 \cdot 10^9$ Па). Расчетная толщина защитного покрытия была выбрана 0,5 мм.

Результаты оценки конструкции датчика с полимерным покрытием показали приемлемую чувствительность датчика для измерения сред с вязкостями в интересующем диапазоне 20 ... 600 Па·с.

Для проверки расчетов были изготовлены два варианта датчиков – оптическое волокно с защитной оболочкой из металлической капиллярной трубки и оптическое волокно с полимерным покрытием. Работы по изготовлению датчиков проводились на производственной базе ООО «Инверсия-С», г. Пермь.

Волокно с ВБР закреплено в полости капиллярной трубки по технологии ООО «Инверсия-С». Внешний вид зонда с металлическим корпусом приведен на рис. 2.

Для изготовления зонда с защитным покрытием из полимерной композиции на волокно наносился акриловый полимер путем окунания. Толщина покрытия контролировалась микрометром.

Работоспособность оптических чувствительных элементов датчиков была проверена по методике предприятия ООО «Инверсия-С». Это процесс обтекания зонда высоковязкой текучей средой с заданными скоростями моделировался путем нагружения зонда с приложением продольной растягивающей нагрузки грузами известного веса, выбранного расчетным путем для тестовых условий. Влиянием собственного веса участка зонда пренебрегали.

Работа чувствительных элементов в ходе эксперимента фиксировалась оптическим интеррогатором (стоечным анализатором сигналов

ASTRO A31x) производства ООО «Инверсия-С» [14, 15, 16]. В ходе эксперимента регистрировались величины относительного смещения опорной длины волны лазера оптического интеррогатора в зависимости от растягивающей нагрузки F , приложенной к зонду. Частота опроса чувствительного элемента составляла 1 измерение в секунду. На приведенных осциллограммах по оси X указано количество измерений n . Осциллограммы измерений представлены на рис. 3, 4, 5.

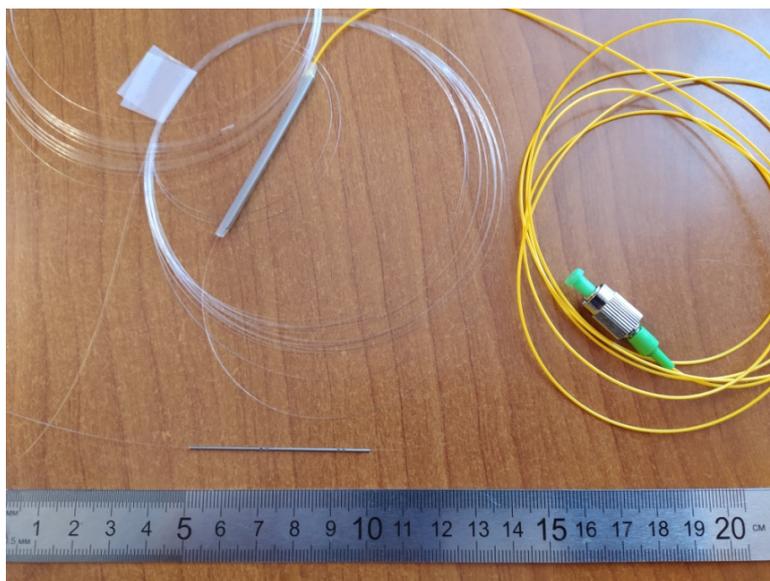


Рис. 2. Внешний вид зонда датчика с металлическим корпусом

Пересчет смещения опорной длины волны в относительную деформацию выполнен по зависимости:

$$\varepsilon = 10^6/k (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 - B (t - t_0), \quad (6)$$

где ε – деформация; 10^6 – масштабный коэффициент; k – коэффициент тензочувствительности; λ – текущая длина волны, нм; λ_0 – опорная (калибровочная) длина волны, нм; B – калибровочный коэффициент термокомпенсации, мкм/(м·°C); t – текущая температура ВБР, °C; t_0 – температура калибровки ВБР при определении λ_0 , °C.

Результаты расчетов и измерений сведены ниже в таблице.

Графики изменения относительной деформации зондов от приложенной нагрузки представлены на рис. 6, 7.

Вес груза, г	Сила трения, Н	Вязкость, Па·с	Деформация зонда, $\Delta L/L$, мкм/м			
			Металлический		Полимерный	
			Расчет	Замер	Расчет	Замер
1	0,009806	20,81	–	–	11,09	17,44
2	0,019613	41,62	–	–	22,19	31,72
30	0,294199	624,32	32,22	74,39	332,97	328,37
50	0,490332	1040,54	53,70	113,29	554,95	542,88
70	0,686465	1456,76	75,18	128,02	776,94	752,92
90	0,882598	1872,98	–	–	–	–
123	1,206218	2559,75	132,11	146,54	1365,20	1329,29
140	1,372931	2913,53	150,37	150,05	–	–
167	1,637710	3475,43	179,37	162,87	–	–
218	2,137850	4536,79	234,15	172,88	–	–
247,5	2,427146	5150,71	–	–	2747,04	2636,59

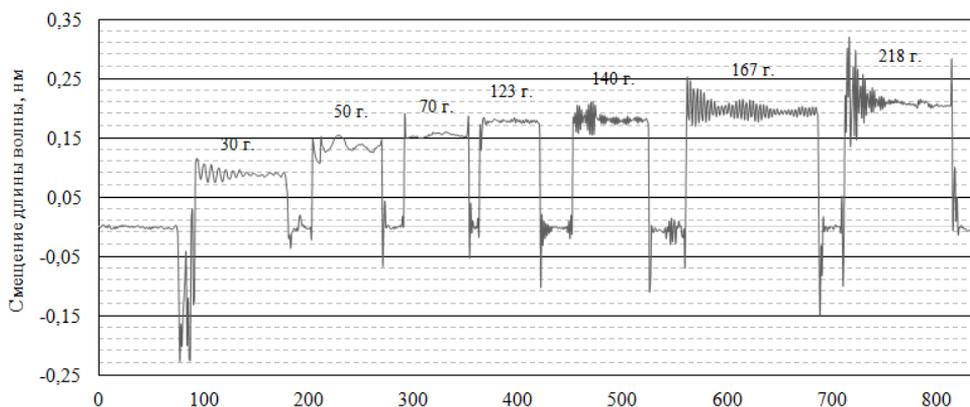


Рис. 3. Изменение длины волны при нагружении зонда с металлическим защитным покрытием в диапазоне 0...218 г

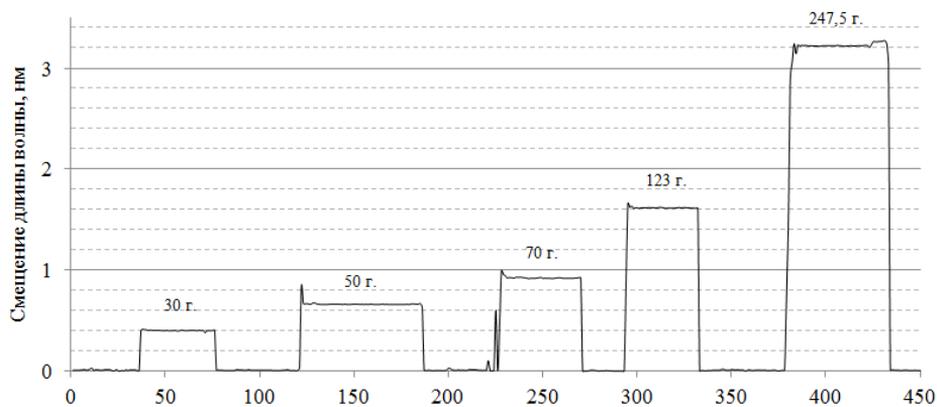


Рис. 4. Изменение длины волны при нагружении зонда с полимерным защитным покрытием в диапазоне 0...247,5 г

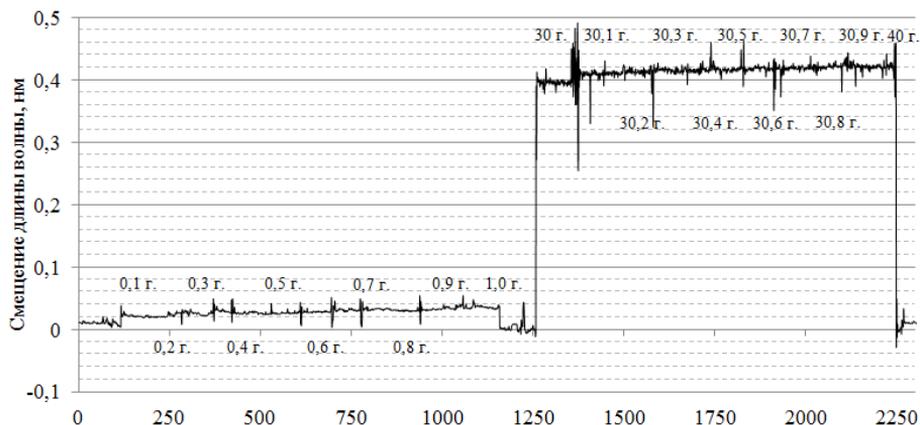


Рис. 5. Изменение длины волны при нагружении зонда с полимерным защитным покрытием в диапазоне 1,0...2,0 г и 30,0...32,0 г

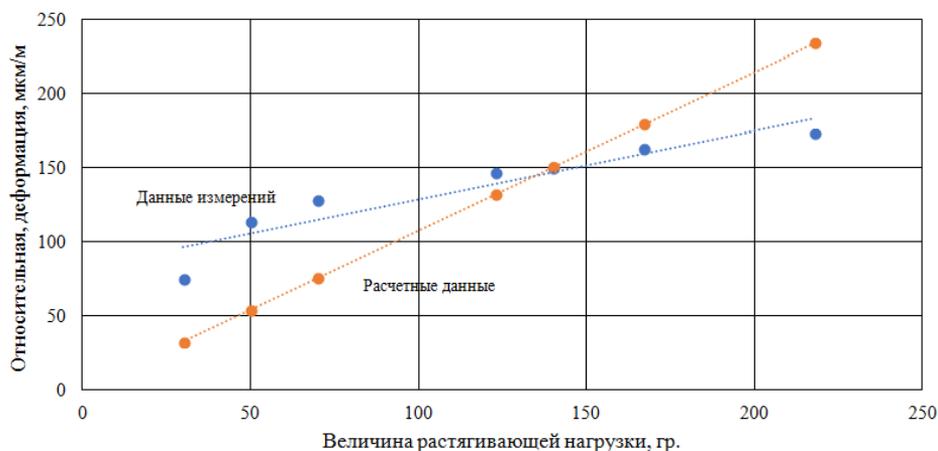


Рис. 6. Графики относительных деформаций зонда с металлическим корпусом при нагружении в диапазоне 30,0...247,5 г

Полученные результаты показывают удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных результатов, подтверждают возможность создания датчика прямого замера силы вязкого трения для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости текучих сред в потоке.

Вместе с этим стоит обратить особое внимание на выбор материала, используемого при разработке конструкции измерительного зонда датчика, так как величины вязкого трения, возникающие на зонде при течении среды, не всегда достаточны для обеспечения удовлетворительного уровня чувствительности и точности измерений. Так,

использование металлической капиллярной трубки в качестве корпуса зонда в изначально выбранной нами опытной конструкции ограничивает возможности проведения измерений на средах с вязкостями ниже 600 Па·с. Использование полимерного защитного покрытия в качестве корпуса зонда обеспечивает более высокую чувствительность измерений. Однако подобные покрытия в условиях реальной эксплуатации на промышленных установках будут значительно уступать металлическим по обеспечению защиты чувствительного оптического волокна с ВБР. К тому же полимерные материалы в течение длительного времени изменяют свои прочностные характеристики, что может отразиться на точности измерений в сторону снижения.

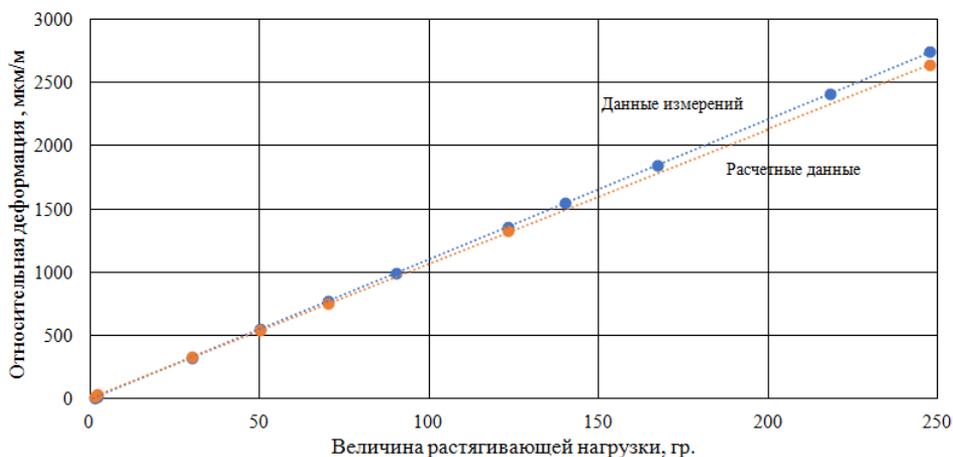


Рис. 7. График относительной деформации зонда с полимерным защитным покрытием в диапазоне 1,0...218,0 г

Для повышения чувствительности предложенной конструкции датчика возможно выполнить на конце зонда утолщение, например сферической формы, позволяющее добавить к силе вязкого трения, возникающего на цилиндрической поверхности зонда, силу вязкого оттекания утолщения – силы Стокса.

Другой способ повышения чувствительности датчика заключается в использовании материала оптического волокна и защитной оболочки с более низкими модулями упругости, например оптического волокна на основе полимерных материалов. В любом случае применяемые материалы должны обеспечивать неизменность физико-

механических характеристик под воздействием силовых нагрузок в течение всего времени эксплуатации.

