

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

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

Пермский инновационный территориальный кластер
волоконно-оптических технологий «ФОТОНИКА»

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 10, № 1

Издательство
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
2023

УДК 621.383

П75

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

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

Главный редактор: *С.Л. Семенов*, д-р физ.-мат. наук, директор НЦВО РАН (Москва, Россия)

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

Ответственный за выпуск: *В.В. Криштон*, д-р физ.мат. наук, профессор, главный научный сотрудник ПАО ПНППК (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. Матвеев, акад. РАН (Пермь, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

И.С. Шелемба, канд. техн. наук (Новосибирск, 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 автономное 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.

© ПНИПУ, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Н.Н. Косвинцев, А.С. Казанцев</i> Пермь как центр развития «сквозной» технологии «фотоника»	5
<i>А.Н. Денисов, С.Л. Семёнов, М.Е. Лихачёв, В.В. Вельмискин, А.Ф. Косолапов, С.Г. Журавлёв</i> Полностью стеклянные микроструктурированные волоконные световоды с каналами вытекания, большим полем моды и малыми изгибными потерями	11
<i>А.А. Гаркушин, В.В. Криштоп, В.А. Максименко, М.А. Гарипова, Н.С. Милюков, К.Д. Трапезников, Е.В. Нифонтова, П.В. Зуева</i> Перспективы применения технологии POWER-OVER-FIBER	46
<i>М.В. Смирнов, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников, В.Б. Пикулев</i> Люминесцентные дефектные центры в кристаллах ниобата лития, легированных магнием	68
<i>О.Р. Стародуб, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников</i> Компьютерное моделирование кластеров в легированных кристаллах ниобата лития	80
<i>А.В. Сюй</i> Новые гетероструктуры на основе максенов для сбора солнечной энергии	92
<i>Д.Г. Гилев</i> Оценка динамического диапазона датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического резонатора	116
<i>И.В. Денисов, Н.В. Лисовский</i> Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов	131

CONTENTS

<i>N.N. Kosvintsev, A.S. Kazantsev</i> PERM AS A DEVELOPMENT CENTER OF PENETRATING TECHNOLOGIES "PHOTONICS"	5
<i>A.N. Denisov, S.L. Semjonov, M.E. Likhachev, V.V. Velmiskin, A.F. Kosolapov, S.G. Zhuravlev</i> ALL-GLASS LEAKAGE CHANNEL MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS WITH LARGE MODE AREA AND LOW BENDING LOSS	11
<i>A.A. Garkushin, V.V. Krishtop, V.A. Maksimenko, M.A. Garipova, N.S. Milyukov, K.D. Trapeznikov, E.V. Nifontova, P.V. Zueva</i> PROSPECTS FOR APPLICATION OF POWER-OVER-FIBER TECHNOLOGY	46
<i>M.V. Smirnov, N.V. Sidorov, M.N. Palatnikov, V.B. Pikulev</i> LUMINESCENT DEFECT CENTERS IN MAGNESIUM-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS	68
<i>O.R. Starodub, N.V. Sidorov, M.N. Palatnikov</i> COMPUTER SIMULATION OF CLUSTERS IN DOPED CRYSTALS OF LITHIUM NIOBATE	80
<i>A.V. Syuy</i> NEW MAXEN-BASED HETEROSTRUCTURES FOR SOLAR ENERGY HARVESTING	92
<i>D.G. Gilev</i> ESTIMATION OF THE DYNAMIC RANGE OF THE ANGULAR VELOCITY SENSOR BASED ON A FIBER-OPTIC RESONATOR	116
<i>I.V. Denisov, N.V. Lisovsky</i> THE SYSTEMATIZATION OF BENDING-SENSITIVE FIBER LIGHT GUIDES	131

УДК 62

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.01

Н.Н. Косвинцев, А.С. Казанцев

Центр компетенций НТИ «Фотоника»

ПЕРМЬ КАК ЦЕНТР РАЗВИТИЯ СКВОЗНОЙ ТЕХНОЛОГИИ «ФОТОНИКА»

Приводится обзор направлений деятельности Центра компетенций Научно-технологической инициативы «Фотоника» в области научных проектов, образовательной деятельности и популяризационных мероприятий. Статья будет интересна специалистам, которые ищут новые контакты для сотрудничества, новые институты для встраивания своих исследований в реальные технологические цепочки.

Ключевые слова: фотоника, Центр компетенций НТИ, проекты, партнеры, консорциум.

N.N. Kosvintsev, A.S. Kazantsev

NTI Competence Center "Photonics"

PERM AS A DEVELOPMENT CENTER OF PENETRATING TECHNOLOGIES PHOTONICS

The article provides an overview of the activities of the NTI Competence Center "Photonics" in the field of scientific projects, educational activities and promotional activities. The article will be of interest to specialists who are looking for new contacts for cooperation, as well as to those who are looking for new institutions to integrate their research into real technological chains.

Keywords: Photonics, NTI Competence Center, projects, partners, consortium.

В декабре 2020 г. на базе Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ) был создан Центр компетенций Национальной технологической инициативы (НТИ) «Фотоника». Создание Центра и получение им финансовой господдержки явились результатом конкурсного отбора, проведенного в 2020 г. Российской венчурной компанией (РВК). Фактическая работа по реализации Программы Центра началась с июня 2021 г.

По своей сути центры компетенций НТИ являются инженерно-образовательными консорциумами, которые занимаются развитием «сквозных» технологий НТИ. На сегодняшний день в России созданы уже 24 таких центра, пермский центр – единственный по тематике фотоники.

Сам концепт Национальной технологической инициативы – это долгосрочная комплексная программа по созданию условий для обеспечения лидерства российских компаний на новых высокотехнологичных рынках, которые будут определять структуру мировой экономики в ближайшие 15–20 лет.

На базе Центра НТИ «Фотоника» создан консорциум от Санкт-Петербурга до Владивостока, в который входят 46 участников (15 вузов, 17 промышленных предприятий, 11 научных организаций и 3 института поддержки). Ключевыми участниками консорциума являются: ПГНИУ, ПАО «ПНППК», ООО «Инверсия-Сенсор», ИАиЭ СО РАН, ИТМО «Сколтех». Консорциум работает над выстраиванием взаимодействия между научными институтами, образовательными организациями и промышленными предприятиями. Такое объединение было продиктовано заделом в виде уже сформированной на территории Пермского края «опорной» системы взаимодействующих ведущих научных, образовательных и промышленных организаций в сфере фотоники, расположенных в разных регионах России, которые обладают уникальными компетенциями, оборудованием и разветвленной сетью партнеров.

Центр компетенций НТИ «Фотоника» развивает собственную экосистему продуктов, состоящую из решений и технологий, а также сервисов и устройств, связанных в единую сеть. Ядром этой экосистемы являются пять ключевых проектов (будущих продуктов) Центра компетенций. Они способны работать как в связке друг с другом, так и по отдельности. Причём в последнем случае каждый из продуктов можно довести до уровня нового независимого сервиса, отвечающего техническим требованиям конкретного заказчика. В основе экосистемы фотоники лежат технологии сенсорики.

Именно на развитие сенсорики направлен один из пяти проектов – фемтозапись. Данная технология позволит создавать структуры внутри оптоволокна в процессе его вытяжки без повреждения. Ожидается, что реализация данного проекта приведет к снижению трудозатрат и стоимости компонентной базы для сенсорики, т.е. позволит повысить доступность волоконно-оптических технологий для приборостроения.

Благодаря создаваемым структурам внутри волокна появляется возможность применения другого проекта – компактного анализатора сигналов для измерения физических величин. Анализатор сигналов позволяет в режиме реального времени отслеживать состояние мостов, шахт, турбин и других сложных инженерных (инфраструктурных)

объектов. Данное устройство способно замерять десятки параметров, например, температуру, давление, напряжение и вибрации. Их отслеживание и фиксация дают возможность своевременно выявлять и предотвращать вероятные риски.

Ученые Центра также работают над созданием перестраиваемого лазера – это источник оптического излучения для устройств на основе фотонных интегральных схем. Разработка может применяться в компактных датчиках и контроллерах, устройствах IoT и в персональных системах мониторинга.

Еще один проект – это фотоприёмники двух типов. Такие модули можно будет использовать при производстве в России комплектующих для систем мониторинга окружающей среды, для 5G- и 6G- технологий, а также для медицины. Один из вариантов фотоприёмника может стать основой для отечественных интернет-роутеров, сборка которых возможна полностью из российских комплектующих. Кроме того, данный проект является составной частью комплексной системы мониторинга.

Наконец, пятый проект Центра – это специальные волокна. В рамках проекта ведутся работы над новыми видами оптических волокон, предназначенных для создания волоконно-оптических лазеров, систем и датчиков, которые за счет ускорения передачи данных сокращают время реакции на нештатные ситуации на атомных электростанциях. В отличие от классических медных проводов новые оптические волокна выдерживают высокие температуры, агрессивные среды и ионизирующие излучения.

Для внедрения проектов на разных промышленных предприятиях разрабатываются и технологии производства самих продуктов, которые могут быть адаптированы для создания новых отечественных изделий и систем на основе решений фотоники:

- для проекта фемтозапись – создается гибридная технология записи отражающих структур без повреждения волокна;
- для производства компактных анализаторов сигналов – создается технология на основе фотонных интегральных схем;
- перестраиваемый лазер – требует разработки технологии интегрально-оптического перестраиваемого источника;
- для сборки и тестирования фотоприемных модулей – необходимы новое автоматизированное оборудование и передовая технология изготовления активных элементов фотонных интегральных схем с применением материалов на основе фосфида индия;

– для проекта «Специальные волокна» – разрабатывается уникальная для России технология PCVD или технология плазменного осаждения, а также планируется к сборке собственная отечественная установка по изготовлению преформ для последующей вытяжки волокна.

Все проекты позволяют не только изготавливать отдельно взятые продукты, но комплексные решения для целых отраслей промышленности. В частности, разработки Центра в перспективе могут быть использованы в энергетике, робототехнике, телекоммуникациях, медицине, недропользовании и в транспортной инфраструктуре.

Ключевая задача Центра – перенести результаты фундаментальных исследований на «практические рельсы», выстроить кооперацию с индустриальными партнерами, создать линейку образовательных продуктов и подготовить высококвалифицированные кадры.

В 2022 г. Центр запустил ряд новых сетевых магистратур. Например, сетевая образовательная программа с МГУ им. Н.П. Огарева по профилю «Радиоэлектроника, оптоэлектроника и интеллектуальные системы». Также набраны и начали обучения студенты по сетевой образовательной программе магистратуры «Приборостроение» с Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Кроме того, в ПГНИУ для студентов химического и физического факультетов запущены дополнительные образовательные модули по фотонике.



Результаты работы Центра компетенций НТИ «Фотоника»

Для подготовки высококвалифицированных кадров Центр создает новые лаборатории. В 2022 г. начала работу Лаборатория особо чистых материалов для фотоники, где студенты будут проходить обучение, а также проводить научно-исследовательские и научно-практические работы.

Также в 2022 г. была создана Лаборатория сенсорики и перспективных средств измерения. Цель работы лаборатории – проведение работ по исследованию технологий в области сенсорики и освоение методов обработки результатов перспективных средств измерения. Основной задачей лаборатории является проведение НИР и НИОКР по оптоволоконным датчикам вибрации, давления и деформации, а также разработка ПО для обработки получаемых данных. Например, коллектив лаборатории занимается разработкой «Умной шпильки», новых датчиков деформации и температуры на основе решений фотоники.

Центр компетенций работает над встраиванием фотоники в информационное поле России, а также над формированием позитивного образа профильных ученых в сознании людей. Для решения этой задачи реализуется проект «Покажи силу света». В рамках проекта уже удалось создать более 900 упоминаний в федеральных СМИ, а также достичь охватов в десятки миллионов людей. Кроме того, специалисты Центра рассказывают не только о достижениях ученых ПГНИУ, но и о достижениях других участников консорциума. Например, из Санкт-Петербурга и Новосибирска. Тем самым формируется широкое информационное поле по всей стране.

Для прямого взаимодействия с новыми аудиториями Центр компетенций НТИ «Фотоника» и Пермский академический «Театр-Театр» (ТТ) поставили научно-технологический спектакль «Солярис» по одноименному роману Станислава Лема. Постановка создана театром совместно с ПГНИУ и ПАО «ПНППК», поэтому главную роль в спектакле «сыграли» современные технологии: лазеры, голограммы и видеопроекции, т.е. технологии фотоники. В новом спектакле фотоника заменила традиционные для театра декорации и костюмы и позволила создать космическую атмосферу другой планеты.

Спектакль «Солярис» стал «мостиком» между наукой и простыми жителями Перми и гостями города. Благодаря объединению науки и театра удалось сформировать уникальное пространство, которое было построено только на световых эффектах.

Таким образом, в рамках деятельности Центра развивается формат взаимодействия, который позволяет одинаково эффективно проводить работы и реализовывать проекты, накапливать компетенции и

получать результаты интеллектуальной деятельности в области «сквозной» технологии «фотоника», а также открывает возможность в перспективе к 2025 г. занять устойчивое положение на рынке систем мониторинга за счет решения широкого спектра задач и преодоления технологических барьеров.

КОСВИНЦЕВ Николай Николаевич

e-mail: n.kosvintcev@ntiphotonics.ru

Директор Центра компетенций НТИ «Фотоника» ФГАОУ ПГНИУ, Центр компетенций НТИ «Фотоника» (Пермь, Российская Федерация)

KOSVINTSEV Nikolai Nikolaevich

e-mail: n.kosvintcev@ntiphotonics.ru

Director of the NTI Competence Center «Photonics» FGAOU PGNIU, NTI Competence Center "Photonics" (Perm, Russian Federation)

КАЗАНЦЕВ Александр Сергеевич

e-mail: a.kazantsev@ntiphotonics.ru

Начальник отдела по развитию консорциума Центра компетенций НТИ «Фотоника» ФГАОУ ПГНИУ, Центр компетенций НТИ «Фотоника» (Пермь, Российская Федерация)

KAZANTSEV Alexander Sergeevich

e-mail: a.kazantsev@ntiphotonics.ru

Head of the Development Department of the Consortium of the Competence Center of the NTI "Photonics" FGAOU PGNIU, NTI Competence Center "Photonics" (Perm, Russian Federation)

УДК 535.92

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.02

**А.Н. Денисов, С.Л. Семёнов, М.Е. Лихачёв, В.В. Вельмискин,
А.Ф. Косолапов, С.Г. Журавлёв**

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

ПОЛНОСТЬЮ СТЕКЛЯННЫЕ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ ВОЛОКОННЫЕ СВЕТОВОДЫ С КАНАЛАМИ ВЫТЕКАНИЯ, БОЛЬШИМ ПОЛЕМ МОДЫ И МАЛЫМИ ИЗГИБНЫМИ ПОТЕРЯМИ

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов (МВС) с каналами вытекания с большим полем моды и малыми изгибными потерями. Эти МВС содержат два слоя круглых элементов из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой. Численный анализ свойств этих МВС выполнен с использованием метода конечных элементов. Рассчитаны потери на вытекание фундаментальных и высших мод в спектральном диапазоне от 0,70 до 1,65 мкм для прямых и изогнутых МВС. Показано, что предложенный дизайн МВС позволяет получить одномодовый режим в спектральном диапазоне от 0,98 до 1,14 мкм при радиусе изгиба до 0,08 м, при этом потери на вытекание для изогнутого МВС на длине волны 1,05 мкм составляют 0,052 дБ/м. Измеренные потери изготовленного МВС с диаметром сердцевины 22,5 мкм при радиусе изгиба 0,1 м составили менее 0,1 дБ/м в спектральном диапазоне от 0,9 до 1,5 мкм. Продемонстрировано, что отрезки этого МВС длиной более 5 м являются одномодовыми.

Ключевые слова: микроструктурированные волоконные световоды, одномодовые волоконные световоды, световоды с большим полем моды, метод конечных элементов.

**A.N. Denisov, S.L. Semjonov, M.E. Likhachev, V.V. Velmiskin,
A.F. Kosolapov, S.G. Zhuravlev**

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russia

ALL-GLASS LEAKAGE CHANNEL MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBERS WITH LARGE MODE AREA AND LOW BENDING LOSS

The present paper presents the results of theoretical and experimental studies of all-glass leakage channel microstructured optical fibers (MOFs) with large mode area and low bending loss. These MOFs comprise two layers of fluorine-doped silica glass elements with reduced refractive index, different diameters and different distances between them. Numerical analysis of the properties of these

MOFs is performed using the finite element method. The leakage losses for fundamental and higher order modes in the spectral range from 0.70 μm to 1.65 μm for straight and bended MOFs is calculated. It is shown that the proposed MOF design makes it possible to obtain a single-mode regime in the spectral range from 0.98 μm to 1.14 μm with a bending radius up to 0.08 m, while the leakage loss for a bended MOF at a wavelength of 1.05 μm is 0.052 dB/m. The measured loss of manufactured MOF with a core diameter of 22.5 μm at a bending radius of 0.1 m was less than 0.1 dB/m in the spectral range from 0.9 μm to 1.5 μm . It has been demonstrated that segments of this MOF with a length of more than 5 m are single-mode.

Keywords: microstructured optical fibers, single-mode optical fibers, large mode area optical fibers, finite element method.

Введение

В настоящее время наблюдается значительный интерес к непрерывным волоконным лазерам мощностью несколько кВт [1–6], который не ослабевает и в последние годы [7–10]. Это объясняется постоянно расширяющимися областями практических применений лазеров этого диапазона мощности, включая фундаментальные науки, обработку промышленных материалов и медицину. Одновременно происходит совершенствование этих лазеров, улучшение их физических и технических характеристик при уменьшении стоимости и массогабаритных параметров. Кроме того, такие лазеры являются составной частью более мощных волоконных лазеров, которые создаются путем объединения излучения от нескольких (или нескольких десятков) индивидуальных лазеров [11, 12]. Стоит отметить, что первые сообщения о непрерывных волоконных лазерах мощностью более 1 кВт относятся к 2004 г. [13–15].

Одновременно продолжают исследования и в области одномодовых волоконных световодов с большим полем моды как активных, являющихся основой для мощных волоконных лазеров, так и пассивных, необходимых для передачи мощного лазерного излучения на необходимое расстояние с требуемыми параметрами пучка. Для этих задач, помимо традиционных волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, могут использоваться различные типы микроструктурированных волоконных световодов (МВС), включая волоконные световоды с фотонной запрещенной зоной [16–18], брэгговские световоды [19–21] и МВС с каналами вытекания (leakage channel fibers или LCF) [22–24]. Однако до настоящего времени только МВС с фотонной запрещенной зоной были успешно использованы в непрерывных волоконных лазерах мощностью более 1 кВт [5, 10]. Вместе с тем авторам работы [10] при проведении

экспериментов пришлось существенно увеличить диаметр алюминиевой катушки, на которую наматывался активный световод: до 0,7 м вместо 0,2 м из-за неожиданно высоких изгибных потерь, причина которых им пока не понятна и находится в стадии выяснения. Но такой результат пока не позволяет создать достаточно компактный мощный волоконный лазер на основе этого световода.

Важной особенностью МВС с каналами вытекания является относительная простота их геометрической структуры, которая позволяет подбором ее параметров достаточно легко добиться одномодового режима при большом поле моды и при этом обеспечить малые изгибные потери, что необходимо для их использования в составе компактных мощных непрерывных волоконных лазеров и для доставки мощного лазерного излучения на необходимое расстояние с требуемыми параметрами пучка. Вместе с тем для применения в составе мощных непрерывных волоконных лазеров могут использоваться только полностью стеклянные МВС, оболочка которых образована не воздушными отверстиями, а элементами из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления [25–28], поскольку при больших мощностях излучения наличие воздушных отверстий в оболочке не позволит эффективно отводить тепло от сердцевины. Кроме того, такие МВС не имеют проблем при их стыковке (сваривании) с обычными световодами, что характерно для МВС с воздушными отверстиями в оболочке, которые схлопываются в этом процессе, что приводит к большим дополнительным потерям.

Однако исследованные к настоящему времени варианты таких МВС [25–28] обладали ограниченными возможностями в варьировании своих параметров и получении требуемых характеристик, поскольку имели в своей основе гексагональную структуру, которая объясняется использованием метода сборки заготовок для этих МВС из стержней различного состава. В теоретической работе [25] для варианта LCF7 авторам удалось достичь уровня изгибных потерь около 0,5 дБ/м при радиусе изгиба 0,15 м, но лишь при изгибах по одному из направлений, однако при изгибе по ортогональному направлению эти потери были больше на порядок и составили около 5 дБ/м.

Значительно больше возможностей дает метод высверливания отверстий в чистом кварцевом стержне с последующей вставкой в них легированных фтором кварцевых стержней и вытяжкой такой заго-

товки в МВС с нужными параметрами. В настоящей работе мы представляем результаты теоретических и экспериментальных исследований полностью стеклянного МВС оригинального дизайна, который основан на таком методе изготовления заготовки для него и был предложен нами и теоретически исследован в работах [29–31]. Этот МВС имеет большую чисто кварцевую сердцевину и оболочку, которая содержит два слоя круглых элементов вокруг нее из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой (рис. 1). Ключевой особенностью этого дизайна является наличие кольцевого зазора, обусловленного увеличенным расстоянием между элементами первого и второго слоев по сравнению с расстоянием между элементами первого слоя, что позволяет ожидать увеличения потерь на вытекание для высших мод по сравнению с потерями фундаментальных мод и таким образом обеспечить одномодовый режим.

Отметим, что в работах [29, 30] для расчетов была выбрана весьма небольшая разница показателей преломления легированного фтором кварцевого стекла и чистого кварцевого стекла: $\Delta n \approx 1,5 \times 10^{-3}$. Это привело к значительной величине минимального радиуса изгиба, при котором возможно получение одномодового режима: 0,25 м. Поэтому были проведены дальнейшие расчеты для значения $\Delta n = 4 \times 10^{-3}$ [31], которое с практической точки зрения также достаточно легко реализуемо и удобно в технологическом процессе изготовления МВС. В итоге были найдены параметры МВС, которые обеспечивали получение одномодового режима в спектральной области около 1,05 мкм при радиусе изгиба до 0,08 м. Вместе с тем оставались некоторые вопросы к деталям спектральных зависимостей потерь на вытекание для фундаментальных и высших мод, ответы на которые были получены в настоящей работе, в частности, были проведены более детальные расчеты по длинам волн, а также расширен спектральный диапазон расчетов в коротковолновую область спектра.

1. Описание геометрической структуры МВС

Сердцевина МВС имеет диаметр D_{core} (пунктир, см. на рис. 1). Первый слой оболочки содержит шесть одинаковых круглых элементов диаметром d_1 , расположенных на расстоянии Λ_1 друг от друга. Двенадцать элементов второго слоя оболочки имеют различные

диаметры: $d_2 > d_1$ и $d_3 \leq d_2$, причем элементы диаметром d_2 располагаются напротив перемычек между элементами первого слоя и на расстоянии Λ_2 от этих элементов, а элементы диаметром d_3 располагаются напротив элементов первого слоя и на расстоянии Λ_3 от них. Этот вариант условно назван МВС-18, где 18 означает полное число элементов.

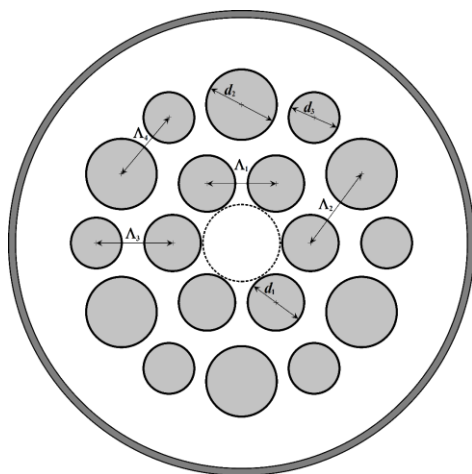


Рис. 1. Структура МВС-18 при $d_1/\Lambda_1 = 0,82$; $d_2/d_1 = 1,25$; $d_3/d_1 = 0,90$;
 $\Lambda_2/\Lambda_1 = 1,25$; $\Lambda_3/\Lambda_1 = 1,10$

Такой алгоритм построения структуры МВС-18 дает весьма широкие возможности для варьирования различных ее параметров (d_1 , d_2 и d_3 , а также Λ_1 , Λ_2 , Λ_3 и Λ_4) с целью оптимизации характеристик МВС, в частности, потерь на вытекание для фундаментальных (основных) и высших мод. Определение наиболее оптимального соотношения параметров МВС-18 для конкретной задачи возможно с использованием алгоритма мультиобъектной оптимизации, однако даже при использовании суперкомпьютера это может потребовать непрерывного счета на протяжении нескольких дней [32]. Поэтому мы выбрали относительно простую задачу: получение одномодового режима в спектральной области около $\lambda = 1,05$ мкм шириной не менее 0,1 мкм для МВС-18 с сердцевинной диаметром $D_{\text{core}} = 20$ мкм при фиксированном отношении диаметров элементов $d_2/d_1 = 1,15$, $d_3 = d_1$ (исходя из имеющихся у нас в наличии трубчатых алмазных сверл для изготовления заготовки) и при радиусе изгиба до 0,08 м. Остальные

параметры структуры МВС-18 определялись путем подбора до получения требуемых величин потерь на вытекание основных и высших мод для некоторых выбранных контрольных длин волн. Причем, поскольку на практике часть длины световода может быть прямой, а другая часть изогнутой, то учитывались потери как для прямого, так и для изогнутого МВС-18.