Направлением дальнейших исследований может быть повышение чувствительности датчика для измерения вязкости за счет создания «безкорпусного» зонда датчика на основе технологии нанесения на оптическое волокно защитных металлических покрытий методом напыления.

Использование чувствительных элементов на основе волоконно-оптических брегговских решеток обеспечивает полную пожаро-взрывобезопасность датчиков на их основе, а компактность предложенной конструкции позволяет размещать их в существующих полостях технологического оборудования, что делает привлекательным использование данных датчиков на взрывоопасных химических производствах. Так, к теме настоящей работы была проявлена заинтересованность ученых Пермского политехнического университета с целью исследования процессов полимеризации смесей высоковязких наполненных полимеров в процессе их технологической переработки.

Выводы

Проведено исследование, подтвердившее возможность создания датчика для устройства непрерывного измерения и контроля вязкости текучих сред в потоке в диапазоне от 20...6000 Па·с и более на основе волоконно-оптической брегговской решетки.

Предложены варианты конструкций чувствительного зонда датчика и изготовлены опытные образцы.

Проведены эксперименты опытного образца датчика с имитацией сил вязкого трения эталонными нагрузками, подтвердившие работоспособность конструкции.

Предложены направления дальнейших исследований для повышения чувствительности и точности измерений датчика.

По материалам работы над конструкцией устройства для измерения и контроля вязкости текучих сред подготовлена и подана заявка на изобретение.

Список литературы

1. Твердые топлива реактивных двигателей. Т. 1У: Топлива. Заряды. Двигатели / В.Н. Аликин, А.В. Вахрушев, В.Б. Голубчиков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2011. – 380 с. – С. 50.

2. Пат. RU 2 537 524 МПК G01N 11/12. Способ определения вязкости и плотности жидкости и устройство для его осуществления.
3. Пат. SU 1286945 МПК G01N 11/00. Тензометрический датчик вязкости.
4. Пат. ПМ, RU 160404 МПК G01N 9/12. Устройство для непрерывного измерения вязкости жидкости.
5. Преобразователь вязкости жидкости Solartron 7827(29). – URL: https://solartron.nt-rt.ru/images/manual12s/SLT_TO/SLT_7827,29-TO.pdf.
6. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008.
7. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – М.: Физматлит, 2010. – 488 с. – С. 289–305.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – С. 480–483.
9. Нормативно-технический паспорт на аэрозольный огнетушащий состав «Туман-3» / РНЦ «Прикладная Химия». – СПб., 2011.
10. Проектирование двигательных установок на твердых и пастообразных топливах / А.А. Авдиенко [и др.]. – Саратов: Изд-во СФ ВАУ, 2011. – С. 63.
11. Одиночная волоконная брэгговская решетка. – URL: ASTRO Fxxx, <https://i-sensor.ru/index.php/production/fbg/89-produktsiya/175-odinochnye-breggovskie-reshetki>.
12. Шишкин В.В., Гранев И.В., Шелемба И.С. Отечественный опыт производства и применения волоконно-оптических датчиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 1.
13. Бабин С.А., Власов А.А., Шелемба И.С. Волоконно-оптические сенсоры на основе брэгговских решеток // Химия высоких энергий. – 2008. – Т. 42, № 4. – С. 35–37.
14. Интеррогатор (стоечный анализатор сигналов ASTRO A31x). – URL: <https://i-sensor.ru/index.php/production/analizatory-signalov/stochnyj>.
15. Скворцова В.А., Шелемба И.С., Оглезнев А.А. Испытательный стенд для проверки волоконно-оптических систем термометрии распределенного типа в соответствии с международным стандартом качества ИЕС 61757-22:2016 // Фотон-Экспресс. – 2017. – № 6(142); спец. вып. Фотон-Экспресс-Наука 2017: материалы всерос. конф. по волокон. оптике; г. Пермь, 3–6 окт. 2017 г. – С. 236–237.

16. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser / S.A. Babin, A.A. Vlasov, S.I. Kablukov, I.S. Shelemba // *Laser Physics*. – 2007. – Vol. 17, no. 11. – P. 1340–1344.

References

1. Solid fuel jet engines. Volume 1U. Fuel. Charges. Engines / V.N. Alikin, A.V. Vakhrushev, V. B. Golubchikov et al. M.: Engineering, 2011.380 s. p.50.

2. Patent RU 2,537,524 IPC G01N 11/12. A method for determining the viscosity and density of a liquid and a device for its implementation.

3. Patent SU 1286945 IPC G01N 11/00. Strain gauge viscosity.

4. Patent PM, RU 160404 IPC G01N 9/12. Device for continuous measurement of fluid viscosity.

5. Liquid viscosity transducer Solartron 7827(29)https://solartron.nt-rt.ru/images/manuals/SLT_TO/SLT_7827,29-TO.pdf.

6. UDD E. *Fiber Optic Sensors*. M.: Technosphere, 2008.

7. Tuchin V.V. *Lasers and fiber optics in biomedical research*. M.: Fizmatlit, 2010.488 s., P. 289-305.

8. Loytsyansky L.G. *Mechanics of fluid and gas*. M.: Nauka, 1970. p. 480-483.

9. Regulatory and technical passport for aerosol fire extinguishing composition “Tuman-3”, RSC “Applied Chemistry”, St. Petersburg.

10. Avdienko A.A. et al. Design of propulsion systems for solid and pasty fuels. Saratov. SF VAU, 2011. P. 63.

11. Single fiber Bragg grating ASTRO Fxxx. <https://i-sensor.ru/index.php/production/fbg/89-produktsiya/175-odinocnye-breggovskie-reshetki>.

12. Domestic experience in the production and application of fiber-optic sensors / V.V. Shishkin, I.V. Granev, I.S. Shelemba / *Applied Photonics-2016*. T. 3, № 1.

13. Babin C.A., Vlasov A.A., Shelemba I.S. Fiber-optic sensors based on Bragg gratings. *Chemistry of High Energies*, 2008, Volume 42, No. 4, p. 35-37.

14. Interrogator (rack-mount signal analyzer ASTRO A31x),<https://i-sensor.ru/index.php/production/analizatory-signalov/stochnyj>.

15. Test stand for testing fiber-optic thermometry systems of distributed type in accordance with the international quality standard IEC 61757-22:2016 /

V.A. Skvortsova, I.S. Shelemba, A.A. Ogleznev // Photon-Express. 2017. № 6(142): spec. vol. Photon-Express-Science 2017: Vseros. Conf. on request. optike, Perm, 3-6 Oct. 2017-Pp. 236-237. The RISC.

16. Babin S.A., Vlasov A.A., Kablukov S.I., Shelemba I.S. An interrogator for fiber Bragg sensor array based on the tunable erbium fiber laser. Laser Physics, 2007, v.17, N11, p.1340-1344.

Получено 11 марта 2020

УДК 621.373.8

А.Г. Кузнецов¹, Д.С. Харенко^{1,2}, А.В. Достовалов¹¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОГО ИСТОЧНИКА ЧИРПОВАННЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СОЛИТОНОВ

Техника генерации сильно-чирпованных диссипативных солитонов открывает большие возможности для получения мощных лазерных импульсов с короткой длительностью. В данной работе демонстрируются возможность усиления таких импульсов в тейперном волокне и экспериментальное применение данного источника для формирования поверхностных микроструктур на пленке титана. Также исследуется предельная производительность записи ЛИППС при увеличении частоты повторения импульсов.

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

A.G. Kuznetsov¹, D.S. Kharenko^{1,2}, A.V. Dostovalov¹¹Institute for Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia²Novosibirsk State University SB RAS, Novosibirsk, Russia

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 and the experimental application of this source for the formation of surface microstructures on a titanium film

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

Введение

Лазерное структурирование материалов для изменения или придания новых свойств их поверхности бурно развивается в последнее десятилетие [1]. Так, было показано изменение смачиваемости поверх-

ности [2], структурной окраски [3], увеличение биосовместимости титановых имплантов [4] и др. С практической точки зрения для дальнейшего развития данных технологий требуется разработать метод относительно дешевого структурирования поверхности на сравнительно больших площадях. Процесс образования лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) может оказаться эффективным решением данной задачи, поскольку образование периодических структур (с периодом $\Lambda < \lambda$, где λ – длина волны лазерного излучения) происходит в области фокусировки лазерного излучения за счет механизма самоорганизации при существенно большем по сравнению с периодом структур диаметре пучка. Основная гипотеза, объясняющая формирование ЛИППС, основывается на интерференции падающего излучения и излучения, рассеянного от поверхности материала или возбужденного поверхностного плазмона, в результате чего на поверхности материала формируется периодическая модуляция интенсивности излучения, в максимумах которой при превышении определенного порогового значения происходит процесс абляции материала [5]. При этом периодическая структура имеет, как правило, выделенное направление – перпендикулярно направлению поляризации падающего излучения. В [6] было продемонстрировано формирование нового типа ЛИППС – термохимических, которые формируются не за счет абляции, а вследствие окисления металла. В данном случае происходит рост рельефа в высоту, и структуры не загрязняются продуктами абляции, что важно для многих практических применений. Другие особенности данного типа структур состоят в следующем: высокая степень упорядоченности, ориентация параллельно поляризации падающего излучения, зависимость периода структур не только от длины волны излучения, но и от толщины металлической пленки.

Одним из перспективных методов генерации стабильных ультракоротких импульсов для формирования ЛИППС является использование полностью волоконной схемы резонатора на основе короткого одномодового волокна, где происходит нелинейное вращение поляризации, и длинного волокна с сохранением поляризации, в котором формируется диссипативный солитон. Такой подход позволяет генерировать импульсы с большим параметром чирпа и высокой энергией. Энергия импульса в лазерах на основе стандартных волокон ограничена уровнем ~ 20 нДж, при превышении которого формируется шумовой

импульс в другой спектральной области за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [7].

Для увеличения энергии импульса часто применяют усилители, построенные на основе оптических световодов с большой площадью моды (или Large Mode Area – LMA [8] микроструктурированные фотонно-кристаллические волокна (Photonic Crystal Fibers – PCF) [9, 10], либо активные тейперные волокна с плавно меняющимся диаметром сердцевины вдоль их длины [5, 6]. В работе [11] было показано, что при усилении сигнала тейперным усилителем с центральной длиной волны ~ 1040 нм происходит искажение спектра, и дальнейшее сжатие солитона имеет низкую эффективность. С целью оптимизировать длину волны генерации задающего осциллятора авторы в [12] добавили в кольцевой резонатор дополнительно к фильтру Лио тонкопленочный спектральный фильтр, который стабилизировал длину волны генерации на 1055 нм. В этом случае при усилении тейперным усилителем был достигнут относительно высокий коэффициент усиления сигнала, однако из-за изрезанного характера входного спектра выходной сигнал также содержал шум, что увеличивало подложку в АКФ импульса.

В данной работе проводится исследование возможности создания термохимических ЛИППС с помощью волоконного лазерного источника, генерирующего чирпованные солитоны, сжимаемые внешним компрессором на дифракционных решетках. Были изучены особенности формирования высокоупорядоченных оксидных периодических структур на поверхности металлов и полупроводников при различных условиях облучения.

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 одномодового волокна, в котором происходит синхронизация мод за счет эффекта нелинейного вращения поляризации, и длинного участка (~ 10 м) волокна с сохранением состояния поляризации (PM – polarization maintaining), в котором формируется диссипативный солитон [7]. PM-участок также включает в себя активное волокно с двойной оболочкой, легированное Yb^{3+} (NufemPM-YB-5/130), объединитель накачки, с помощью которого во внешнюю оболочку активного волокна заводится излучение лазерного диода накачки мощностью около 3 Вт на длине волны 980 нм и поляри-

зующий оптический изолятор для реализации однонаправленного распространения волны сигнала. В качестве спектрального фильтра использовался волоконный фильтр Лию.

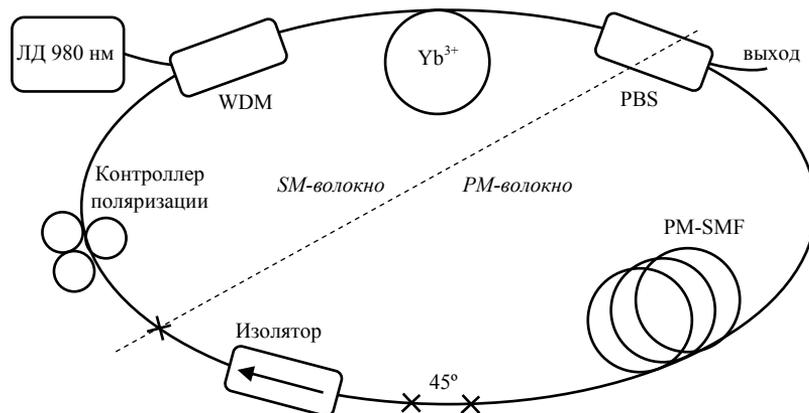


Рис. 1. Схема лазерного источника диссипативных солитонов

Генерируемые импульсы растягивались в отрезке PM-волокна длиной ~ 100 м и направлялись на вход тейпера. Легированное ионами Yb³⁺ тейперное волокно с сохранением поляризации, изготовленное в НЦВО РАН (г. Москва), представляет собой конусообразный световод с двойной оболочкой длиной 2,5 м с диаметром сердцевины 9 мкм на входе и 32 мкм на выходе. Поглощение накачки на длине волны 976 нм в оболочке тейпера составляло ~ 23 дБ/м. Для накачки используется многомодовый лазерный диод мощностью до 60 Вт, излучение которого коллимируется в световедущую оболочку тейпера с его выходного конца. Усиленный полезный сигнал с выхода тейпера направляется дихроичным зеркалом на двухпроходной компрессор с парой дифракционных решеток (1500 штрихов/мм) [13].

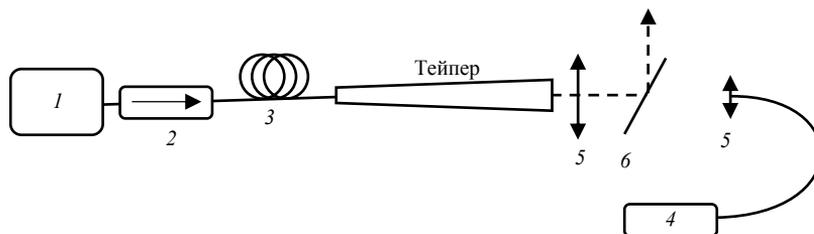


Рис. 2. Схема усиления: 1 – генератор чирпованных импульсов; 2 – изолятор; 3 – стретчер; 4 – многомодовый диод накачки 976 нм мощностью до 60 Вт; 5 – коллиматор; 6 – дихроичное зеркало

Результаты и обсуждение

Задающий генератор, представленный на рис. 1, давал последовательность чирпованных импульсов с оптическим спектром на длине волны 1055 нм длительностью 10 пс и с частотой повторения 14,3 МГц. Средняя мощность задающего лазера составила 20 мВт, что соответствует энергии импульса 1,4 нДж. После волоконного стретчера импульсы растягивались до 130 пс и заводились в усиливающее тейперное волокно. Максимальная выходная мощность полезного сигнала составила 30,2 Вт, что соответствует энергии импульса 2.11 мкДж. Для прореживания импульсов использовался акустооптический модулятор, устанавливающийся непосредственно перед тейперным усилителем. При частоте повторения импульсов 1 МГц максимальная энергия импульса в этом случае составила 16,5 мкДж.

Усиленные импульсы сжимались внешним компрессором на дифракционных решетках. Измеренная длительность сжатого импульса при 13 Вт выходной мощности и частоте повторения 14,3 МГц составила 297 фс (рис. 3) [12].

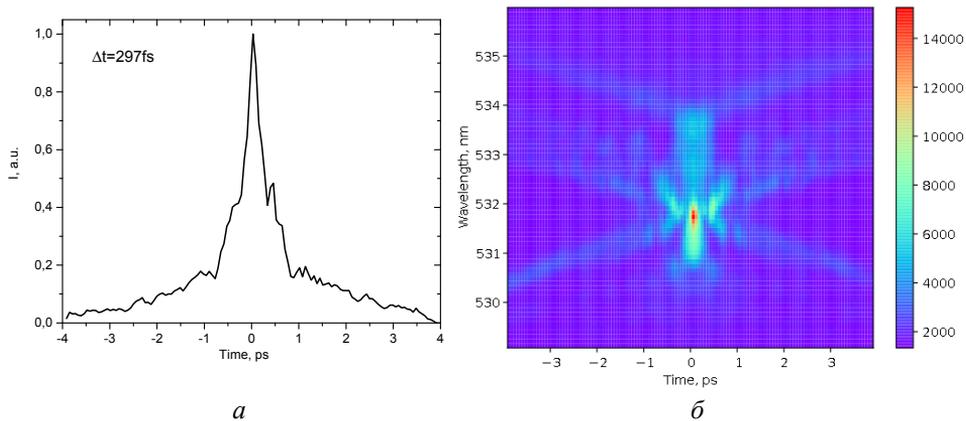


Рис. 3. АКФ (а) и FROG (б) трейсы сжатых после усилителя импульсов

С помощью разработанного волоконного источника ультракоротких импульсов были записаны высокоупорядоченные оксидные периодические структуры на поверхности титана. Излучение лазера фокусировалось с помощью линзы $f = 20$ мм на подложку с нанесенной на нее пленкой титана, направление поляризации излучения задавалось пластинкой $\lambda/2$. С помощью прецизионных микроподвижек осуществля-

лось перемещение образца относительно зондирующего луча с задаваемыми оператором скоростями.

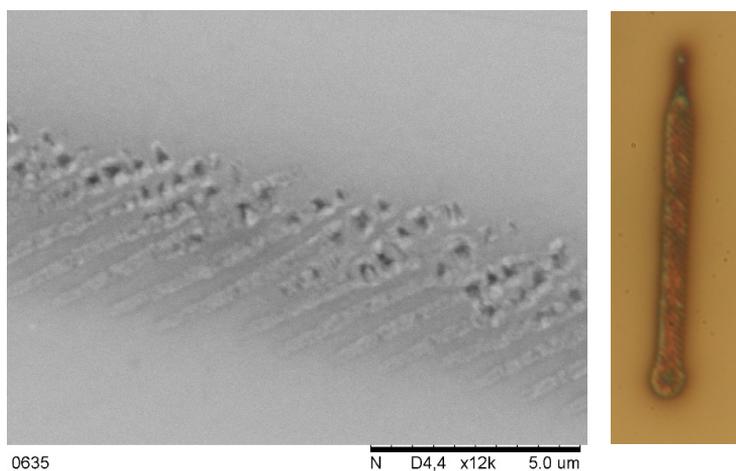


Рис. 4. Изображение СЭМ и с оптического микроскопа ЛИППС при мощности 140 mW (на образце), частоте следования импульсов 2 мГц. Скорость сканирования 1 мкм/с

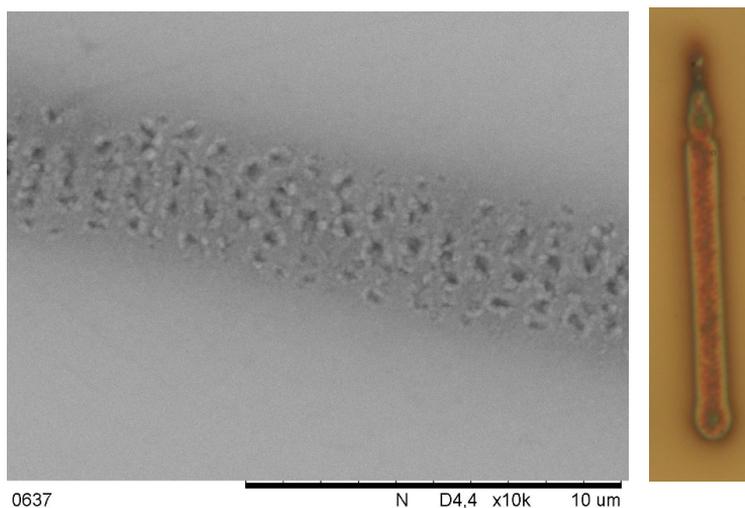


Рис. 5. Изображение СЭМ и с оптического микроскопа ЛИППС при мощности 140 mW (на образце), частоте следования импульсов 2 мГц. Скорость сканирования 1 мкм/с, угол поворота пластики $\lambda/2$ – 12 град

При использовании фемтосекундного волоконного лазера на пленке титана образуются микроструктуры с периодом 822 нм (рис. 4).

ЛИППС имеют неоднородную структуру при несовпадении направления сканирования и направления поляризации. Помимо основной структуры ЛИППС присутствует зона окисления вокруг трека, что, видимо, связано с длинной подложкой в фс импульсе. При повороте пластинки $\lambda/2$ на 12 град наблюдается формирование ЛИППС, при этом структура менее упорядоченная, что может свидетельствовать о выходе из режима записи или не строго линейной поляризации (рис. 5). При большей мощности и частоте следования импульсов происходит избыточное окисление поверхности, и ЛИППС не образуются (рис. 6). Таким образом, существует оптимальное соотношение частоты повторения импульсов и средней мощности, при которой образуются микроструктуры.

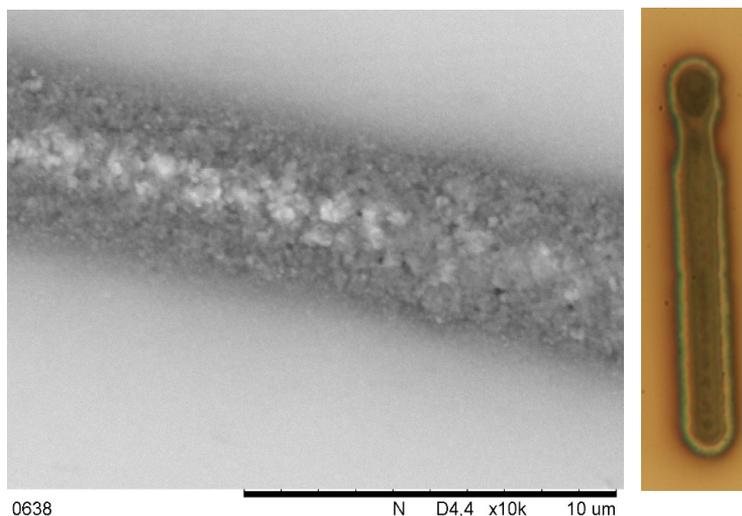


Рис. 6. Изображение СЭМ и с оптического микроскопа ЛИППС при мощности 260 mW (на образце), частоте следования импульсов 5 МГц. Скорость сканирования 1 км/с

Заключение

В работе продемонстрировано формирование ЛИППС с помощью разработанного источника сильно chirпированных диссипативных солитонов с усилителем на основе тейперного волокна. С помощью двухпроходного компрессора с парой дифракционных решеток импульсы были сжаты до ~ 300 фс. При частоте повторения импульсов 2 МГц и средней мощности 140 мВт на пленке титана были сформированы микроструктуры с периодом 822 нм. При увеличении час-

тоты повторения импульсов происходит избыточное окисление, и ЛИППС не формируются.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-32-00459.

Список литературы

1. Vorobyev A.Y., Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications // *Laser Photon. Rev.* – May, 2012. – Vol. 7, no. 3. – P. 385–407.
2. Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment / P. Bizi-Bandoki, S. Benayoun, S. Valette, B. Beaugiraud, E. Audouard // *Appl. Surf. Sci.* – 2011. – Vol. 257, no. 12. – P. 5213–5218.
3. Vorobyev A.Y., Guo C. Colorizing metals with femtosecond laser pulses // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92, no. 4. – P. 041914–3.
4. Selective Cell Control by Surface Structuring for Orthopedic Applications / E. Fadeeva, S. Schlie, J. Koch, and B.N. Chichkov // *J. Adhes. Sci. Technol.* – Jan. 2010. – Vol. 24, no. 13–14. – P. 2257–2270.
5. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory / J. Sipe, J. Young, J. Preston, H. Van Driel // *Phys. Rev. B.* – 1983. – Vol. 27, no. 2. – P. 1141–1154.
6. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses / B. Öktem [et al.] // *Nat. Photonics.* – 2013.
7. 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, no. 19. – P. 4104–4106.
8. 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, no. 15. – P. 16874–16883.
9. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power / T. Eidam [et al.] // *Opt. Express.* – 2011. – Vol. 19, no. 1. – P. 255.
10. 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, no. 5.
11. Amplification of dissipative solitons with a taper fiber amplifier / A. Kuznetsov, D. Kharenko, V. Gonta // *Appl. Photonics.* – Sep. 2017. – Vol. 4, no. 3. – P. 229–236.

12. Kuznetsov A.G., Kharenko D.S., Babin S.A. Amplification of dissipative solitons with a polarisation-maintaining tapered fibre amplifier // *Quantum Electron.* – Dec. 2018. – Vol. 48, no. 12. – P. 1105–1108.

13. 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, no. 2. – P. 1857–1862.

References

1. Vorobyev A.Y., Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications. *Laser Photon. Rev.*, May 2012, vol. 7, no. 3, pp. 385-407.

2. Bizi-Bandoki P., Benayoun S., Valette S., Beaugiraud B., Audouard E. Modifications of roughness and wettability properties of metals induced by femtosecond laser treatment. *Appl. Surf. Sci.*, 2011, vol. 257, no. 12, pp. 5213-5218.

3. Vorobyev A.Y., Guo C. Coloring metals with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92, no. 4, pp. 041914-3.

4. Fadeeva E., Schlie S., Koch J., Chichkov B.N. Selective Cell Control by Surface Structuring for Orthopedic Applications. *J. Adhes. Sci. Technol.*, Jan. 2010, vol. 24, no. 13-14, pp. 2257-2270.

5. Sipe J., Young J., Preston J., Driel Van H. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory. *Phys. Rev. B.*, 1983, vol. 27, no. 2, pp. 1141-1154.

6. Öktem B. et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femtosecond pulses. *Nat. Photonics*, 2013.

7. 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.

8. 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.

9. Eidam T. et al. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 1, p. 255.

10. 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.

11. Kuznetsov A., Kharenko D., Gonta V. Amplification of dissipative solitons with a taper fiber amplifier. *Appl. Photonics.*, Sep. 2017, vol. 4, no. 3, pp. 229-236.

12. Kuznetsov A.G., Kharenko D.S., Babin S.A. Amplification of dissipative solitons with a polarisation-maintaining tapered fibre amplifier. *Quantum Electron.*, Dec. 2018, vol. 48, no. 12, pp. 1105-1108.

13. 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. 1857-62.

Получено 11 марта 2020

УДК 681.7.068

**М.К. Цибиногина^{1,2*}, Я.М. Шарипов^{1,3}, М.К. Осипчук^{1,2},
К.Д. Пищальников¹, К.И. Гагарина², И.А. Перетрухина¹**

¹Пермская научно-производственная
приборостроительная компания, Пермь
²Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь
³Пермский государственный национальный
исследовательский университет, Пермь

ПОВЫШЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АКТИВНОГО КВАРЦЕВОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

Известно, что на уровень «серых» оптических потерь в активных кварцевых волоконных световодах в значительной степени влияет кристаллизация материала сердцевины, в то же время явление кристаллизации в поверхностных слоях волоконных световодов приводит и к снижению их прочности. Повышение температуры вытяжки волокна может благоприятно отразиться на ослаблении указанных процессов кристаллизации.

Ключевые слова: оптические потери, прочность, активные волоконные световоды. MCVD-процесс.

**M.K. Tsibinogina^{1,2*}, Ya.M. Sharipov^{1,3}, M.K. Osipchuk^{1,2},
K.D. Pishchalnikov¹, K.I. Gagarina², I.A. Peretruxhina¹**

¹Perm Scientific and Production Instrument Making Company, Perm
²Perm National Research Polytechnic University, Perm
³Perm State National Research University, Perm

IMPROVING OPTICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE ACTIVE OPTICAL FIBER

It is known, that the level of “gray” optical losses in the active optical fibers is significantly affected by the crystallization of the core material, at the same time, the phenomenon of crystallization in the surface layers of the optical fiber leads to a decrease in their strength. The temperature of the drawn fiber can have a positive impact in terms of weakening of the processes of crystallization.