2. Результаты расчетов

Численные расчеты характеристик МВС-18 проводились с использованием метода конечных элементов (FEM) с цилиндрическим PML-слоем (perfectly matched layer – темно-серое кольцо на рис. 1) с помощью программного пакета COMSOL. Показатель преломления чистого кварцевого стекла n_{sil} определялся с помощью уравнения Селлмейера [33].

2.1. Прямой МВС-18

На рис. 2 представлены пространственные распределения интенсивностей двух поляризаций основной моды (1 и 2) и четырех высших мод (обозначенных цифрами от 3 до 6 в порядке убывания действительной части их эффективного показателя преломления n_{eff}) для длины волны 0,900 мкм для прямого МВС-18 при выбранных нами следующих параметрах: $d_1/\Lambda_1 = 0,795$; $\Lambda_2/\Lambda_1 = 1,226$ и $\Lambda_3/\Lambda_1 = 1,103$. Отметим, что приведенный на рис.1 вариант МВС-18 имеет несколько иные параметры, выбранные для удобства иллюстрации.

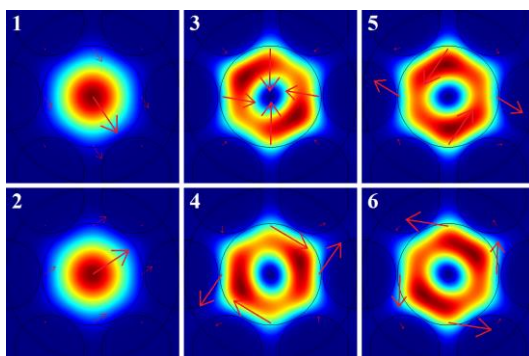


Рис. 2. Пространственные распределения интенсивности основных (1, 2) и высших (3 – 6) мод прямого МВС-18 для длины волны 0,900 мкм

Моды 1 и 2 относятся к типу HE_{11} , различаются только поляризацией; мода 3 относится к типу TM_{01} ; моды 4 и 5 относятся к типу HE_{21} , различаются направлением векторов электрического поля; мода 6 относится к типу TE_{01} [34].

Потери на вытекание α (в дБ/м) определялись по получаемой в расчетах мнимой части эффективного показателя преломления k_{eff} с помощью выражения [35]:

$$\alpha = \frac{20}{\ln(10)} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} k_{eff}. \quad (1)$$

На рис. 3 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для основных и высших мод МВС-18 в спектральном диапазоне от 0,75 до 1,65 мкм. Также на этом рисунке обозначены уровни потерь 0,1 и 1,0 дБ/м, которые позволяют определять границы одномодового режима в соответствии с широко распространенным критерием [22]. Как видно из рис. 3, для прямого МВС-18 спектральный диапазон одномодового режима составляет от 0,98 до 1,62 мкм (выделен желтым прямоугольником).

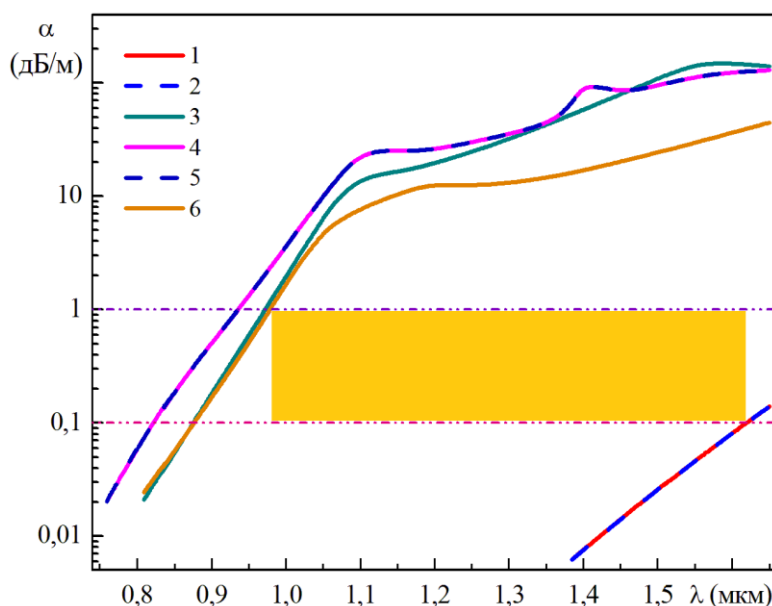


Рис. 3. Спектральные зависимости потерь на вытекание прямого МВС-18 для основных (1, 2) и высших (3 – 6) мод

2.2. Изогнутый МВС-18

Расчеты потерь на вытекание для изогнутого МВС-18 проводились путем его замены прямым световодом с эквивалентным профилем показателя преломления $n_{\text{экв}}$, который определялся (при изгибе по оси “х”) с помощью выражения [36]:

$$n_{\text{экв}}(x, y) = n(x, y) \left(1 + \frac{x}{R} \right), \quad (2)$$

где $n(x, y)$ – исходный профиль показателя преломления прямого МВС-18, R – радиус изгиба в метрах.

На рис. 4 приведены пространственные распределения интенсивности двух поляризаций основной моды (1 и 2) и четырех высших мод (условно обозначенных цифрами от 3 до 6 в порядке убывания действительной части их эффективного показателя преломления n_{eff}) на длине волны 0,900 мкм для изогнутого МВС-18 при радиусе изгиба $R_x = 0,08$ м. Моды 3 и 4 относятся к типу LP_{11o} , отличаются поляризацией, а моды 5 и 6 – к типу LP_{11e} , также отличаются поляризацией [37].

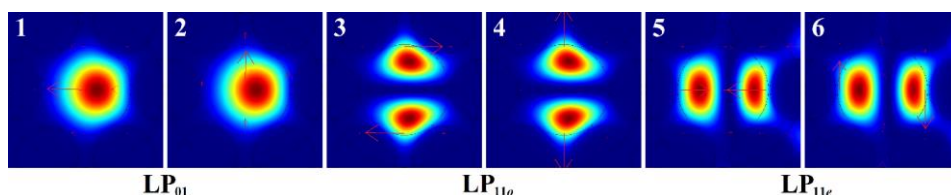


Рис. 4. Пространственные распределения интенсивности основных (1, 2) и высших (3 – 6) мод изогнутого МВС-18 для длины волны 0,900 мкм при $R_x = 0,08$ м

На рис. 5 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для основных и высших мод МВС-18 при изгибе по оси “х”.

Как видно из рис. 5, одной из весьма примечательных особенностей спектральных зависимостей потерь на вытекание основных мод 1 и 2 является наличие заметных максимумов вблизи длины волны 0,81 мкм. Хотя они расположены достаточно далеко от интересующей нас области спектра около 1,05 мкм, необходимо четко понимать механизм их возникновения для учета и возможной корректировки параметров МВС-18 при дальнейших расчетах, а также для некоторых других задач.

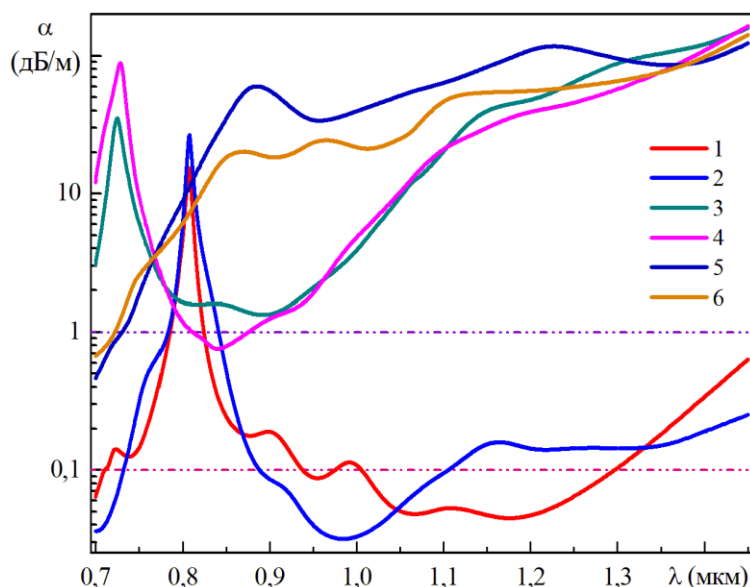


Рис. 5. Спектральные зависимости потерь на вытекание изогнутого MBC-18 для основных (1, 2) и высших (3 – 6) мод при $R_x = 0,08$ м

Несмотря на то, что эти максимумы по форме похожи на некоторые резонансные зависимости, в действительности такое поведение потерь обусловлено присутствием вблизи этой длины волны двух мод 1а и 1б, а также 2а и 2б, которые имеют похожие пространственные распределения интенсивности и направления векторов поляризации в сердцевине MBC-18, но при этом обладают дополнительными максимумами интенсивности в области оболочки между слоями отверстий, которая для удобства называется «кольцевым зазором».

Для иллюстрации на рис. 6 приведены пространственные распределения интенсивности мод 1а, 1б, 2а и 2б для MBC-18 при изгибе по оси x на длине волны 0,808 мкм. Как видно из этого рисунка, основное отличие мод Ма и Мб ($M = 1, 2$) заключается во взаимной ориентации векторов электрического поля в сердцевине MBC-18 и в кольцевом зазоре: для мод Ма эти векторы направлены в одном и том же направлении, а для мод Мб эти векторы направлены в противоположных направлениях.

На рис. 7 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание для мод 1а, 1б, 2а и 2б в диапазоне длин волн от 0,70 до 0,96 мкм. Как видно из этого рисунка, в длинноволновой части этого спектраль-

ного интервала ($\lambda > 0,81$ мкм) моды Ма имеют относительно низкие потери, а моды Мб – высокие, тогда как в коротковолновой части спектра ($\lambda < 0,81$ мкм), наоборот, моды Мб имеют относительно низкие потери, а моды Ма – высокие.

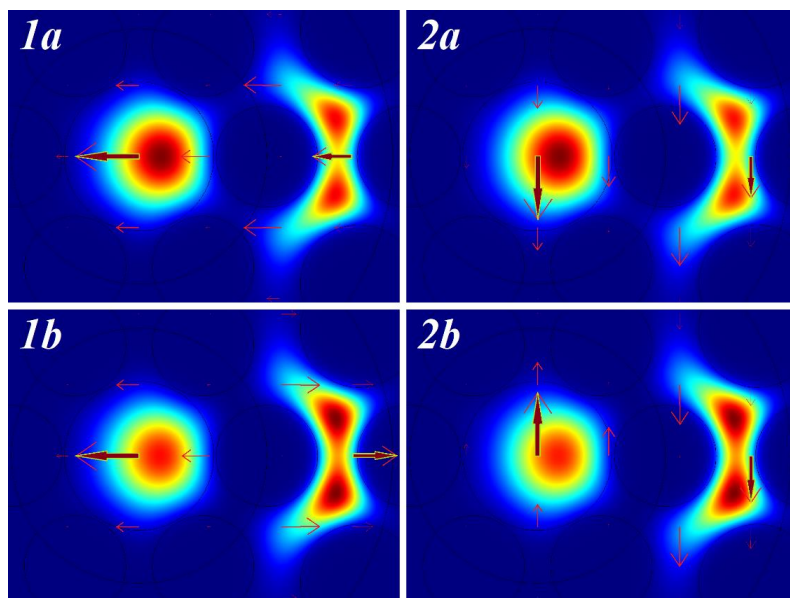


Рис. 6. Пространственные распределения интенсивности мод 1а, 1б, 2а и 2б МВС-18 при изгибе по оси x для длины волны 0,808 мкм

Для того чтобы оценить реальные, экспериментально определяемые, с точки зрения наблюдателя, потери для излучения какой-либо поляризации, рассмотрим более детально на примере мод 1а и 1б потери для излучения, поляризованного в направлении оси x . На рис. 8 приведены пространственные распределения интенсивностей мод 1а и 1б при изгибе по оси x для разных длин волн в окрестности 0,808 мкм (0,802 – 0,814 мкм). Как видно из этого рисунка, при изменении длины волны изменяются и интенсивности этих мод в сердцевине МВС-18, причем в противоположные стороны.

На рис. 9 приведены спектральные зависимости потерь на вытекание и интенсивностей (I_{1a} и I_{1b}) мод 1а и 1б в сердцевине МВС-18 при изгибе по оси x , причем для удобства представления интенсивности мод нормированы на их сумму $I_{1a} + I_{1b}$.

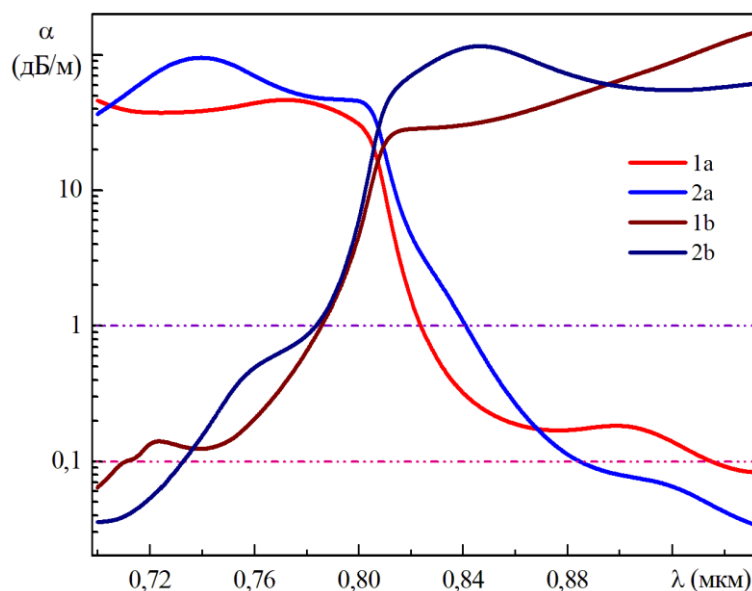


Рис. 7. Спектральные зависимости потерь на вытекание мод 1а, 1б, 2а и 2b изогнутого MBC-18 при $R_x = 8$ см

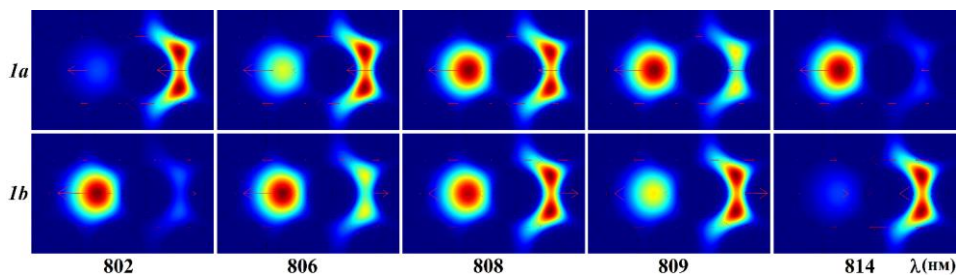


Рис. 8. Пространственные распределения интенсивности мод 1а и 1б MBC-18 при изгибе по оси x для разных длин волн

Стоит отметить, что, как видно из этого рисунка, только в очень узком спектральном интервале – примерно от 0,79 до 0,82 мкм – интенсивности I_{1a} и I_{1b} одновременно составляют более 10 % от общей суммы, что на практике означает, что только в этом интервале моды 1а и 1б одновременно имеют визуальную заметную интенсивность в сердцевине MBC-18, если оценивать только по их пространственным распределениям интенсивностей, что уже заметно и на рис. 8. За границами этого диапазона длин волн в длинноволновой области спектра мода 1а выглядит как обычная фундаментальная мода изогнутого

МВС, а мода 1б выглядит как чисто оболочечная мода, т.е. мода кольцевого зазора, в то время как в коротковолновой области спектра мода 1б выглядит как обычная фундаментальная мода изогнутого световода, а мода 1а выглядит как чисто оболочечная мода. При этом реально в длинноволновой области спектра относительная интенсивность моды 1б в сердцевине МВС-18 не опускается ниже 1 % от суммы, а при $\lambda > 1,2$ мкм даже начинает плавно возрастать.

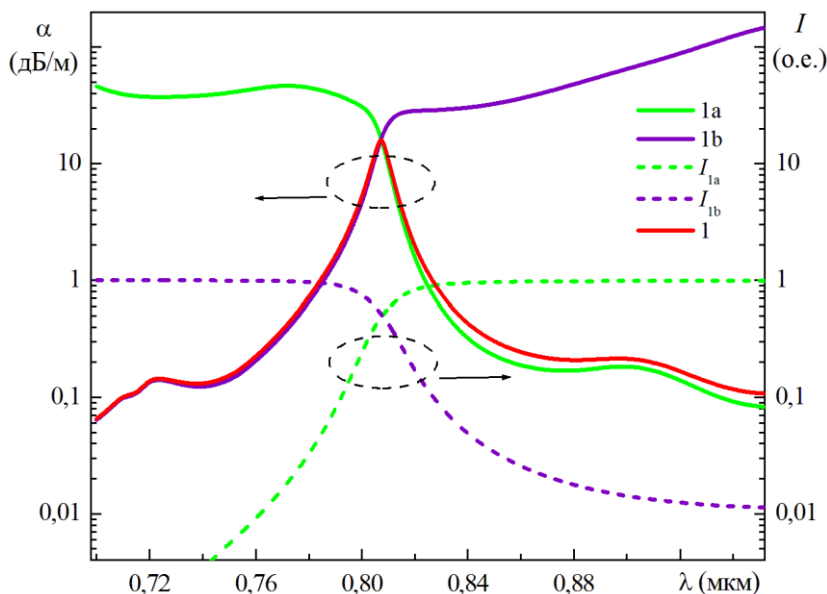


Рис. 9. Потери на вытекание и интенсивности мод 1а и 1б МВС-18 при изгибе по оси x , плюс итоговые потери для моды 1

Теперь предположим, что на вход отрезка световода МВС-18 поступает излучение с длиной волны λ , поляризованное вдоль оси x и имеющее интенсивность I_{01} . Логично предположить, что для каждой конкретной длины волны входящее излучение разделится между модами 1а и 1б пропорционально их интенсивностям в сердцевине, т. е. $I_{01} = I_{01a} + I_{01b}$, где I_{01a} и I_{01b} составляют доли от I_{01} , определяемые по зависимостям, приведенным на рис. 9. Затем, при распространении по участку МВС-18 длиной L , излучение в каждой из этих мод 1а и 1б ослабнет в соответствии с присущими им потерями. Используя стандартное выражение для потерь в децибелах:

$$\alpha = -(10/L) \cdot \log(I/I_0), \quad (3)$$

можно записать:

$$I_{1a}(L) = I_{01a} \cdot 10^{-\alpha(1a) \cdot L/10}, \quad (4)$$

$$I_{1b}(L) = I_{01b} \cdot 10^{-\alpha(1b) \cdot L/10}. \quad (5)$$

В итоге суммарное излучение, поляризованное вдоль оси x (т.е. интенсивность моды 1 как совокупности мод 1а и 1б) на выходе отрезка световода МВС-18 длиной L будет определяться выражением:

$$I_1(L) = I_{1a}(L) + I_{1b}(L) = I_{01a} \cdot 10^{-\alpha(1a) \cdot L/10} + I_{01b} \cdot 10^{-\alpha(1b) \cdot L/10}. \quad (6)$$

Тогда условно можно определить потери для излучения, поляризованного вдоль оси x (т.е. моды 1) с помощью следующего выражения:

$$\alpha_1 = -(10/L) \cdot \log((I_{01a} \cdot 10^{-\alpha(1a) \cdot L/10} + I_{01b} \cdot 10^{-\alpha(1b) \cdot L/10}) / (I_{01a} + I_{01b})). \quad (7)$$

Необходимо подчеркнуть, что это именно условное выражение для потерь моды 1 в дБ/м, поскольку оно зависит от длины L , что необходимо учитывать при дальнейших сравнениях.

На рис. 9 приведена итоговая спектральная зависимость потерь $\alpha_1(\lambda)$, рассчитанная для длины $L = 2$ м. Поскольку основное предполагаемое назначение для МВС-18 – это использование его для передачи мощного лазерного излучения, для которого необходимы отрезки длиной в десятки метров, то для представленных на рис. 5 спектральных зависимостей потерь на вытекание основной моды 1 расчеты проводились для длины $L = 10$ м. Отметим, что для представленных на рис. 9 результатов расчетов была выбрана длина $L = 2$ м лишь для наглядности, так как при $L = 10$ м разница между кривыми 1а (зеленая кривая) и 1 (красная кривая) в длинноволновой части спектра на графике становится малозаметной.

Что касается высших мод 3 – 6, то как для прямого, так и для изогнутого МВС-18 они практически во всем спектральном диапазоне обладают дополнительными максимумами интенсивности в кольцевом зазоре, и при этом также проявляются (становятся заметными) дополнительные высшие моды, т. е. одновременно наблюдаются моды Ма и Mb ($M = 3...6$), причем для определенности для каждого M мы выбрали их обозначения (от a к b) в порядке убывания их действительных частей эффективного показателя преломления. Эти моды Ма и Mb для каждого M имеют в сердцевине МВС-18 практически

идентичные пространственные распределения интенсивности и направления векторов поляризации, но отличаются взаимной ориентацией векторов электрического поля в сердцевине МВС-18 и в кольцевом зазоре, а также соотношениями интенсивностей в сердцевине и в кольцевом зазоре и уровнями потерь на вытекание (детали см. в [31]).

Для нашей задачи, а именно определения спектрального диапазона одномодового режима важным является определение минимальных значений потерь на вытекание для высших мод, поэтому среди таких пар мод для каждой длины волны мы выбирали ту из них, которая имела меньшее значение потерь. Конечно, и для высших мод можно было бы провести расчеты по такой же схеме, что и для основных мод, но это весьма трудоемкая процедура и особого смысла не имеет.

Итоговые спектральные зависимости потерь на вытекание для основных и высших мод МВС-18 при изгибе по оси x приведены на рис. 5.

По такому же алгоритму были проведены расчеты спектральных зависимостей потерь на вытекание для основных (1, 2) и высших (3 – 6) мод и для изгиба МВС-18 по оси y , результаты приведены на рис. 10. Как видно из сравнения рис. 10 и 5, в целом полученные зависимости очень похожи, – это касается как их поведения в области минимальных потерь для основных мод около 1,05 мкм, так и в области максимума около 0,81 мкм.

Таким образом, при выбранных параметрах структуры МВС-18 обладает достаточно близкими характеристиками при изгибах по разным направлениям, что является весьма важным свойством для практических применений. Для корректного сравнения расчетных и экспериментальных результатов необходимо провести усреднение по направлениям изгиба, и в качестве первого приближения было проведено усреднение с использованием полученных спектральных зависимостей потерь на вытекание при изгибах по оси x и по оси y . Кроме того, было проведено усреднение по поляризациям для случая неполяризованного излучения на входе в световод, т. е. по парам мод 1 и 2, 3 и 4, а также 5 и 6.

На рис. 11 приведены усредненные по поляризациям и направлениям изгиба спектральные зависимости потерь на вытекание основных и высших мод МВС-18 при радиусе изгиба 0,08 м. Как видно из этого рисунка, диапазон одномодового режима для изогнутого

МВС-18 при радиусе изгиба 0,08 м составляет от 0,93 до 1,14 мкм (выделен желтым прямоугольником). При этом потери на длине волны 1,05 мкм для фундаментальной моды составляют 0,052 дБ/м, а для высших мод превышают 17,7 дБ/м. В целом отношение потерь на вытекание высших мод к основной моде превышает 100 для длин волн более 0,92 мкм, а на длине волны 1,05 мкм составляет более 340.