Keyword: optical losses, strength, active optical fibers, MCVD process.

Введение

Кристаллизация материала сердцевины влияет на уровень «серых» оптических потерь в активных волоконных световодах на основе кварцевого стекла [1]. Мощность и ширина спектра излучения усилителя волоконно-оптического гироскопа (ВОГ) определяются степенью однородности распределения ионов редкоземельных элементов (эрбия) в материале сердцевины ВС. Для снижения уровня кластеризации ионов эрбия в матрицу стекла сердцевины вводят оксид алюминия, который обладает самым низким уровнем затухания [2], позволяя тем самым повышать температуру вытяжки [3]. Увеличение температуры вытягивания ВС также целесообразно для повышения их механической изгибоустойчивости [4, 5], а дополнительное легирование сердцевины GeO_2 увеличит оптическую изгибоустойчивость ВС в многовитковом контуре усилителя ВОГ.

Цель настоящей работы заключается в снижении уровня «серых» потерь и увеличении прочности активных ВС, применяемых в широкополосном источнике излучения ВОГ – усилителе спонтанной эмиссии.

Эксперимент

Заготовки для вытягивания активных ВС изготавливали MCVD-хелатной технологией [6] на основе труб из кварцевого стекла марки Suprasil F-300. Сердцевина легирована 6 моль % Al_2O_3 , 0,1 моль % Er_2O_3 , 4 моль % GeO_2 . Элементный состав в поперечном сечении заготовок ВС определяли методом рентгеновского микроанализа (РМА) с помощью сканирующего электронного микроскопа «Tescan Vega 3». Расчетный профиль показателя преломления сердцевины заготовок через измеренные концентрации элементного состава совпал с измеренным в заготовке с помощью анализатора заготовок РК-2600 фирмы «Photon Kinetics» (рис. 1).

Вытягивание световодов производили с одновременным нанесением двухслойного акрилатного покрытия при температуре нагревателя печи вытяжной установки 1900 и 2000 °С.

Оптические потери измеряли на анализаторе оптического спектра AQ6370D фирмы «Yokogawa» с точностью $\pm 0,2$ дБ/км методом обрыва согласно ГОСТ Р МЭК 793-1 -С 1. В качестве источника белого света выбрали излучатель «Thorlabs SLS201». Сравнивали мощности оптического излучения, измеренные при неизменных условиях ввода излучения на выходе измеряемого образца активного ВС и входе. Вычис-

ленное значение мощности выбирали на длине волны «серых» оптических потерь для активных световодов – 1200 нм.

Прочность световодов определяли методом разрыва с помощью разрывной машины AVE2 Extensometer фирмы Instron согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-31.

При увеличении температуры вытяжки волокна «серые» оптические потери ВС снизились с 6 до 5 дБ/км на длине волны 1200 нм (рис. 2), и исчезла низкопрочная ветвь статистики разрушения волокна (рис. 3).

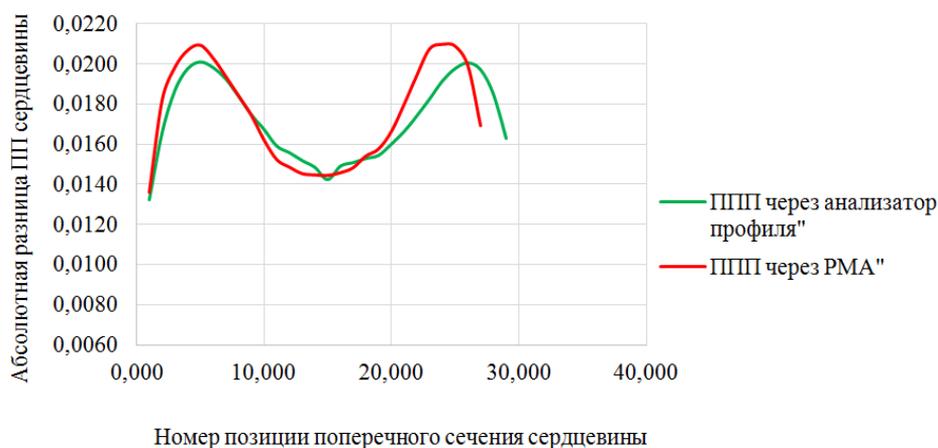


Рис. 1. ППП сердцевин заготовки активного ВС для образца 2

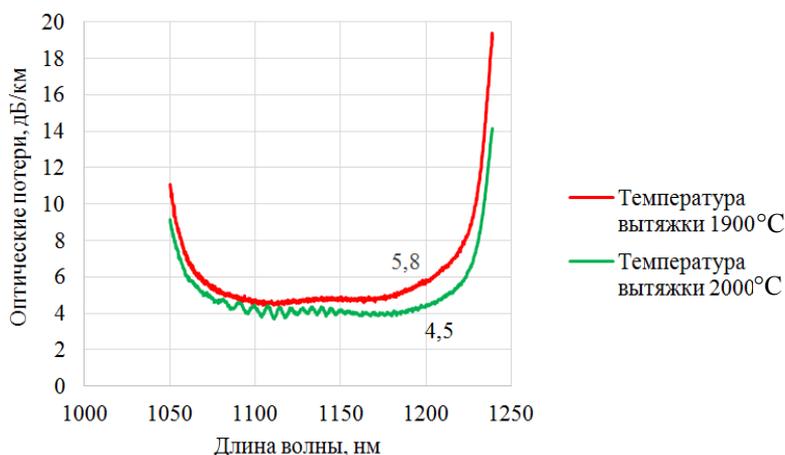


Рис. 2. Оптические потери ВС, полученных при температурах вытяжки 1900 и 2000 °С

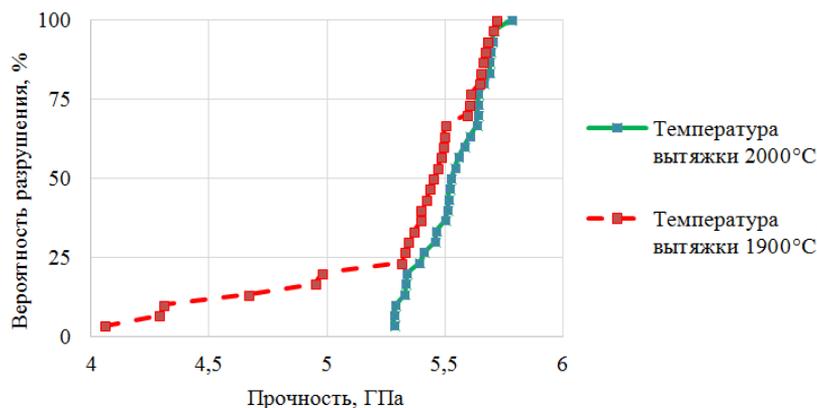


Рис. 3. Статистика прочности ВС, полученных при температурах вытяжки 1900 и 2000 °С

Заключение

Результаты исследований свидетельствуют о благотворном влиянии повышения температуры вытягивания активированных эрбием ВС как на их оптические, так и на механические свойства. Предположительно, снижение оптических потерь при увеличении температуры вытягивания обусловлено уменьшением рассеяния света на кристаллизованных частицах алюмосиликатного стекла сердцевины [3]. Увеличению механической прочности способствует уменьшение ликвации, кристаллизации в поверхностных областях кварцевого стекла при увеличении температуры или усилия вытягивания кварцевого волокна [4, 5]. Стекло является аморфным материалом, где атомы расположены беспорядочно. Кристаллизация происходит при температурах между температурой плавления и температурой затвердевания стекла. Выше температуры плавления присутствует только жидкая фаза. Когда температура падает ниже температуры плавления, начинает кристаллизоваться твердая фаза. Если скорость охлаждения медленная, атомы успевают выстраиваться в кристаллическую форму. Кристаллизации можно избежать при быстром охлаждении материала, что соответствует большей температуре вытяжки или скорости вытяжки.

Активный ВС, полученный при температуре 2000 °С, отличающийся низкими потерями и стабильной механической прочностью, испытан в составе широкополосного источника ВОГ в диапазоне температур от минус 50 до +60 °С. Ширина оптического спектра его излучения соответ-

вовала требуемому значению – не менее 7,3 нм по уровню 0,5 выходной мощности во всем температурном диапазоне (рис. 4).

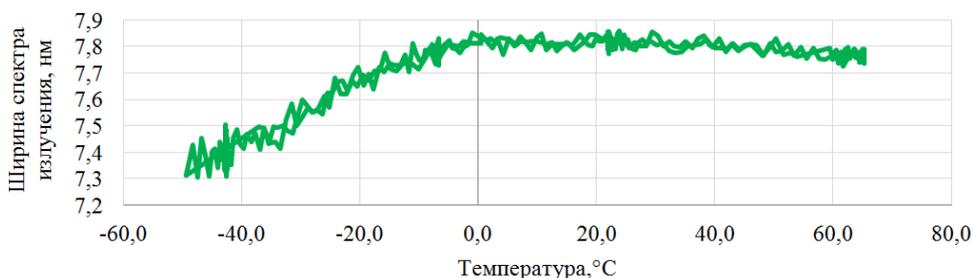


Рис. 4. Зависимость ширины оптического спектра излучения усилителя от температуры

Список литературы

1. Dopant interactions in high-power laser fibers / J. Kirchhof [et al.] // Proc. SPIE – 2005. – № 5723.
2. Бурков В.Д., Иванов Г.А. Физико-технологические основы волоконно-оптической техники: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУЛ, 2007. – С. 126–132.
3. Влияние условий вытяжки на уровень серых потерь в алюмосиликатных волокнах, полученных по технологии парофазного легирования / С. Чампель [и др.] // Фотон-экспресс. – 2015. – № 6 (126). – С. 131–132.
4. Влияние физико-химического состояния примесей на прочность кварцевого волокна / М.А. Ероньян [и др.] // Физика и химия стекла. – 2006. – № 32. – С. 855–862.
5. Влияние ликвационного распада кварцевого стекла, содержащего примесь на прочность световодов / М.К. Цибиногина [и др.] // Прикладная оптика – 2006: сб. тр. VII Междунар. конф. – 2006. – С. 43–45.
6. Lenardich B. Vapor phase deposition process for fabrication of sensor for fabrication of sensor and specialty optical fiber preforms // Informacije MIDEM. – 2010. – № 40. – С. 300–306.

References

1. Kirchhof J. et al. Dopant interactions in high-power laser fibers. Proc. SPIE, 2005, no. 5723.

2. Burkov V.D., Ivanov G.A. Fiziko-tehnologicheskie osnovy volokonno-opticheskoi tekhniki [Physical and technological fundamentals of fiber-optic technology]. Moscow.: Moskovskii gosudarstvennyi universitet lesa, 2007, pp. 126–132.

3. Champel' S. et al. Vliianie uslovii vytyazhki na uroven' serykh poter' v aliumosilikatnykh voloknakh, poluchennykh po tekhnologii parofaznogo legirovaniia [Influence of drawing conditions on the level of gray losses in aluminosilicate fibers obtained by vapor-phase alloying technology]. *Foton-ekspress*, 2015, no. 6(126), pp. 131–132.

4. Eron'ian M.A. et al. Vliianie fiziko-khimicheskogo sostoianiia primesei na prochnost' kvartseвого volokna [Influence of the physicochemical state of impurities on the strength of quartz fiber]. *Fizika i khimii stekla*, 2006, no. 32, pp. 855-862.

5. Tsibinogina M.K. et al. Vliianie likvatsionnogo raspada kvartseвого stekla, sodержashchego primes' na prochnost' svetovodov [Effect of liquation decomposition of quartz glass containing impurities on the strength of optical fibers]. *Prikladnaia optika - 2006. Sbornik trudov VII Mezhdunarodnoi konferentsii*, 2006, pp. 43-45.

6. Lenardich B. Vapor phase deposition process for fabrication of sensor for fabrication of sensor and specialty optical fiber preforms. *Informacije MIDE M*, 2010, no. 40, pp. 300-306.

Получено 20 марта 2020

УДК 681.7.068

**А.С. Вахрушев^{1,3}, Д.И. Нурмухаметов^{1,4},
О.Л. Вохмянина^{1,3}, И.С. Азанова^{1,3}, М.В. Яшков²**

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия
²Институт химии высокочистых веществ, Нижний Новгород, Россия
³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия
⁴Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОРИСТОГО СЛОЯ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА НА ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ ПРОПИТКИ

При изготовлении активных волокон методом пропитки важна равномерность распределения легирующих элементов по поперечному сечению волноводной преформы. Показано, как структура пористого слоя кварцевого стекла влияет на результаты пропитки волноводной преформы раствором ионов эрбия.

Ключевые слова: пористый слой, активное оптическое волокно, СЭМ.

**A.S. Vakhrushev^{1,3}, D.I. Nurmukhametov^{1,4},
O.L. Vokhmyanina^{1,3}, I.S. Azanova^{1,3}, M.V. Yashkov²**

¹Perm Scientific and Production Instrument Making Company, Perm, Russia
²Institute of Chemistry of High-Purity Substances, Nizhny Novgorod, Russia
³Perm State National Research University, Perm, Russia
⁴Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

THE INFLUENCE OF THE POROUS LAYER STRUCTURE OF QUARTZ GLASS ON THE ACTIVE OPTICAL FIBERS MANUFACTURING PROCESS BY IMPREGNATION METHOD

The uniformity of the distribution of alloying elements along the cross -section of the waveguide preform is important for manufacturing active fibers by impregnation method. It is shown that the porous layer structure of quartz glass affects on the results of waveguide preform by impregnation method with a solution of erbium ions.

Keywords: porous layer, active optical fiber, SEM.

Введение

При изготовлении активных волокон метод пропитки пористого слоя кварцевого стекла применяется достаточно давно из-за относительной простоты [1], при этом остаются вопросы по повторяемости оптических свойств волокон, изготовленных из разных преформ. Требование повторяемости результатов особенно актуально для промышленного серийного производства.

Процесс пропитки состоит из нескольких стадий. Первая стадия – формирование пористого слоя кварцевого стекла в опорной трубе, например, методом MCVD. В зависимости от режимов формирования пористый слой может иметь различную структуру и размер пор, что подтверждают исследования, проведенные с помощью сканирующего электронного микроскопа [2].

В данной работе исследовалась равномерность распределения легирующих элементов по сечению преформы в зависимости от структуры пористого слоя кварцевого стекла при изготовлении активных оптических волокон, легированных ионами эрбия.

Образцы и методика исследования

В работе исследовались образцы пористого слоя кварцевого стекла и образцы этой же преформы после пропитки раствором, содержащим ионы алюминия и эрбия.

При изготовлении образцов пористого слоя методом MCVD варьировали расходы хлорида кремния (SiCl_4) (до 2 раз) при неизменном расходе хлорида германия (GeCl_4), а также температурную обработку слоя перед процессом пропитки – изменялось количество проходов горелки при «припекании» пористого слоя (табл. 1). Процесс припекания необходим для обеспечения адгезии пористого слоя к опорной трубе.

Таблица 1

Режимы изготовления пористого слоя

Номер образца	Расход SiCl_4	Число проходов припекания
1	A	B
2	2A	B
3	2A	B-1

В таблице не указаны точные значения расходов и число проходов припекания, так как данные параметры очень индивидуальны и опти-

мальные значения будут изменяться в зависимости от используемого оборудования. Поэтому в данной работе сделан акцент на методологию исследования структуры пористого слоя при разных режимах осаждения.

Опорную трубу с осажденным пористым слоем разделяли на две части, от одной из которых отрезали шайбы длиной примерно 25 мм. Вторую часть пропитывали раствором, содержащим ионы алюминия и эрбия. После просушки от преформы также отрезали шайбы длиной примерно 25 мм. Полученные шайбы разрезались вдоль, и внутренняя поверхность анализировалась с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3, разрешение которого составляет 3 нм при напряжении 30 кВ и 8 нм при напряжении 3 кВ, а увеличение от $3\times$ до $1\,000\,000\times$ (увеличение указано для изображения шириной 5 дюймов).

Результаты анализа структуры пористого слоя

Структура пористого слоя при первоначальных расходах хлоридов (образец № 1) довольно неравномерная, размер пор варьируется от 0,5 до 4 мкм (табл. 2, рис. 1).

Увеличение расходов хлорида кремния без изменения температурной обработки (образец № 2) позволило получить значительно более однородную структуру пористого слоя относительно размера пор (табл. 1, рис. 2). При этом размер пор оказался чуть больше, чем размер максимальный размер пор в предыдущем случае, минимальный размер пор составил 2,5 мкм, а максимальный – 5 мкм.

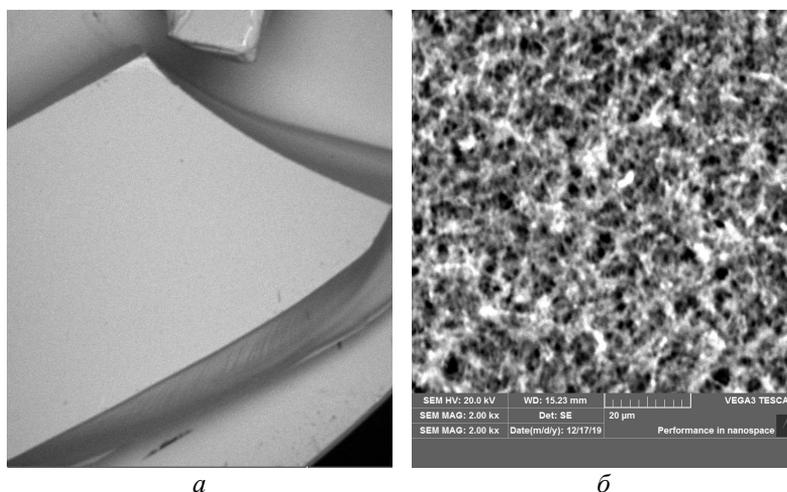


Рис. 1. Изображение непропитанного пористого слоя при первоначальных расходах хлоридов: *a* – общий вид; *б* – увеличение в 2000х

Таблица 2

Диаметр пор в структуре пористого слоя
в зависимости от расхода SiCl_4

SiCl_4	Начальный расход	Увеличенный в 2 раза
Диаметр пор	От 0,5 до 4 мкм	Примерно 5 мкм

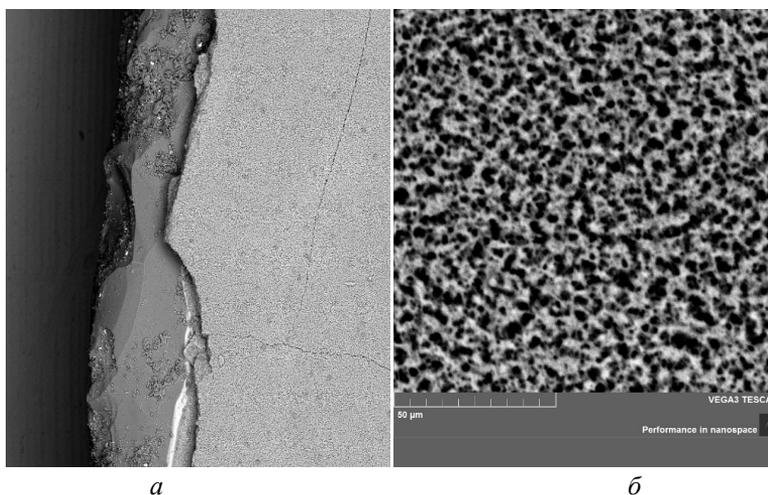


Рис. 2. Изображение непропитанного пористого слоя при измененных расходах SiCl_4 : *a* – общий вид; *б* – увеличение в 1000х

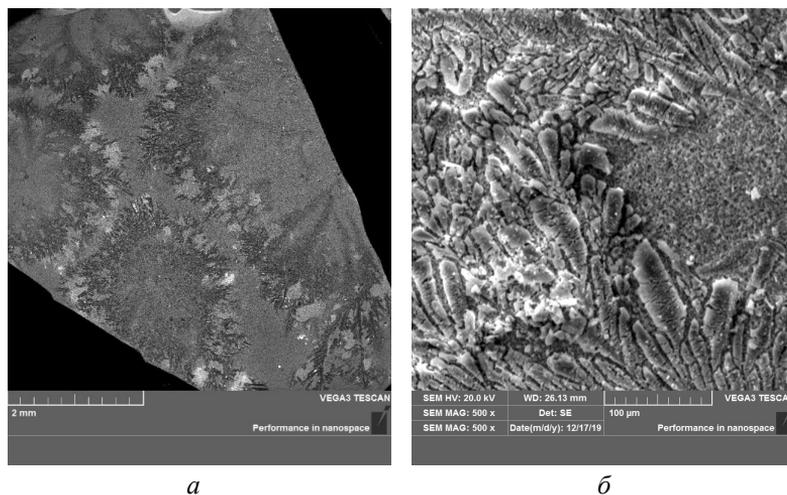


Рис. 3. Изображение пропитанного пористого слоя при первоначальных расходах хлоридов: *a* – общий вид; *б* – увеличение в 500х

Структура пористого слоя отражается на результатах пропитки.

Структура пропитанного пористого слоя при первоначальных расходах хлоридов довольно неоднородна, заметно, что помимо областей кристаллизации наблюдаются свободные участки пористого слоя (рис. 3). Скорее всего, это результат рыхлой и неравномерной структуры самого пористого слоя.

Более однородная структура пористого слоя при увеличении расхода хлорида кремния положительно отразилась на результате пропитки, свободных участков пористого слоя не наблюдается (рис. 4).

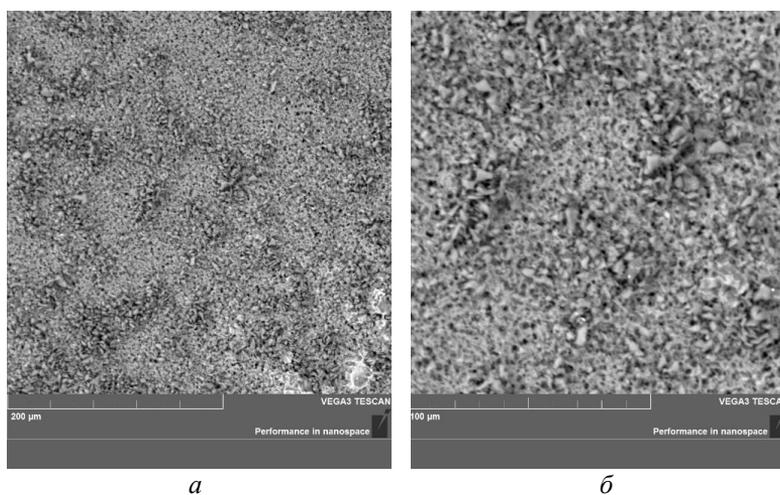


Рис. 4. Изображение пропитанного пористого слоя при измененных расходах SiCl_4 : *a* – увеличение в 200х; *б* – увеличение в 1000х

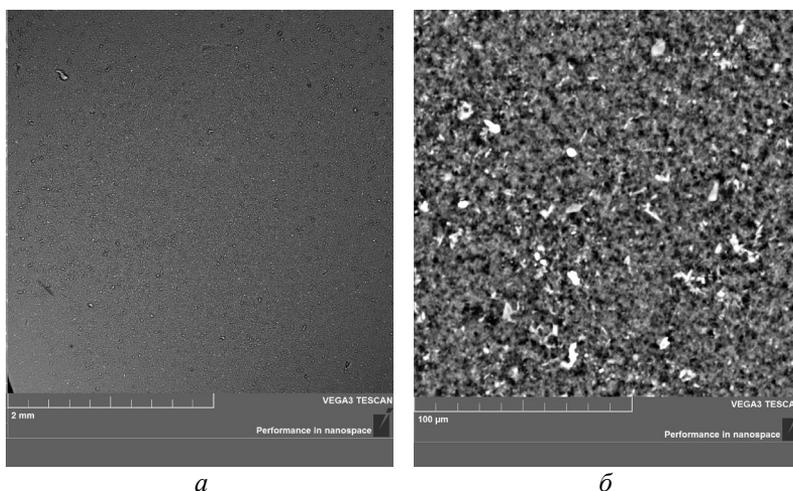


Рис. 5. Изображение непропитанного пористого слоя при первоначальных расходах: *a* – общий вид; *б* – увеличение в 1000х

Оказалось, про процесс припекания также влияет на структуру пористого слоя, что, в свою очередь, влияет на результаты пропитки.

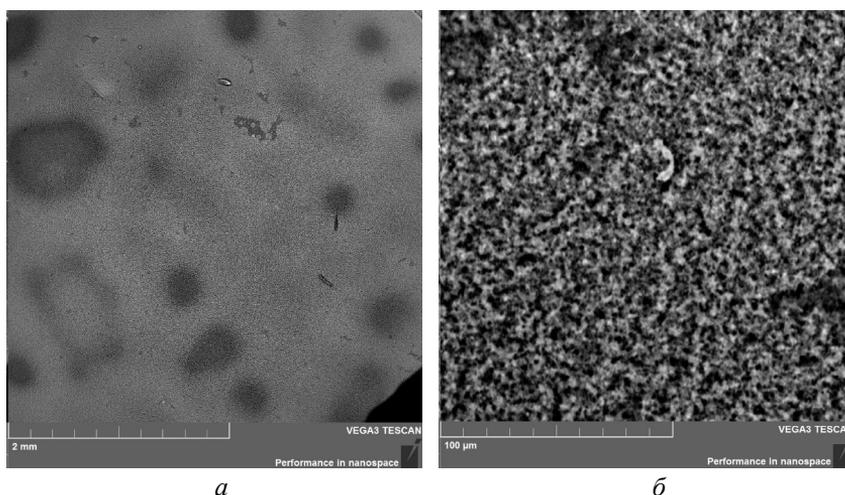


Рис. 6. Изображение пропитанного пористого слоя при измененных расходах: *a* – общий вид; *б* – увеличение в 1000х

Из анализа структуры пористого слоя образца № 3 с меньшим числом проходов припекания (рис. 5) наблюдаются небольшие участки не-пропечённого пористого слоя. И пропитанные раствором участки такого слоя выглядят иначе, нежели в предыдущих случаях (рис. 6) – по всей структуре пористого слоя прослеживаются пятна досушенного раствора.

Заключение

Изменение расхода SiCl_4 и числа проходов припекания напрямую влияет на формирование структуры пористого слоя. В нашем случае неоптимальные расходы SiCl_4 так же, как и недостаточное число проходов припекания, привело к ухудшению пористого слоя и последующей пропитки пористого слоя.

Данные результаты также могут быть применены в изготовлении оптических волокон с нелегированной кварцевой сердцевиной, в которых аналогичным образом осаждается пористый слой [3].

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. (Соглашение № 075-11-2019-059 от 22 ноября 2019 г.).

Список литературы

1. Радиационно-стойкие одномодовые оптические волокна с кварцевой сердцевиной / И.И. Долгов, Г.А. Иванов, Ю.К. Чаморский, М.Я. Яковлев // Фотон Экспресс. – 2005. – № 6 (46). – С. 4–10.
2. An Improved Method of Fabricating Rare Earth Doped Optical Fiber Ranjan Sen and Anirban Dhar CSIR-Central Glass & Ceramic Research Institute. – Kolkata, India, 2012. – С. 73–94.
3. Иванов Г.А., Первадчук В.П. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – С. 171.