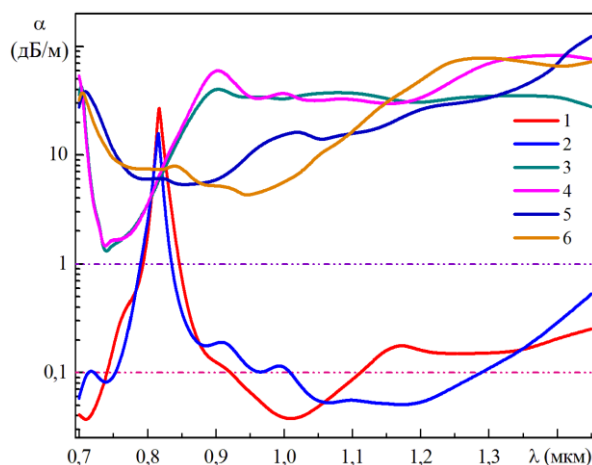


Рис. 10. Спектральные зависимости потерь на вытекание изогнутого МВС-18 для основных (1, 2) и высших (3 – 6) мод при $R_y = 0,08$ м

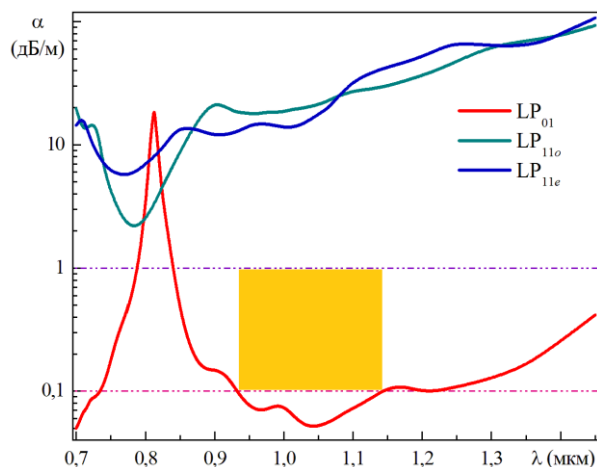


Рис. 11. Усредненные по поляризациям и направлениям изгиба потери на вытекание основных и высших мод МВС-18 при $R = 0,08$ м

Еще одним важным параметром МВС-18 является зависимость его потерь на вытекание от радиуса изгиба. На рис. 12 приведена усредненная по поляризациям и направлениям изгиба зависимость потерь на вытекание МВС-18 для длины волны 1,05 мкм от радиуса изгиба.

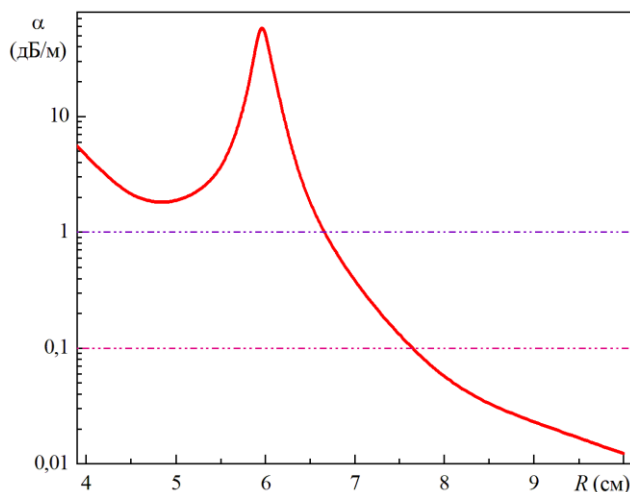


Рис. 12. Усредненная по поляризациям и направлениям изгиба зависимость потерь на вытекание МВС-18 для длины волны 1,05 мкм от радиуса изгиба

Рост потерь на вытекание МВС-18 при радиусе изгиба около 6 см имеет тот же механизм, что и представленный ранее для радиуса изгиба 8 см и длины волны около 0,8 мкм. Таким образом, этот максимум потерь при уменьшении радиуса изгиба от 8 до 6 см сместился в длинноволновую область на ~0,25 мкм.

3. Экспериментальные результаты

Заготовка для МВС-18 изготавливалась в несколько этапов. Сначала проводилось сверление стержня из чистого кварцевого стекла F300 трубчатыми алмазными сверлами разного диаметра (~3,0 и ~3,5 мм), при этом использовались сверла с алмазным порошком 100/80, обеспечивающие достаточно хорошее качество поверхности отверстий и большую скорость сверления.

Затем для обеспечения низкого уровня серых потерь в МВС-18 проводилась шлифовка стенок просверленных отверстий с использованием специальных трубчатых алмазных сверл с более мелким алмазным порошком (50/40) и с тщательно подогнанными диаметрами,

которые на 30–50 мкм больше, чем у соответствующих сверл, использованных при сверлении.

Потом в эти отверстия производилась вставка подготовленных легированных фтором кварцевых стержней диаметром, немного меньшим соответствующих отверстий, и эта сборка консолидировалась на стеклодувном станке с откачкой воздуха из промежутка между стенками отверстий и стержнями.

На финальном этапе из полученной заготовки проводилась вытяжка МВС-18 на установке УНУ Волокно ФИЦ ИОФ РАН.

На рис. 13 приведена микрофотография поперечного сечения образца изготовленного МВС-18 с внешним диаметром $D_{\text{fiber}} = 135$ мкм и диаметром сердцевинки $D_{\text{core}} = 22,5$ мкм, которая была получена с помощью электронного микроскопа ЦКП ИОФ РАН.

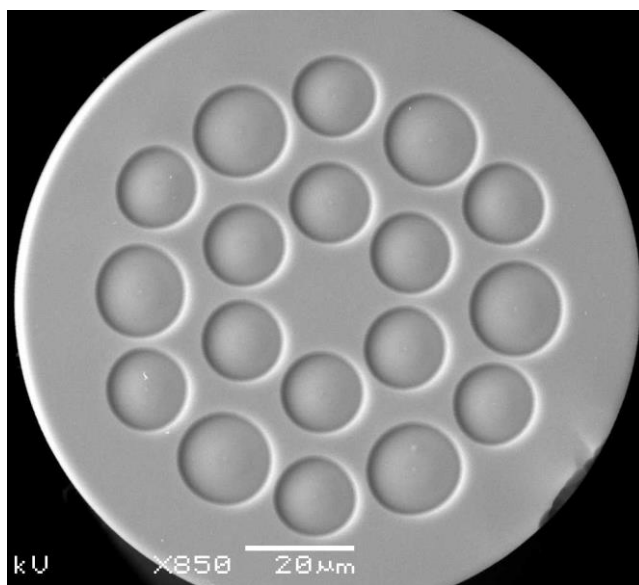


Рис. 13. Микрофотография поперечного сечения изготовленного МВС-18; $D_{\text{fiber}} = 135$ мкм; $D_{\text{core}} = 22,5$ мкм

Измеренные потери для этого образца изготовленного МВС-18 при радиусе изгиба 0,1 м в свободной бухте приведены на рис. 14, они составили менее 0,1 дБ/м в спектральном диапазоне от 0,9 до 1,5 мкм, при этом в диапазоне длин волн от 1,0 до 1,1 мкм эти потери составили от 0,03 до 0,02 дБ/м.

Экспериментальный тест показал, что отрезки этого МВС-18 длиной более 5 м являются одномодовыми. На вставке (см. рис. 14) приведены фотографии наблюдаемой интенсивности в ближнем поле МВС-18 при различных смещениях входящего пучка (для излучения с длиной волны $\lambda = 0,976$ мкм).

Измеренные зависимости потерь изготовленного МВС-18 от изгиба при варьировании расстояния L между двумя стенками, ограничивающими бухту с МВС-18, показаны на рис. 15. Качественно эти зависимости вполне согласуются с результатами расчетов: во-первых, наблюдается смещение максимума потерь в длинноволновую область спектра при уменьшении L , что фактически эквивалентно уменьшению радиуса изгиба МВС-18, как и было отмечено в комментариях к рис. 12; во-вторых, наблюдается также увеличение величины потерь в максимуме наблюдаемой полосы при уменьшении L , т.е. при уменьшении радиуса изгиба, что вполне соответствует результатам расчетов (~ 20 дБ/м при $R = 8$ см на рис. 11 и ~ 50 дБ/м при $R = 6$ см. на рис. 12). Отличия в величине потерь и спектральной ширине полос обусловлены некоторыми отклонениями параметров структуры изготовленного МВС-18 от идеальной.

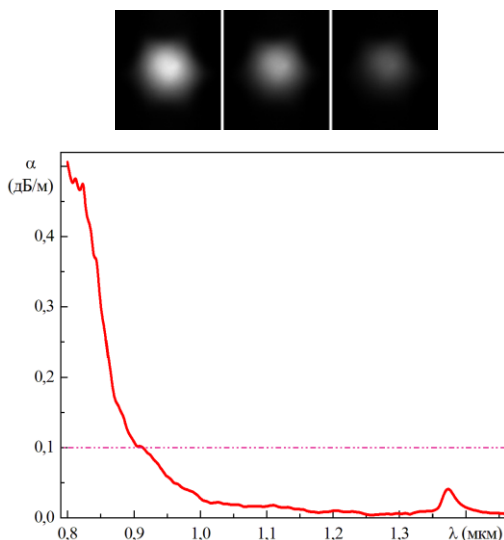


Рис. 14. Измеренные потери изготовленного МВС-18 при $R = 0,1$ м. Вставка – наблюдаемая интенсивность в ближнем поле МВС-18 при различных смещениях входящего пучка ($\lambda = 0,976$ мкм)

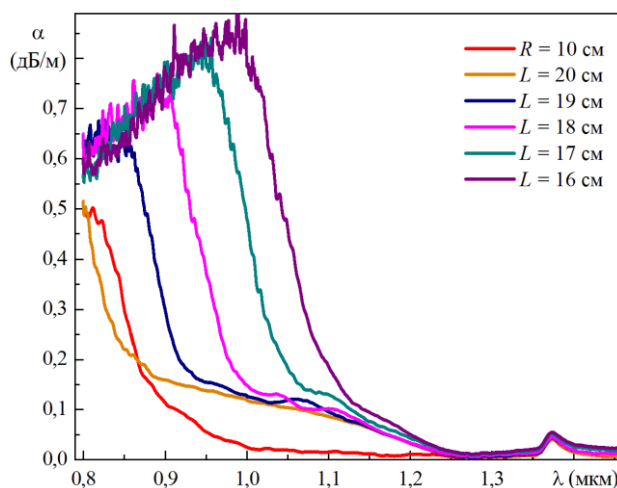


Рис. 15. Зависимости потерь изготовленного МВС-18 от изгиба при варьировании расстояния L между двумя стенками, ограничивающими бухту с МВС-18

4. Обсуждение результатов

Некоторые современные теоретические исследования, посвященные поиску осуществления одномодового режима для различных типов МВС с большим полем моды, рассматривают увеличение оптических потерь высших мод с точки зрения связи этих мод сердцевины с вытекающими модами оболочки световода [38 – 40], обусловленной совпадением действительных частей их эффективных показателей преломления (index-matched coupling), т.е. пересечением спектральных зависимостей показателей преломления высших мод сердцевины с зависимостями для показателей преломления вытекающих мод оболочки световода при некоторых длинах волн. При этом не приводятся какие-либо физические механизмы, которые могли бы объяснить такую связь этих мод.

Интересная структура МВС с двумя слоями отверстий и двумя сердцевинами была предложена в работе [40]. Помимо центральной сердцевины этот МВС имел кольцевую сердцевину (ring-core), причем их параметры подбирались путем отдельного моделирования центральной сердцевины (рис. 16, *a* – это Fig.5a из [40]) и кольцевой сердцевины (рис. 16, *б* – это Fig.5b из [40]), т.е. находились такие параметры структуры этих вспомогательных МВС, которые обеспечивали равенство действительных частей эффективных показателей преломления для этих двух структур (LP_{11} моды первого МВС и

высшей оболочечной моды второго) на длине волны 1,064 мкм. Таким образом, по мнению авторов [40], в предложенном МВС получался резонансный рост потерь на вытекание для LP₁₁ моды сердцевинны за счет ее связи с модой оболочки (рис. 16, в – это Fig.5с из [40]).

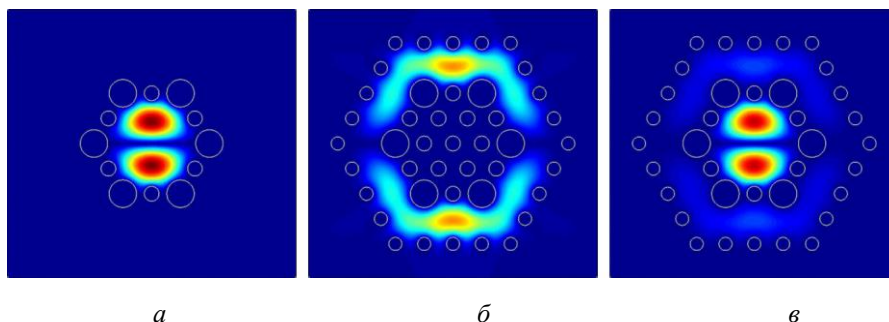


Рис. 16. Пространственные распределения интенсивности при $\lambda = 1,064$ мкм для (а) LP₁₁ моды в центральной сердцевине; (б) высшей оболочечной моды в кольцевой сердцевине; (в) высшей моды в предложенном МВС (Fig.5 из работы [40])

Хотя предложенный авторами [40] подход может в какой-то степени помочь найти такие параметры структуры МВС, при которых будут достигнуты увеличенные потери на вытекание высших мод, однако представленное на рис. 16, в пространственное распределение интенсивности моды этого МВС, очевидно, имеет какое-то одно конкретное значение эффективного показателя преломления (действительную и мнимую часть), т.е. это такая мода, которая из-за резонансного влияния параметров структуры МВС имеет сложное пространственное распределение интенсивности и увеличенные потери на вытекание.

Проведенные нами расчеты характеристик различных вариантов оригинальных МВС-18 с кольцевым зазором между двумя слоями элементов из фторированного кварцевого стекла [29 – 31], а также представленные в настоящей работе показали, что как высшие моды прямого и изогнутого МВС-18 (в достаточно широком спектральном диапазоне), так и основные моды изогнутого МВС-18 в некотором узком диапазоне длин волн имеют дополнительные локальные максимумы интенсивности в кольцевом зазоре.

Как было показано выше, в этих диапазонах длин волн проявляются (становятся заметными) дополнительные моды, которые имеют в сердцевине МВС-18 такие же пространственные распределения интенсивности и ориентации вектора электрического поля, как и

соответствующие им по этим параметрам моды, но другие ориентации вектора электрического поля в кольцевом зазоре относительно вектора электрического поля в сердцевине МВС-18 и иные соотношения интенсивностей в сердцевине и в кольцевом зазоре, а также отличающиеся уровни потерь на вытекание (мнимую часть эффективного показателя преломления) и несколько отличные значения действительных частей эффективных показателей преломления.

Для дополнительной иллюстрации рис. 17 приведены спектральные зависимости действительных частей эффективных показателей преломления n_{1a} и n_{1b} для мод 1a и 1b МВС-18 при изгибе по оси x для $R_x = 8$ см, которые достаточно четко показывают, что эти зависимости сближаются, но не пересекаются, причем всегда выполняется соотношение $n_{1a} > n_{1b}$. Для большей наглядности на рис. 18 показаны спектральные зависимости разности $n_{1a} - n_{1b}$ действительных частей эффективных показателей преломления мод 1a и 1b, а также потерь на вытекание этих мод для МВС-18 при изгибе по оси x .

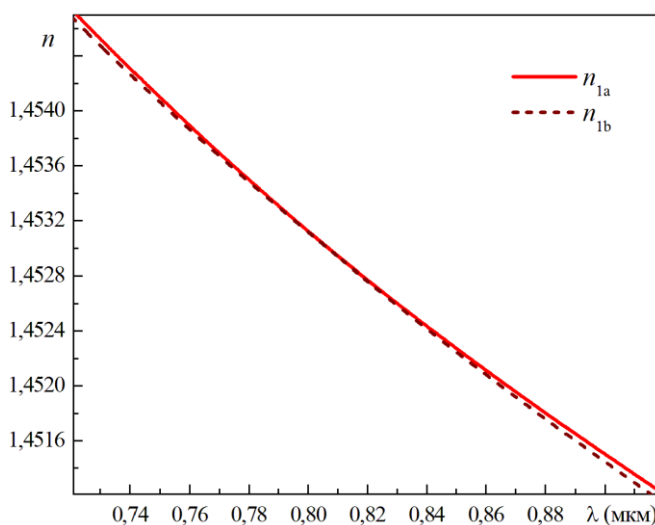


Рис. 17. Спектральные зависимости эффективных показателей преломления n_{1a} и n_{1b} для мод 1a и 1b МВС-18 при изгибе по оси x для $R_x = 8$ см

Необходимо подчеркнуть, что, поскольку рассчитанные пространственные распределения интенсивности для мод 1a и 1b (см. рис. 8) относятся к одному конкретному собственному значению,

полученному в результате численного решения волнового уравнения в полном поперечном сечении МВС и имеют одно конкретное значение эффективного показателя преломления (действительную и мнимую части) для конкретной длины волны, то они характеризуют конкретную моду МВС, которую уже нельзя отнести к моде сердцевины или моде оболочки (кольцевого зазора), а тем более разделить на две отдельные моды (сердцевины и оболочки), т.е. это мода всего световода как целого. Вместе с тем наблюдаемые изменения пространственных распределений интенсивностей мод 1а и 1б при изгибе по оси x в достаточно узком спектральном интервале, а также их потерь на вытекание (см. рис. 7) можно условно описать как квазирезонансная трансформация основной моды сердцевины 1а в оболочечную моду (естественно, тоже 1а) по мере уменьшения длины волны и при этом одновременная трансформация оболочечной моды 1б и в основную моду сердцевины. То же самое относится и к паре мод 2а и 2б. Конечно, при этом необходимо помнить, что в действительности эти моды имеют ненулевые значения интенсивностей как в сердцевине, так и в кольцевом зазоре (оболочке) практически во всем спектральном диапазоне (см. пример на рис. 9).

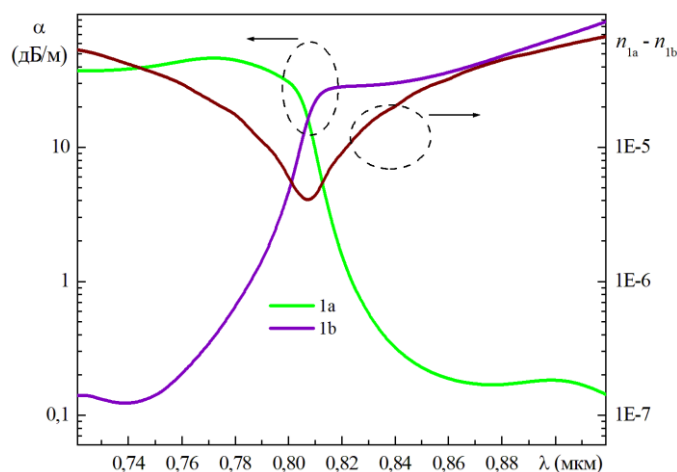


Рис. 18. Потери на вытекание и разность действительных частей показателей преломления мод 1а и 1б МВС-18 при изгибе по оси x для $R_x = 8$ см

Исходя из таких общих параметров для этих пар мод, как характер пространственного распределения интенсивности в сердце-

вине МВС-18 и ориентация вектора электрического поля в ней, такие пары мод M_a и M_b ($M = 1 - 6$) можно условно отнести к вырожденной моде некоторого типа, определяемого по их общим параметрам в сердцевине, несмотря на то, что эти пары имеют несколько различные значения действительных частей эффективных показателей преломления. Хотя стоит отметить, что, строго говоря, в классическом понимании дважды вырожденной является, например, фундаментальная мода в волоконном световоде, поскольку имеет две разные (ортогональные) поляризации, одинаковые пространственные распределения интенсивности в сердцевине и одинаковые значения действительных частей эффективных показателей преломления [33].

Что касается экспериментальных данных, то выше уже отмечались некоторые отклонения параметров структуры изготовленного МВС-18 от идеальной расчетной структуры. Это привело, кроме прочего, и к небольшому увеличению радиуса изгиба МВС-18 (0,1 м вместо расчетного 0,08 м), при котором обеспечиваются одномодовый режим и малые потери для основной моды на длине волны около 1,05 мкм. Основным фактором, который влияет на допустимый радиус изгиба МВС-18, является наличие максимума потерь на вытекание основных мод, положение которого (при фиксированном радиусе изгиба) в значительной степени зависит от величины зазора между слоями элементов из легированного фтором кварцевого стекла. В расчетах использовались значения параметров $Z_{12}/Z_{11} = 1,81$ и $Z_{13}/Z_{11} = 1,50$, тогда как измеренные по микрофотографии на рис. 13 параметры (средние значения) оказались больше: $Z_{12}/Z_{11} = 2,10$ и $Z_{13}/Z_{11} = 1,71$. Здесь Z_{ij} – это зазор между элементами диаметром d_i и d_j .

Как видно из рис. 15, при $L = 16$ см (что с некоторыми оговорками эквивалентно значению $R = 8$ см) широкая экспериментальная полоса потерь существенно перекрывает диапазон длин волн около 1,05 мкм, а при $L = 20$ см (т.е. для $R = 10$ см) она смещается в коротковолновую область. Правда, при этом остаются заметные микроизгибные потери, обусловленные влиянием стенок, которые ограничивали бухту с МВС-18. Для свободной бухты с радиусом $R = 10$ см эти микроизгибные потери не заметны.

Вместе с тем в отличие от расчетных данных (см. рис. 11), в эксперименте не наблюдается рост потерь основной моды в длинноволновой части спектра. Последний факт объясняется несколь-

ко большей величиной параметра $d_1/\Lambda_1 = 0,840$, измеренного по микрофотографии на рис. 13, тогда как расчеты были выполнены для меньшей величины $d_1/\Lambda_1 = 0,795$. Соответственно, при большей величине d_1/Λ_1 уменьшается величина зазоров Z_{11} между элементами первого слоя, что и привело к уменьшению потерь основных мод. Возможно, что потери высших мод при этом также уменьшились, что повлияло на величину экспериментально найденной длины МВС-18 (5 м), при которой он может считаться одномодовым.

Что касается причин отклонения параметров структуры изготовленного МВС-18 от расчетной, а также заметных микроизгибных потерь при намотке на катушку, то для их выяснения требуются дополнительные исследования. Первым шагом на этом пути станет вытяжка МВС-18 из имеющейся заготовки после нахлопки на нее кварцевой трубки для получения в итоге световода с диаметром сердцевинки около 20 мкм и внешним диаметром около 400 мкм, что обеспечит существенное увеличение расстояний от элементов из легированного фтором кварцевого стекла до внешней границы МВС-18. К тому же световоды 20/400 (распространенное обозначение для световодов с сердцевинкой диаметром 20 мкм и оболочкой диаметром 400 мкм), имеющие диаметр поля моды 17,5 мкм на длине волны 1,06 мкм, являются достаточно перспективными для использования в мощных компактных волоконных лазерах и усилителях, поскольку позволяют, при оптимизации их параметров, достичь выходной мощности до 3 кВт при использовании накачки с длиной волны 976 нм [6].

Заключение

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований полностью стеклянных микроструктурированных волоконных световодов МВС-18, содержащих два слоя круглых элементов из легированного фтором кварцевого стекла с пониженным показателем преломления, разными диаметрами и различными расстояниями между собой. Проведены расчеты потерь на вытекание фундаментальных и высших мод в спектральном диапазоне от 0,70 до 1,65 мкм для прямых и изогнутых МВС-18. Показано, что предложенный дизайн МВС-18 позволяет получить одномодовый режим в спектральном диапазоне от 0,98 до 1,14 мкм при радиусе изгиба до 0,08 м, при этом потери на вытекание для изогнутого МВС-18 на длине волны 1,05 мкм

составляют 0,052 дБ/м. Измеренные потери изготовленного МВС-18 с диаметром сердцевины 22,5 мкм при радиусе изгиба 0,1 м составили менее 0,1 дБ/м в спектральном диапазоне от 0,9 до 1,5 мкм, при этом в диапазоне длин волн от 1,0 до 1,1 мкм эти потери составили от 0,03 до 0,02 дБ/м. Экспериментально продемонстрировано, что отрезки этого МВС-18 длиной более 5 м являются одномодовыми.

Таким образом, МВС-18 может быть использован для доставки мощного лазерного излучения и в перспективе, при наличии легированной ионами иттербия сердцевины, в мощных компактных волоконных лазерах и усилителях.

Авторы выражают благодарность Л.Д. Исхаковой за качественно сделанные микрофотографии поперечного сечения образцов изготовленного МВС-18, а также О.Н. Егоровой за помощь в проведении экспериментальных исследований этих МВС-18.