References

1. Dolgov I.I., Ivanov G.A., Chamorskii Yu.K., Iakovlev M.Ia. Radiatsionno-stoikie odnomodovye opticheskie volokna s kvartsevoi serdtsevinoi [Radiation-hardened silica-core single-mode optical fibers] *Foton Ekspress*, 2005, no. 6(46), pp. 4-10.
2. An Improved Method of Fabricating Rare Earth Doped Optical Fiber Ranjan Sen and Anirban Dhar CSIR-Central Glass & Ceramic Research Institute. Kolkata, India, 2012, pp. 73-94.
3. Ivanov G.A., Pervadchuk V.P. Tekhnologiya proizvodstva i svoistva kvartsevykh opticheskikh volokon [Manufacturing technology and properties of quartz optical fibers]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2011, 171 p.

Получено 21 марта 2020

УДК 621.373.8

**Д.А. Селезнев^{1,2}, М.В. Ременникова^{1,2,3},
А.А. Заболотных^{1,2}, Р.Р. Кашина²**

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

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

³Пермский федеральный исследовательский
центр УрО РАН, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННОГО ИМПУЛЬСНОГО ГОЛЬМИЕВОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

В работе рассматривается реализация полностью волоконного импульсного гольмиевого лазера для применения в медицине. В качестве источника накачки использован иттербиевый лазер на длине волны 1125 нм, импульсный режим осуществлен за счет пассивной модуляции добротности. На выходе гольмиевого лазера получено излучение на длине волны 2050 нм с максимальной пиковой мощностью 44,4 Вт. Длительность импульса составила при таком режиме 180 нс, а энергия импульса – 8 мкДж. На основе анализа полученных выходных данных сделаны выводы о пригодности данной схемы для создания медицинского хирургического прибора.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, импульсный режим, медицинский лазер, иттербиевый лазер, пассивный затвор, модуляция добротности.

**D.A. Seleznev^{1,2}, M.V. Remennikova^{1,2,3},
A.A. Zabolotnykh^{1,2}, R.R. Kashina²**

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²PJSC "Perm Scientific and Production
Instrument Making Company", Perm, Russia

³Perm Federal Research Center, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

DEVELOPMENT OF PULSE FIBER HOLMIUM LASER FOR MEDICAL USE

In the article, a fully fiber pulsed holmium laser was implemented for use in medicine. An ytterbium laser at a wavelength of 1125 nm was used as a pump source, and the pulsed mode was achieved due to passive Q switching. At the output, radiation was obtained at a wavelength of 2050 nm with a maximum peak power of 44.4 watts. In this mode, the pulse duration was 180 ns, and the pulse

energy was 8 μJ . Based on the analysis of the obtained output data, conclusions were drawn about the suitability of this scheme for creating a medical surgical device.

Keyword: holmium fiber laser, pulsed mode, medical laser, ytterbium laser, passive shutter, Q-switching.

Введение

Волоконные лазеры пользуются широким спросом в области медицины. Они позволяют заменить громоздкие объемные лазерные установки на более компактные. На сегодняшний день лазер – это универсальная высокотехнологичная медицинская оптическая система, имеющая высокий уровень надежности и точности, которая, в свою очередь, повышает скорость, качество и эффективность хирургических операций [1].

Биологические ткани содержат в себе более 70 % воды. Исходя из зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в воде, видно, что чем дальше длина волны источника излучения в области ИК-излучения, тем выше коэффициент поглощения (рис. 1), а значит, удаление ткани происходит эффективнее. Излучение дальнего ИК-диапазона может вызвать побочные явления, связанные с распространением возникающей акустической волны, наведенной в биоткани при быстром выносе материала из лазерной раны. Поэтому генерация волоконных лазеров в диапазоне от 1900 до 2100 нм представляет особый интерес, в частности, для проведения малоинвазивных эндоскопических операций. Излучение гольмиевого лазера эффективно удаляет ткани, а также хорошо коагулирует сосуды размером до 0,5 мм, что вполне достаточно для большинства хирургических вмешательств и не провоцирует побочные эффекты.

Для обеспечения лазерной генерации в выбранном диапазоне необходимо использовать оптическое волокно с активными добавками ионов гольмия, обеспечивающих диапазон генерации от 1900–2100 нм. В настоящее время с использованием волокон, легированных ионами гольмия, продемонстрирована лазерная генерация в диапазоне 2–2,21 мкм [2]. Максимальная полученная выходная мощность составила 140 Вт, а квантовая эффективность – 0,81 [3]. Благодаря волоконной архитектуре лазера он имеет малые размеры, высокую эффективность и точность, не требует постоянной юстировки и водяного охлаждения [4].

Сочетание физических параметров излучения гольмиевого лазера оказалось оптимальным для целей хирургии, что позволило ему найти многочисленные способы применения в самых различных об-

ластях медицины [5]. Поэтому целью данной работы является разработка высокоэффективного полностью волоконного гольмиевого лазера для использования в хирургии.

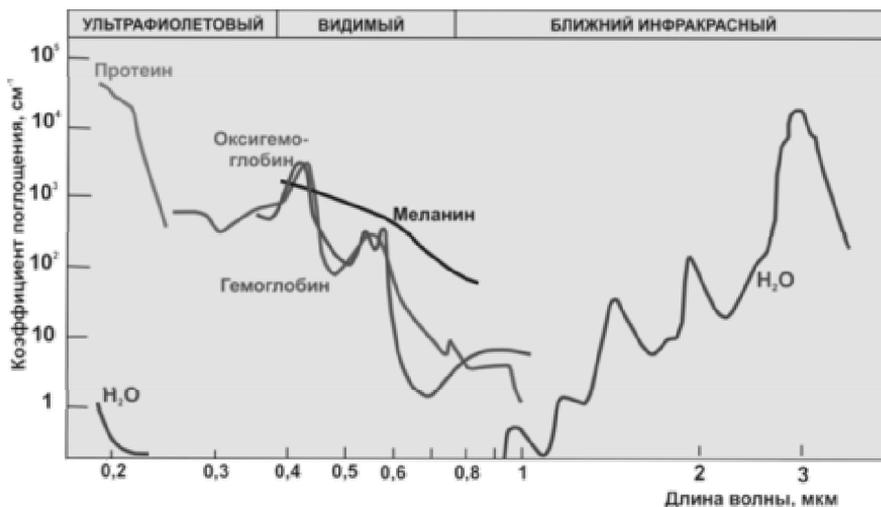


Рис. 1. Спектр поглощения протеина, оксигемоглобина, гемоглобина, меланина и воды в зависимости от длины волны излучения [1]

Еще одно преимущество двухмикронного излучения в его безопасности для глаз. Чувствительность тканей глаза сравнительно мало отличается от чувствительности других тканей, в частности, кожи и слизистых оболочек, однако в силу фокусирующих свойств оптической системы глаза плотность излучения на сетчатке резко возрастает. Именно поэтому структуры глаза, и в первую очередь сетчатка, являются основным критическим органом по отношению к лазерному излучению. Лазерное излучение с длинами волн 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм воздействует на передние среды глаза и является более безопасным, чем лазерное излучение в диапазоне длин волн 0,38 – 1,4 мкм [6].

1. Источник накачки для гольмиевого активного волокна

Источник накачки для гольмиевого лазера реализован в виде волоконного иттербиевого лазера, генерирующего излучение в непрерывном режиме. Такая активная среда для накачки гольмия выбрана в связи процессом ап-конверсии между ионами Ho^{3+} и Yb^{3+} [7].

Процесс ап-конверсии реализуется для пары ионов $\text{Ho}^{3+} - \text{Yb}^{3+}$. На рис. 2 приведена схема энергетических уровней ионов Ho^{3+} и Yb^{3+} . Стрелками показаны возможные механизмы заселения энергетических уровней ионов Ho^{3+} и переходы, которые создают люминесценцию.

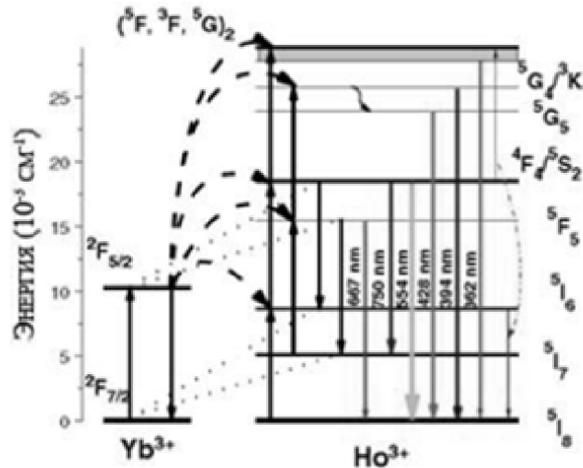


Рис. 2. Схема энергетических уровней ионов Ho^{3+} и Yb^{3+} и предполагаемые механизмы возбуждения ап-конверсионной люминесценции ионов в УФ, видимой, ближней ИК-областях спектра [8]

Ион иттербия обладает высоким эффективным сечением поглощения в инфракрасной области ($\sigma = 1,78 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$) и поэтому является перспективным для использования в качестве донора-сенситизатора. Ион гольмия (активатор) обеспечивает большое время жизни метастабильных состояний (миллисекунды), на которые происходит передача энергии. Такая система позволяет существенно улучшить интенсивность излучения ап-конверсионной люминесценции путем передачи энергии от Yb^{3+} в возбужденные состояния гольмия.

Для накачки иттербиевого волокна использован лазерный диод ВВТ с многомодовым волоконным выходом (105/125 мкм). Для дальнейшего исследования эффективности лазерного излучения снята зависимость выходной мощности излучения от тока накачки (рис. 3).

Оценка временной стабильности выходной мощности диода проведена при токе накачки 1,5 А. Для этого прописана выходная мощность в течение 4,7 ч. На рис. 4 представлена зависимость нормированной выходной мощности от времени работы диода. Сразу после включения выходная мощность диода накачки составляет 97 % от мак-

симального значения. Затем наблюдается постепенный рост выходной мощности, и через 10 мин мощность достигает 98 %, а через 40 мин – 99 %. Наиболее стабильный режим наблюдается после 1 ч работы, здесь наблюдаются колебания выходной оптической мощности в пределах 1 %. Такие отклонения мощности источника накачки (до 3 %) не вносят существенного вклада в стабильность всей волоконной системы и не влияют на время выхода на режим, поэтому лазерный прибор можно использовать сразу после включения.

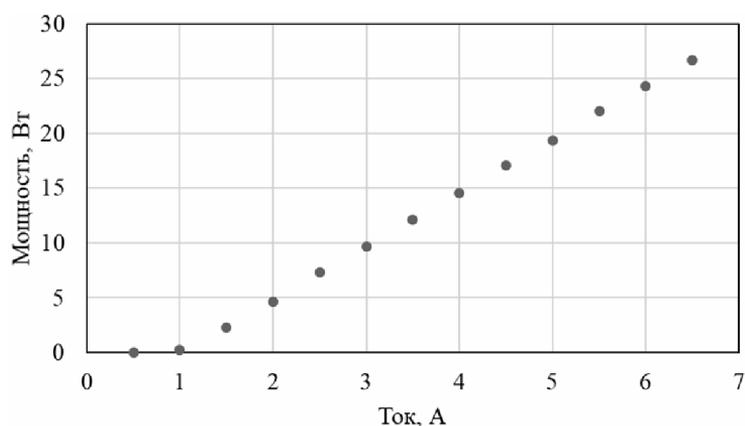


Рис. 3. Ватт-амперная характеристика диода накачки

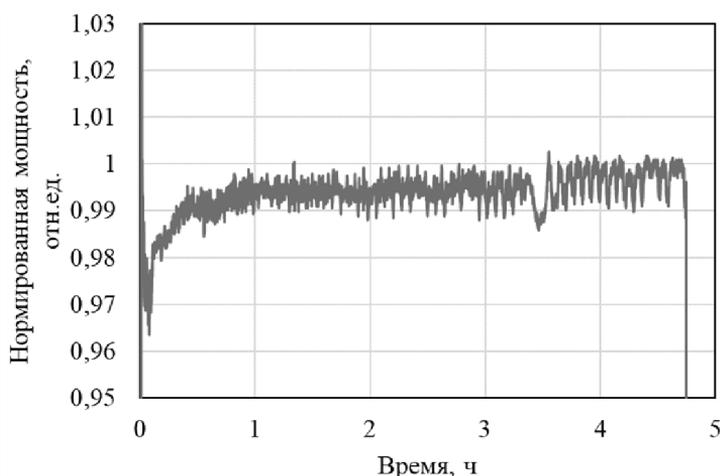


Рис. 4. Зависимость нормированной выходной мощности от времени работы диода

Для создания резонатора непрерывного иттербиевого лазера необходимы волоконные брэгговские решетки (ВБР), соответствующие

диапазону генерации ионов иттербия, одна из которых должна иметь коэффициент отражения, близкий к 100 %, а вторая должна быть малоотражающей. Для определения точных параметров ВБР измерен спектр пропускания, из которого рассчитан коэффициент отражения (рис. 5).

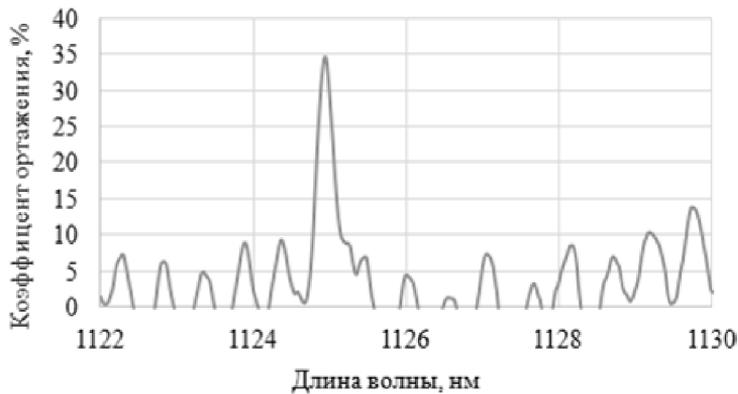


Рис. 5. Спектр решетки с коэффициентом отражения 35 % на 1125 нм

В качестве рабочей среды иттербиевого лазера (рис. 6) использовано активное оптическое волокно с многоэлементной первой оболочкой (МПО-волокно) [9], легированное ионами иттербия. Более известный из иностранной литературы как GTWave-волокно [10] он позволяет использовать большие мощности для накачки активной среды, получать высокую генерацию без разрушения сердцевины волокна.