Список литературы

1. Zervas M.N., Codemard C.A. High Power Fiber Lasers: A Review // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2014. – Vol. 20, № 5. – А. 0904123. – P. 1–23. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2321279.
2. 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser / H. Yu, H. Zhang, H. Iv, X. Wang, J. Leng, H. Xiao, S. Guo, P. Zhou, X. Xu, J. Chen // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, № 14. – P. 4556–4560.
3. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing / S. Ikoma, H.K. Nguyen, M. Kashiwagi, K. Uchiyama, K. Shima, D. Tanaka // Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10083, № 100830Y. – P. 1–6.
4. >1.5kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40nm bandwidth / R. Yagodkin, N. Platonov, A. Yusim, V.P. Gapontsev // Proc. SPIE. – 2016. – Vol. 9728, № 972807. – P. 1–6.
5. ~1 kilowatt Ytterbium-doped all-solid photonic bandgap fiber laser / F. Kong, G. Gu, T.W. Hawkins, M. Jones, J. Parsons, M.T. Kalichevsky-Dong, B. Pulford, I. Dajani, L. Dong // Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10083, № 1008311. – P. 1–5.
6. Next Generation of DC fibers enabling high performance and reliability of industrial fiber lasers beyond 1.5kW levels / C. Jollivet,

J. Bradford, M. Conroy, A. Carter, K. Tankala // *Proc. SPIE.* – 2019. – Vol. 11206, № 1120605. – P. 1–6.

7. Single-mode 3kW Ytterbium fiber amplifier with diffraction-limited divergence in all-fiber format and compact modular package / N. Platonov, R. Yagodkin, J.D.L. Cruz, V. Gapontsev // *Proc. SPIE.* – 2021. – Vol. 11665, № 1166505. – P. 1–6.

8. Непрерывный иттербиевый одномодовый лазер с мощностью излучения 1500 Вт / А.А. Колегов, А.А. Абакшин, А.В. Чумаченко, А.В. Горбачев, Д.А. Фролов, М.С. Козляков // *Фотон-экспресс.* – 2021. – Т. 174, № 6. – С. 145. DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-145.

9. Next generation Yb-doped fibers for high-power, narrow-linewidth lasers / J.W. Nicholson, A. DeSantolo, R.S. Windeler, E. Monberg, V. Lukonin, J. Pincha, A. Hariharan, X. Xu, G. Williams, Z. Goldberg, A. Rosales-Garcia, P. Kristensen, D. Knight, D.J. DiGiovanni // *Proc. SPIE.* – 2022. – Vol. 11981, № 119810R. – P. 1–6.

10. kW-level monolithic single-mode narrow-linewidth all-solid photonic bandgap fiber amplifier / B. Pulford, R. Holten, T. Matniyaz, M.T. Kalichevsky-Dong, T.W. Hawkins, L. Dong // *Opt. Lett.* – 2021. – Vol. 46, № 18. – P. 4458–4461.

11. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW / C. Wirth, O. Schmidt, I. Tsybin, T. Schreiber, R. Eberhardt, J. Limpert, A. Tünnermann, K. Ludewigt, M. Gowin, E.t. Have, M. Jung // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36, № 16. – P. 3118–3120.

12. 100 kW CW fiber laser for industrial applications / V. Fomin, V. Gapontsev, E. Shcherbakov, A. Abramov, A. Ferin, D. Mochalov // 2014 International Conference Laser Optics. – 2014. – P. 1. – 2014. DOI: 10.1109/LO.2014.6886450.

13. Gapontsev V.P. High power, kilo-Watt class fiber lasers are winning and securing new opportunities in automotive and heavy industry // Technical Summary Digest, Photonics West, San Jose, USA, 24-29 January 2004. LASE 2004, 5335-32, Session 6. IPG Photonics, YLR-1000-SM Datasheet, in Catalog of High Power Lasers, 2004.

14. 1.3 kW Yb-doped fiber laser with excellent beam quality / A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer, A. Tünnermann, V. Reichel, K. Mörl, S. Jetschke, S. Unger, H.-R. Müller, J. Kirchhof, T. Sandrock, A. Harschak // *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics 2004.* – San Francisco, USA, 2004, May 16–21, postdeadline paper CPDD2.

15. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power / Y. Jeong, J.K. Sahu, D.N. Payne, J. Nilsson // *Opt. Express.* – 2004. – Vol. 12, № 25. – P. 6088–6092.

16. Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μm mode-field diameter / O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.F. Kosolapov, A.N. Denisov, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.S. Biriukov, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, V.F. Khopin, M.V. Yashkov, A.N. Gurianov, D.V. Kuksenkov // *Opt. Express.* – 2008. – Vol. 16, № 16. – P. 11735–11740.

17. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers / M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20, № 14. – P. 15061–15070.

18. Highly efficient cladding-pumped single-mode three-level Yb all-solid photonic bandgap fiber lasers / T. Matniyaz, W. Li, M. Kalichevsky-Dong, T.W. Hawkins, J. Parsons, G. Gu, L. Dong // *Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 44, № 4. – P. 807–810.

19. Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber / S. Février, R. Jamier, J.-M. Blondy, S.L. Semjonov, M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, V.F. Khopin, M.Y. Salganskii, A.N. Guryanov // *Opt. Express.* – 2006. – Vol. 14, № 2. – P. 562–569.

20. Very-large-mode-area photonic bandgap Bragg fiber polarizing in a wide spectral range / S.S. Aleshkina, M.E. Likhachev, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.N. Denisov, M.M. Bubnov, M.Yu. Salganskii, A.Yu. Laptev, A.N. Guryanov, Y.A. Uspenskii, N.L. Popov, S. Février // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36, № 18. – P. 3566–3568.

21. Polarization-maintaining and single-mode large mode area pixelated Bragg fiber / O. Vanvincq, R. Habert, A. Cassez, K. Baudelle, D. Labat, S. Delobel, Y. Quiquempois, G. Bouwmans, L. Bigot // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45, № 7. – P. 1946–1949.

22. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers / W.S. Wong, X. Peng, J.M. McLaughlin, L. Dong // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, № 21. – P. 2855–2857.

23. Dong L., Peng X., Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2007. – Vol. 24, № 8. – P. 1689–1697.

24. Impact of fiber outer boundaries on leaky mode losses in leakage channel fibers / G. Gu, F. Kong, T.W. Hawkins, P. Foy, K. Wei, B. Samson, L. Dong // *Opt. Express.* – 2013. – Vol. 21, № 20. – P. 24039–24048.

25. Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss / K. Saitoh, Y. Tsuchida, L. Rosa, M. Koshiba, F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri, M. Pal, M. Paul, D. Ghosh, S. Bhadra // *Opt. Express*. – 2009. – Vol. 17, № 6. – P. 4913–4919.

26. Extending Effective Area of Fundamental Mode in Optical Fibers / L. Dong, H.A. McKay, A. Marcinkevicius, L. Fu, J. Li, B.K. Thomas, M.E. Fermann // *J. Lightwave Technol.* – 2009. – Vol. 27, № 11. – P. 1565–1570.

27. Large effective mode area optical fibers for high-power lasers / L. Dong, J. Li, H.A. McKay, L. Fu, B.K. Thomas // *Proc. SPIE* – 2009. – Vol. 7195, № 71950N. – P. 1–8.

28. All-glass large-core leakage channel fibers / L. Dong, T. Wu, H.A. McKay, L. Fu, J. Li, H.G. Winful // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2009. – Vol. 15, № 1. – P. 47–53.

29. Денисов А.Н., Семёнов С.Л. Полностью стеклянные одномодовые микроструктурированные волоконные световоды с большим полем моды // *Доклады Рос. акад. наук. Физика, технические науки*. – 2021. – Т. 497. – С. 12–15.

30. Денисов А.Н., Семёнов С.Л. Полностью стеклянные микроструктурированные волоконные световоды с большим диаметром сердцевин и спектральным диапазоном одномодового режима 0,87 – 1,36 мкм // *Прикладная фотоника*. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 68–87.

31. Денисов А.Н., Семёнов С.Л. Полностью стеклянные одномодовые микроструктурированные волоконные световоды с сердцевиной большого диаметра и малыми изгибными потерями // *Квант. электроника*. – 2021. – Т. 51, № 12. – С. 1081–1089.

32. Optimal Design of Large Mode Area Photonic Crystal Fibers Using a Multiobjective Gray Wolf Optimization Technique / K. Rashidi, S.M. Mirjalili, H. Taleb, D. Fathi // *J. Lightwave Technol.* – 2018. – Vol. 36, № 23. – P. 5626–5632.

33. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – С. 15.

34. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers / R. Guobin, W. Zhi, L. Shuqin, J. Shuisheng // *Opt. Express*. – 2003. – Vol. 11, № 11. – P. 1310–1321.

35. Kuhlmeiy B.T., McPhedran R.C., de Sterke C.M. Modal cutoff in microstructured optical fibers // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27, № 19. – P. 1684–1686.

36. Tsuchida Y., Saitoh K., Koshiba M. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses // *Opt. Express* – 2005. – Vol. 13, № 12. – P. 4770–4779.

37. Schermer R.T. Mode scalability in bent optical fibers // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15, № 24. – P. 15674–15701.

38. Fini J.M. Design of solid and microstructure fibers for suppression of higher-order modes // *Opt. Express*. – 2005. – Vol. 13, № 9. – P. 3477–3490.

39. Design of photonic band gap fibers with suppressed higher-order modes: Towards the development of effectively single mode large hollow-core fiber platforms / K. Saitoh, N.J. Florous, T. Murao, M. Koshiba // *Opt. Express*. – 2006. – Vol. 14, № 16. – P. 7342–7352.

40. Tsuchida Y., Saitoh K., Koshiba M. Design of single-moded holey fibers with large-mode-area and low bending losses: The significance of the ring-core region // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15, № 4. – P. 1794–1803.

References

1. Zervas M.N., Codemard C.A. High Power Fiber Lasers: A Review // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, vol. 20, no. 5, A. 0904123, pp. 1-23. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2321279

2. Yu H., Zhang H., Iv H., Wang X., Leng J., Xiao H., Guo S., Zhou P., Xu X., Chen J. 3.15 kW direct diode-pumped near diffraction-limited all-fiber-integrated fiber laser. *Appl. Opt.*, 2015, vol. 54, no. 14, pp. 4556-4560.

3. Ikoma S., Nguyen H.K., Kashiwagi M., Uchiyama K., Shima K., Tanaka D. 3 kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for highly reflective and highly thermal conductive materials processing. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10083, no. 100830Y, pp. 1-6.

4. Yagodkin R., Platonov N., Yusim A., Gapontsev V.P. >1.5kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9728, no. 972807, pp. 1-6.

5. Kong F., Gu G., Hawkins T.W., Jones M., Parsons J., Kalichevsky-Dong M.T., Pulford B., Dajani I., Dong L. ~1 kilowatt Ytterbium-doped all-solid photonic bandgap fiber laser. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10083, no 1008311, pp. 1-5.

6. Jollivet C., Bradford J., Conroy M., Carter A., Tankala K. Next Generation of DC fibers enabling high performance and reliability of

industrial fiber lasers beyond 1.5kW levels. *Proc. SPIE*, 2019, vol. 11206, no. 1120605, pp. 1-6.

7. Platonov N., Yagodkin R., Cruz J.D.L., Gapontsev V. Single-mode 3kW Ytterbium fiber amplifier with diffraction-limited divergence in all-fiber format and compact modular package. *Proc. SPIE*, 2021, vol. 11665, no. 1166505, pp. 1-6.

8. Kolegov A.A., Abakshin A.A., Chumachenko A.V., Gorbachev A.V., Frolov D.A., Kozliakov M.S. Nepreryvnyi itterbievyi odnomodovyi lazer s moshchnost'iu izlucheniia 1500 Wt [CW ytterbium single-mode laser with a radiation power of 1500 W. *Foton-ekspress*, 2021, vol. 174, no. 6, 145 p. DOI: 10.24412/2308-6920-2021-6-145

9. Nicholson J.W., DeSantolo A., Windeler R.S., Monberg E., Lukonin V., Pincha J., Hariharan A., Xu X., Williams G., Goldberg Z., Rosales-Garcia A., Kristensen P., Knight D., DiGiovanni D.J. Next generation Yb-doped fibers for high-power, narrow-linewidth lasers. *Proc. SPIE*, 2022, vol. 11981, no. 119810R, pp. 1-6.

10. Pulford B., Holten R., Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M.T., Hawkins T.W., Dong L. kW-level monolithic single-mode narrow-linewidth all-solid photonic bandgap fiber amplifier. *Opt. Lett.*, 2021, vol. 46, no. 18, pp. 4458-4461.