Схема иттербиевого лазера, изображенная на рис. 6, реализована из отрезка GTWave-волокна длиной 25 м, высокоотражающей и малоотражающей ВБР. Для получения максимальной эффективности схемы экспериментально выполнен подбор выходной полупрозрачной ВБР из двух решеток с коэффициентами отражения 25 и 35 %.



Рис. 6. Схема экспериментального иттербиевого лазера

На рис. 7 продемонстрирована ватт-амперная характеристика иттербиевого лазера накачки в зависимости от решетки.

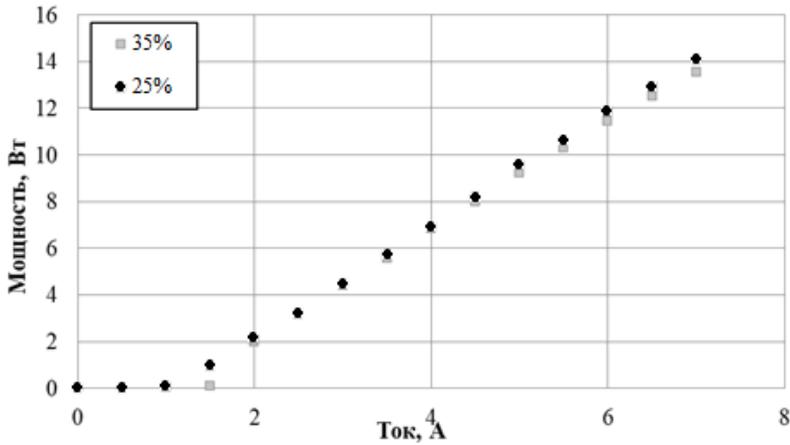


Рис. 7. Ватт-амперная характеристика иттербиевого лазера в зависимости от ВБР

Из рис. 7 видно, что иттербиевый лазер с установленной на выходе ВБР с коэффициентом отражения 25 % эффективнее, чем с ВБР с коэффициентом отражения 35 %. С помощью анализатора оптического спектра Yokogawa 6370D получен спектр выходного излучения (рис. 8).

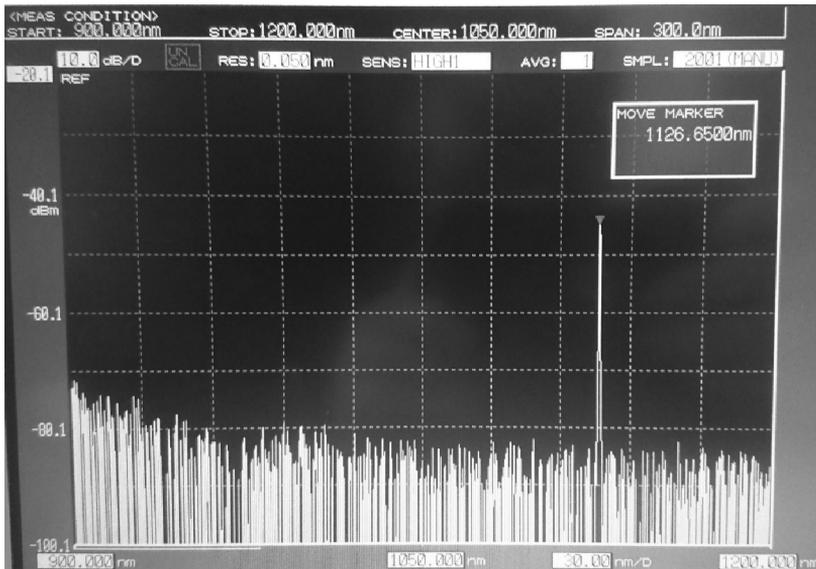


Рис. 8. Спектр выходного излучения

2. Гольмиевый волоконный лазер

Гольмиевый лазер реализован по предложенной схеме (рис. 9). Данная схема энергетически эффективнее, так как имеет всего один диод накачки, и при этом выходная мощность не отличается от других схем гольмиевого волоконного лазера [11].

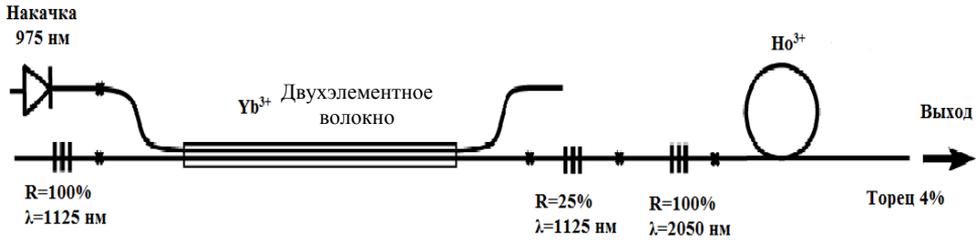


Рис. 9. Схема гольмиевого лазера

Расчет эффективной длины активного волокна произведен, исходя из измерения поглощения на одном метре по формуле:

$$L_k = \frac{10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}}{x},$$

$$L_k = \frac{40 \text{ Дб}}{7 \text{ Дб/м}} \approx 6 \text{ м},$$

где P_2 – остаточная оптическая мощность от накачки; P_1 – входная мощность излучения; x – потери на длине волны 2050 нм.

Эффективной длиной активного волокна является длина 6 м.

При сборке предложены две различные высокоотражающие решетки на длине волны 2050 нм: с коэффициентом отражения 100 и 90 %. С противоположного конца в роли малоотражающей решетки использован ровно сколотый торец волокна. Коэффициент отражения составил 4 % – френелевское отражение. Результаты выходной мощности в зависимости от величины тока накачки при различных высокоотражающих решетках представлены на рис. 10.

Для генерации импульсного режима собрана схема с пассивным оптическим затвором [12] (рис. 11).

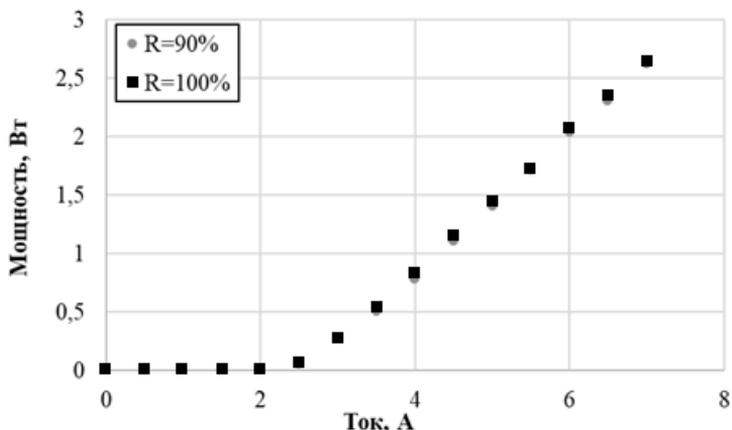


Рис. 10. Ватт-амперная характеристика Ho-лазера, при различных ВБР

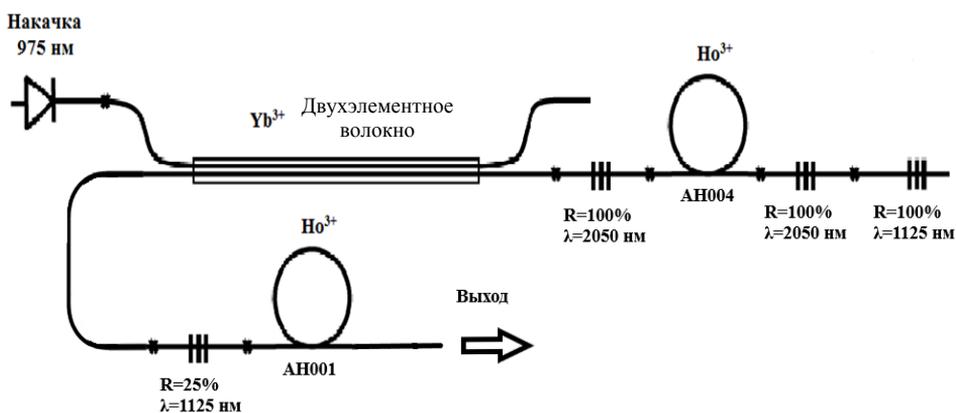


Рис. 11. Схема импульсного гольмиевого лазера

В качестве оптического затвора выбрано Ho-волокно. Длина оптического волокна, использованного в качестве затвора, подобрана экспериментальным путем и равна длине гольмиевого волокна, генерирующего лазерное излучение, т.е. равна 6 м. Для вычисления пиковой мощности промерена средняя мощность с помощью фотоприемника. Ватт-амперная характеристика представлена на рис. 12.

Максимально чистый импульсный режим достигнут при силе тока в 2 А. При дальнейшем увеличении силы тока увеличивалась частота импульса, максимально возможный ток, при котором возникает импульсный режим для данной схемы, равен 4 А. На рис. 13 представлен импульсный режим при токе в 2 А.

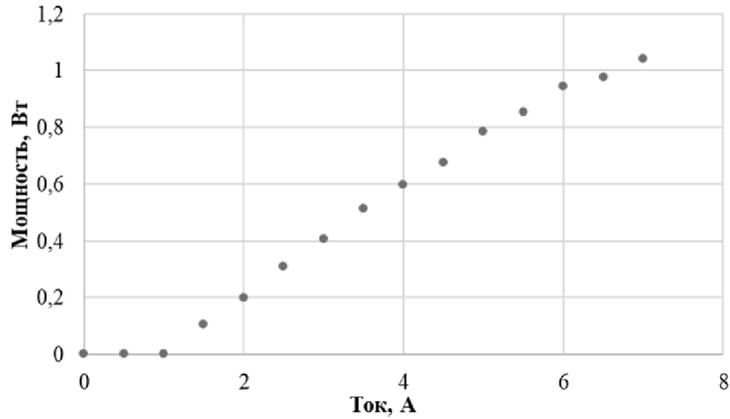


Рис. 12. Ватт-амперная характеристика импульсного Ho-лазера

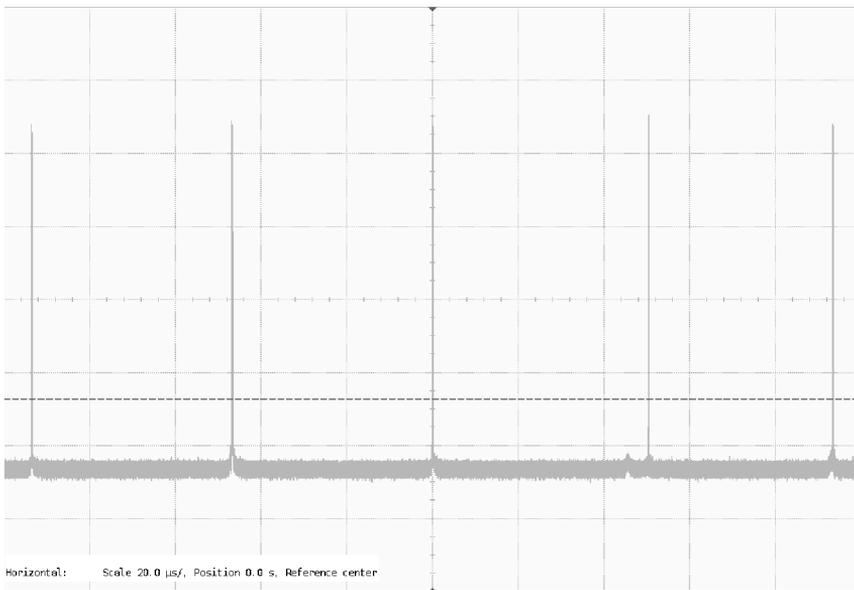


Рис. 13. Импульсы Ho-лазера при токе 2 А

На рис. 14 можно увидеть увеличение частоты при увеличении силы тока до 3 А.

Для вычисления пиковой мощности лазера необходимо знать период импульса $T = 40 \mu\text{s}$ и длительность импульса. Одиночный импульс представлен на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что длительность импульса составляет 180 нс. Для вычисления пиковой мощности при токе в 2 А использована формула:

$$P_{\text{пик}} = \frac{T}{l} \cdot P_{\text{ср}},$$
$$P_{\text{пик}} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \text{ с}}{180 \cdot 10^{-9} \text{ с}} \cdot 0,2 \text{ Вт} = 44,4 \text{ Вт},$$

где T – период импульсов; l – ширина импульса; $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность лазера при 2 А.

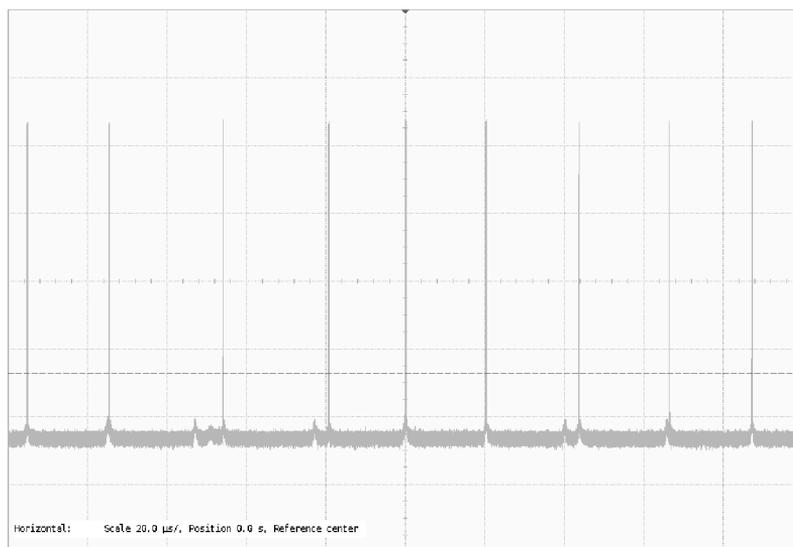


Рис. 14. Импульсы Но-лазера при токе 3 А

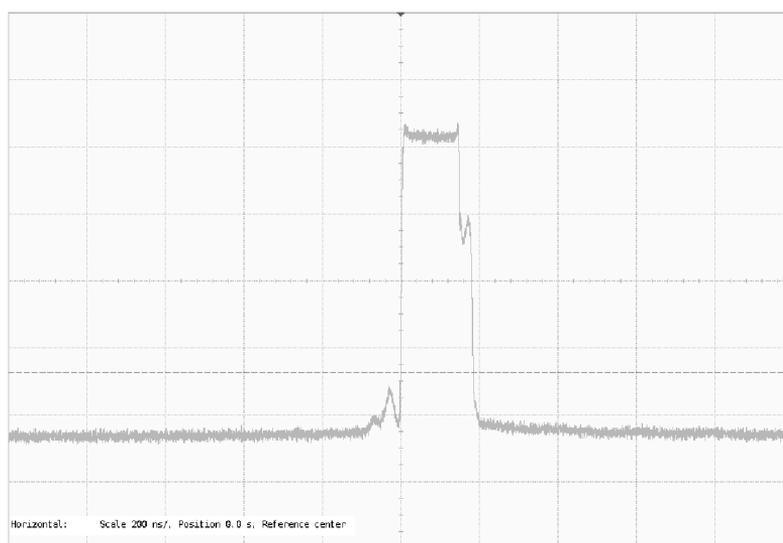


Рис. 15. Одиночный импульс Но-лазера при силе тока 2 А

Энергия импульса при таком режиме составляет 8 мкДж. Похожие результаты получены в работе [11] при принципиально другой оптической схеме. Энергия импульса составляла 10 мкДж при пиковой мощности 47 Вт и длительности импульса 250 нс. При почти равных пиковых мощностях предложенная схема обладает излучением с меньшей длительностью импульса, что позволяет нанести меньшие повреждения здоровым тканям в процессе операции. Также за счет накачки только одним лазерным диодом данная схема обладает большой энергетической выгодой.

Заключение

Получен волоконный импульсный гольмиевый лазер с длиной волны излучения 2050 нм и максимальной пиковой мощностью 44,4 Вт. Длительность импульса составила 180 нс, а энергия импульса – 8 мкДж. Проанализировав характеристики полученного излучения и сравнив их с излучением, получаемым от других коммерческих лазеров, можно увидеть ряд преимуществ данного лазера. Удалось достичь малой ширины одиночного импульса при высокой мощности, что позволяет уменьшить повреждения здоровой ткани. Импульсный режим позволяет достичь большой пиковой мощности, но при этом наносит минимальный урон здоровым тканям. Это открывает большие перспективы для его будущего применения в хирургии, особенно в методах, базирующихся на облучении жидких сред в организме человека (удаление камней в мочевом пузыре, почках, удаление злокачественных опухолей в печени).

Поэтому следующим этапом исследований станет моделирование воздействия экспериментально полученного излучения на 2050 нм на биоткани.

Список литературы

1. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине. – СПб: Изд-во НИУ ИТМО, 2012. – 129 с.
2. Гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,21 мкм / С.О. Антипов, В.А. Камынин, О.И. Медведков, А.В. Маракунин, Л.А. Минашина, А.С. Курков, А.В. Бараников // Квантовая электроника. – 2013. – № 43. – С. 603–604.
3. Гольмиевый волоконный лазер с рекордной квантовой эффективностью / А.С. Курков, Е.М. Шолохов, В.Б. Цветков, А.В. Маракунин

лин, Л.А. Минашина, О.И. Медведков, А.Ф. Косолапов // Квантовая электроника. – 2011. – № 41. – С. 492–494.

4. Лазерные и светодиодные медицинские приборы и системы: учеб. пособие / В.Н. Баранов, О.Н. Кузяков, М.С. Бочков [и др.]. – Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2012. – 176 с.

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

6. Выбор безопасных для зрения длин волн излучения в УФ и ближнем ИК спектральных диапазонах для задач дистанционного зондирования / М.Л. Белов, В.А. Городничев, Д.А. Кравцов, А.А. Черпакова // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электрон. журнал. – 2016. – № 2. – С. 105–122.

7. Auzel F. Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids // Chemical Reviews. – 2004. – № 104(1). – P. 139–173.

8. Influence of Yb³⁺ concentration on upconversion luminescence of Ho³⁺/Y. Yu [et al.] // Optics Communications. – 2011. – 284. – P. 1053–1056.

9. Волоконные Yb-, Er–Yb- и Nd-лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой / И.А. Буфетов, М.М. Бубнов, М.А. Мелькумов, В.В. Дудин, А.В. Шубин, С.Л. Семенов, К.С. Кравцов, А.Н. Гурьянов, М.В. Яшков, Е.М. Дианов // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 4. – С. 328–335.

10. A.V. Grudinin, P.W. Turner, C. Codemard [et al.] / ECOC' 2002. – Copenhagen, Denmark, 2002. – Pd1.6

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

12. Zervas M.N., Codemard C.A. High power Fiber Lasers // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. – 2014. – Vol. 20, no. 5. – P. 219–241.

References

1. E.A. Shahno. Physical fundamentals of the use of lasers in medicine. St. Petersburg: NRU ITMO, 2012. 129 p.

2. S.O. Antipov, V.A. Kamynin, O.I. Medvedkov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina, A.S. Kurkov, A.V. Baranikov. Holmium fiber laser with a wavelength of 2.21 μm. Quantum Electron, 2013, no. 43, pp. 603-604.

3. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A., Medvedkov O.I., Kosolapov A.F. Holmium fiber laser with record quantum efficiency. *Quantum Electron*, 2011. no. 41, pp. 492-494.
4. V.N. Baranov, O.N. Kuzyakov, M.S. Bochkov et al. *Laser and LED medical devices and systems: a training manual*. Tyumen: Tsogu, 2012. 176 p.
5. A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, O.I. Medvedkov, V.V. Dvoyrin, Yu.N. Pyrkov, V.B. Tsvetkov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber. *Laser Phys. Letters*. 2009. Vol. 6. P. 661–664.
6. M.L. Belov, V.A. Gorodnichev, D.A. Kravtsov, A.A. Cherpakova. Selection of Vision Safe Wavelengths in the UV and near IR spectral ranges for remote sensing applications. - *Science and education*. MSTU N.E. Bauman. *Electron. Journal* 2016. No. 02. p. 105–122.
7. F. Auzel. Upconversion and Anti-Stokes Processes with f and d Ions in Solids. *Chemical Reviews*. 2004. 104(1). P. 139–173.
8. Y. Yu et al. Influence of Yb³⁺ concentration on upconversion luminescence of Ho³⁺ // *Optics Communications* 284 (2011) 1053–1056
9. I.A. Bufetov, M.M. Bubnov, M.A. Melkumov, V.V. Dudin, A.V. Shubin, S.L. Semenov, K.S. Kravtsov, A.N. Guryanov, M.V. Yashkov E.M. Diana “Fiber Yb, Er – Yb and Nd light-emitting lasers with a multi-element first cladding.” *Quantum Electronics*, 2005. 35 p., No. 4, 328-335.
10. A.B. Grudinin, P.W. Turner, C. Codemard, et al. *ECOC` 2002 Copenhagen, Denmark, Pd1.6* (2002).
11. S.A. Filatova, V.B. Tsvetkov, A.S. Kurkov. Ho fiber laser emitting at a wavelength of 2,1 microns for medical application. *Applied photonics*, 2014. № 1.
12. M.N. Zervas, C.A. Codemard. High power Fiber Lasers: A Review. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2014. Vol. 20. no. 5. pp. 219-241.

Получено 22 марта 2020

Сведения об авторах

В.М. Афанасьев

Кандидат технических наук, Коломенский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), Коломна, Россия, e-mail: vamvitali@yandex.ru.

V.M. Afanas'ev

Candidate of Technical Sciences, Kolomna Institute (Branch) of the Moscow State Machine-Building University (MA-MI), Kolomna, Russia, e-mail: vamvitali@yandex.ru.

Р.С. Пономарев

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, e-mail: rsponomarev@gmail.com.

R.S. Ponomarev

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid State Physics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: rsponomarev @ gmail.com.

Е.И. Казанцев

Студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, направление – фотоника и оптоинформатика, e-mail: kazancev.evgenij.99@bk.ru.

E.I. Kazantsev

Student of the Perm National Research Polytechnic University, Direction – Photonics and Optoinformatics, e-mail: kazancev.evgenij.99@bk.ru.

И.С. Шелемба

Кандидат технических наук, первый заместитель Генерального директора наук ООО «Инверсия-С», e-mail: shelemba@i-sensor.ru.

I.S. Shelemba

Candidate of Technical Sciences, First Deputy General Director of Sciences, Inversiya-S LLC, e-mail: shelemba@i-sensor.ru.

А.Г. Кузнецов

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт автоматизации и электротехники СО РАН, e-mail: leks.kuznecov@gmail.com.

A.G. Kuznetsov

Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, e-mail: leks.kuznecov@gmail.com.

Д.С. Харенко

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт автоматизации и электротехники СО РАН, e-mail: kharenko@iae.nsk.su.

D.S. Kharenko

Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, e-mail: kharenko@iae.nsk.su.

А.В. Достовалов

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт автоматизации и электротехники СО РАН, e-mail: alexdost@gmail.com.

A.V. Dostovalov

Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Automation and Electrometry SB RAS, e-mail: alexdost@gmail.com.

М.К. Цибиногина

Кандидат химических наук, доцент кафедр «Прикладная математика», «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, начальник конструкторско-технологического бюро УВОК «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь, e-mail: TsibinoginaMK@pnppk.ru.

M.K. Tsibinogina

PhD, Assistant Professor of the Departments "Applied mathematics", "General physics" Perm National Research Polytechnic University, Head of Design and Technological Bureau UVOK "Perm Scientific Industrial Instrument Making Company", Perm, e-mail: TsibinoginaMK@pnppk.ru.

Я.М. Шарипов

Студент второго курса магистратуры Пермского государственного национального исследовательского университета кафедры «Физическая химия» химического факультета, инженер-исследователь конструкторско-технологического бюро Управления волоконно-оптических компонентов ПАО «Пермская научно-производственная компания», Пермь, e-mail: yan.sharipov2811@yandex.ru.

J.M. Sharipov

Student of the Department "Physics chemistry", Perm National Research Polytechnic University (PNRPU), Engineer-Researcher of the Bureau UVOС "Perm Scientific Industrial Instrument Making Company", Perm, e-mail: yan.sharipov2811@yandex.ru.

М.К. Осипчук

Аспирант кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета, инженер-технолог конструкторско-технологического бюро УВОК ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», 614014, Пермский край, г. Пермь, e-mail: OsipchukMK@pnppk.ru.

M.K. Osipchuk

Ph.D. student of the Department “Materials, technologies and machines construction”, Perm National Research Polytechnic University, Engineer-Technology of the Bureau UVOС “Perm Scientific Industrial Instrument Making Company”, Perm, e-mail: OsipchukMK@pnppk.ru.

К.Д. Пищальников

Инженер-конструктор Конструкторско-технологического бюро Управления волоконно-оптических компонентов ПАО «Пермская научно-производственная компания», Пермь, e-mail: pkd@pnppk.ru.

K.D. Pishchalnicov

Design – engineer of the Bureau UVOС "Perm Scientific Industrial Instrument Making Company" (PNPPK), Perm, e-mail: pkd@pnppk.ru.

К.И. Гагарина

Студент четвертого курса кафедры «Общая физика» факультета прикладной математики и механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, e-mail: gagaraksu@yandex.ru.

К.И. Gagarina

Student of the Department “General physics”, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: gagaraksu@yandex.ru.

И.А. Перетрухина

Инженер-конструктор конструкторско-технологического бюро Управления волоконно-оптических компонентов ПАО «Пермская научно-производственная компания», e-mail: PeretruhinaIA@pnppk.ru.

I.A. Peretruhina

Design – Engineer of the Bureau UVOC "Perm Scientific Industrial Instrument Making Company", e-mail: PeretruhinaIA@pnppk.ru.

А.С. Вахрушев

Студент Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

A.S. Vakhrushev

Student of the Perm State National Research University, Perm, Russia, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

Д.И. Нурмухаметов

Студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

D.I. Nurmukhametov

Student of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

О.Л. Вохмянина

Студент Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, Россия, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

O.L. Vokhmyanina

Student of the Perm State National Research University, Perm, Russia, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

И.С. Азанова

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика твердого тела» Пермского государственного национального исследо-

вательского университета, начальник отдела ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь, Россия, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

I.S. Azanova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid State Physics, Perm State National Research University, Head of Department of the Bureau UVOC “Perm Scientific Industrial Instrument Making Company”, Perm, Russia, e-mail: shevtsov@pnppk.ru.

M.V. Яшков

Старший научный сотрудник Института химии высокочистых веществ РАН, e-mail: yashkovmv@yandex.ru.

M.V. Yashkov

Senior Researcher, Institute of Chemistry of High-Purity Substances, RAS, e-mail: yashkovmv@yandex.ru.

Д.А. Селезнев

Магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, e-mail: sergey.zy@gmail.com.

D.A. Seleznev

Master's student of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: sergey.zy@gmail.com.

M.V. Ременникова

Младший научный сотрудник лаборатории фотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: maryrem@mail.ru.

M.V. Remennikova

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

А.А. Заболотных

Магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия, e-mail: maryrem@mail.ru.

A.A. Zabolotnykh

Master student of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: maryrem@mail.ru.

Р.Р. Кашина

Магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета, Пермь, Россия.

R.R. Kashina

Master student of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: maryrem@mail.ru.

Научное издание

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 7, № 1

Редактор и корректор *И.Н. Жеганина*

Выход в свет 15.09.2020. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 6,62. Тираж 20 экз. Заказ № 80/2020.
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.