11. Wirth C., Schmidt O., Tsybin I., Schreiber T., Eberhardt R., Limpert J., Tünnermann A., Ludewigt K., Gowin M., Have E.Ten, Jung M. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW. *Opt. Lett.*, 2011, vol. 36, no. 16, pp. 3118-3120.

12. Fomin V., Gapontsev V., Shcherbakov E., Abramov A., Ferin A., Mochalov D. 100 kW CW fiber laser for industrial applications. *2014 International Conference Laser Optics*, 2014, 1 p. DOI: 10.1109/LO.2014.6886450

13. Gapontsev V.P. High power, kilo-Watt class fiber lasers are winning and securing new opportunities in automotive and heavy industry. *Technical Summary Digest, Photonics West, San Jose, USA*, 24-29 January 2004. LASE 2004, 5335-32, Session 6. IPG Photonics, YLR-1000-SM Datasheet, in Catalog of High Power Lasers, 2004.

14. Liem A., Limpert J., Zellmer H., Tünnermann A., Reichel V., Mörl K., Jetschke S., Unger S., Müller H.-R., Kirchhof J., Sandrock T., Harschak A. 1.3 kW Yb-doped fiber laser with excellent beam quality. *Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics 2004*. San Francisco, USA, 2004, May 16-21 postdeadline paper CPDD2.

15. Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., Nilsson J. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Opt. Express*, 2004, vol. 12, no. 25, pp. 6088-6092.
16. Egorova O.N., Semjonov S.L., Kosolapov A.F., Denisov A.N., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Biriukov A.S., Dianov E.M., Salganskii M.Y., Khopin V.F., Yashkov M.V., Gurianov A.N., Kuksenkov D.V. Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μ m mode-field diameter. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 16, pp. 11735-11740.
17. Kashiwagi M., Saitoh K., Takenaga K., Tanigawa S., Matsuo S., Fujimaki M. Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers. *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 14, pp. 15061-15070.
18. Matniyaz T., Li W., Kalichevsky-Dong M., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Dong L. Highly efficient cladding-pumped single-mode three-level Yb all-solid photonic bandgap fiber lasers. *Opt. Lett.*, 2019, vol. 44, no. 4, pp. 807-810.
19. Février S., Jamier R., Blondy J.-M., Semjonov S.L., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Dianov E.M., Khopin V.F., Salganskii M.Y., Guryanov A.N. Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber. *Opt. Express*, 2006, vol. 14, no. 2, pp. 562-569.
20. Aleshkina S.S., Likhachev M.E., Pryamikov A.D., Gaponov D.A., Denisov A.N., Bubnov M.M., Salganskii M.Yu., Laptev A.Yu., Guryanov A.N., Uspenskii Y.A., Popov N.L., Février S. Very-large-mode-area photonic bandgap Bragg fiber polarizing in a wide spectral range. *Opt. Lett.*, 2011, vol. 36, no. 18, pp. 3566-3568.
21. Vanvincq O., Habert R., Cassez A., Baudelle K., Labat D., Delobel S., Quiquempois Y., Bouwmans G., Bigot L. Polarization-maintaining and single-mode large mode area pixelated Bragg fiber. *Opt. Lett.*, 2020, vol. 45, no. 7, pp. 1946-1949.
22. Wong W.S., Peng X., McLaughlin J.M., Dong L. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, no. 21, pp. 2855-2857.
23. Dong L., Peng X., Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, vol. 24, no. 8, pp. 1689-1697.
24. Gu G., Kong F., Hawkins T.W., Foy P., Wei K., Samson B., Dong L. Impact of fiber outer boundaries on leaky mode losses in leakage channel fibers. *Opt. Express*, 2013, vol. 21, no. 20, pp. 24039-24048.
25. Saitoh K., Tsuchida Y., Rosa L., Koshiba M., Poli F., Cucinotta A., Selleri S., Pal M., Paul M., Ghosh D., Bhadra S. Design of all-solid

leakage channel fibers with large mode area and low bending loss. *Opt. Express*, 2009, vol. 17, no. 6, pp. 4913-4919.

26. Dong L., McKay H.A., Marcinkevicius A., Fu L., Li J., Thomas B.K., Fermann M.E. Extending Effective Area of Fundamental Mode in Optical Fibers. *J. Lightwave Technol.*, 2009, vol. 27, no. 11, pp. 1565-1570.

27. Dong L., Li J., McKay H.A., Fu L., Thomas B.K. Large effective mode area optical fibers for high-power lasers. *Proc. SPIE*, 2009, vol. 7195, no. 71950N, pp. 1-8.

28. Dong L., Wu T., McKay H.A., Fu L., Li J., Winful H.G. All-glass large-core leakage channel fibers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 47-53.

29. Denisov A.N., Semenov S.L. Polnost'iu stekliannye odnomodovye mikrostrukturirovannye volokonnye svetovody s bol'shim polem mody [All-glass single-mode microstructured fibers with a large mode field]. *Doklady Ros. akad. nauk. Fizika, tekhnicheskie nauki*, 2021, vol. 497, pp. 12-15.

30. Denisov A.N., Semenov S.L. Polnost'iu stekliannye mikrostrukturirovannye volokonnye svetovody s bol'shim diametrom serdtsevinny i spektral'nym diapazonom odnomodovogo rezhima 0,87-1,36 mkm [All-glass microstructured optical fibers with a large core diameter and a single-mode spectral range of 0.87-1.36 μm]. *Applied photonics*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 68-87.

31. Denisov A.N., Semenov S.L. Polnost'iu stekliannye odnomodovye mikrostrukturirovannye volokonnye svetovody s serdtsevinnoi bol'shogo diametra i malymi izgibnymi poteriami [All-glass single-mode microstructured fibers with a large core diameter and low bending loss]. *Kvant. elektronika*, 2021, vol. 51, no. 12, pp. 1081-1089.

32. Rashidi K., Mirjalili S.M., Taleb H., Fathi D. Optimal Design of Large Mode Area Photonic Crystal Fibers Using a Multiobjective Gray Wolf Optimization Technique. *J. Lightwave Technol.*, 2018, vol. 36, no. 23, pp. 5626-5632.

33. Agrawal G. Nelineinaia volokonnaia optika [Nonlinear fiber optics]. Moscow: Mir, 1996, 15 p.

34. Guobin R., Zhi W., Shuqin L., Shuisheng J. Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers. *Opt. Express*, 2003, vol. 11, no. 11, pp. 1310-1321.

35. Kuhlmeier B.T., McPhedran R.C., de Sterke C.M. Modal cutoff in microstructured optical fibers. *Opt. Lett.*, 2002, vol. 27, no. 19, pp. 1684-1686.

36. Tsuchida Y., Saitoh K., Koshiba M. Design and characterization of single-mode holey fibers with low bending losses. *Opt. Express*, 2005, vol. 13, no. 12, pp. 4770-4779.

37. Schermer R.T. Mode scalability in bent optical fibers. *Opt. Express*, 2007, vol. 15, no. 24, pp. 15674-15701.

38. Fini J.M. Design of solid and microstructure fibers for suppression of higher-order modes. *Opt. Express*, 2005, vol. 13, no. 9, pp. 3477-3490.

39. Saitoh K., Florous N.J., Murao T., Koshiba M. Design of photonic band gap fibers with suppressed higher-order modes: Towards the development of effectively single mode large hollow-core fiber platforms. *Opt. Express*, 2006, vol. 14, no. 16, pp. 7342-7352.

40. Tsuchida Y., Saitoh K., Koshiba M. Design of single-moded holey fibers with large-mode-area and low bending losses: The significance of the ring-core region. *Opt. Express*, 2007, vol. 15, no. 4, pp. 1794-1803.

Сведения об авторах

ДЕНИСОВ Александр Николаевич
e-mail: denisov@fo.gpi.ru

Научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

СЕМЁНОВ Сергей Львович
e-mail: sls@fo.gpi.ru

Руководитель, доктор физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

About the authors

DENISOV Alexander Nikolaevich
e-mail: denisov@fo.gpi.ru

Researcher, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Research Center for Fiber Optics. EAT. Dianova – a separate division of the Federal Research Center "Institute of General Physics named after A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences" (Moscow, Russian Federation)

SEMYONOV Sergey Lvovich
e-mail: sls@fo.gpi.ru

Head, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Research Center for Fiber Optics named after V.I. EAT. Dianova - a separate division of the Federal Research Center "Institute of General Physics. A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

ЛИХАЧЁВ Михаил Евгеньевич

e-mail: likhachev@fo.gpi.ru

Заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

ВЕЛЬМИСКИН Владимир

Владимирович

e-mail: sls@fo.gpi.ru

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

КОСОЛАПОВ Алексей Федорович

e-mail: kaf@fo.gpi.ru

Старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

ЖУРАВЛЁВ Сергей Геннадьевич

e-mail: mazerator3000@yandex.ru

Младший научный сотрудник Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (Москва, Российская Федерация)

ЛИХАЧЕВ Mikhail Evgenievich

e-mail: likhachev@fo.gpi.ru

Head of Laboratory, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Center for Fiber Optics named after EAT. Dianova is a separate subdivision of the Federal Research Center "Institute of General Physics. A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

VELMISKIN Vladimir

Vladimirovich

e-mail: sls@fo.gpi.ru

Senior Researcher, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Research Center for Fiber Optics. EAT. Dianova is a separate subdivision of the Federal Research Center "Institute of General Physics them. A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

KOSOLAPOV Alexey Fedorovich

e-mail: kaf@fo.gpi.ru

Senior Researcher, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Research Center for Fiber Optics. EAT. Dianova - a separate subdivision of the Federal Research Center "Institute of General Physics. A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

ZHURAVLEV Sergey Gennadievich

e-mail: mazerator3000@yandex.ru

Junior Research Fellow, Research Center for Fiber Optics. EAT. Dianova - a separate division of the Federal Research Center "Institute of General Physics. A.M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 075-15-2022-315 на создание и развитие научного центра мирового уровня «Центр фотоники»).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 12.12.2022

Одобрена: 22.12.2022

Принята к публикации: 01.02.2022

Funding: the work was supported by the Ministry of Education and Science (grant No. 075-15-2022-315 for the creation and development of a world-class scientific center "Photonics Center").

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 12/12/2022

Approved: 22/12/2022

Accepted for publication: 01/02/2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Полностью стеклянные микроструктурированные волоконные световоды с каналами вытекания, большим полем моды и малыми изгибными потерями / А.Н. Денисов, С.Л. Семёнов, М.Е. Лихачёв, В.В. Вельмискин, А.Ф. Косолапов, С.Г. Журавлёв // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 11–45.

Please cite this article in English as: Denisov A.N., Semjonov S.L., Likhachev M.E., Velmiskin V.V., Kosolapov A.F., Zhuravlev S.G. All-glass leakage channel microstructured optical fibers with large mode area and low bending loss // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 11-45.

УДК 621.372.082.5

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.03

**А.А. Гаркушин^{1,2}, В.В. Криштон^{1,2,3}, В.А. Максименко¹, М.А. Гарипова^{1,2},
Н.С. Милюков^{1,2}, К.Д. Трапезников^{1,2}, Е.В. Нифонтова^{1,2}, П.В. Зуева^{1,2}**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ POWER-OVER-FIBER

Проведен обзор перспективной и развивающейся технологии Power-over-Fiber – передача энергии большой мощности по оптоволокну удалённым потребителям. Рассмотрены преимущества данной технологии, а также возможность её применения на пожаро- и взрывоопасном производстве. Приведены плюсы и минусы разработки прецизионных измерительных систем на основе PoF-технологии. Отмечено, что технология PoF становится все более востребованной в сфере энергоснабжения телекоммуникационных и IT-систем.

Ключевые слова: передача энергии, оптическое волокно, прецизионные измерения, сети 5G, энергоэффективность.

**A.A. Garkushin^{1,2}, V.V. Krishtop^{1,2,3}, V.A. Maksimenko¹, M.A. Garipova^{1,2},
N.S. Milyukov^{1,2}, K.D. Trapeznikov^{1,2}, E.V. Nifontova^{1,2}, P.V. Zueva^{1,2}**

¹Perm National Research Polytechnic university, Perm, Russia

²Perm Research and Production Instrument-Making company, Perm, Russia

³Perm State National Research university, Perm, Russia

PROSPECTS FOR APPLICATION OF POWER-OVER-FIBER TECHNOLOGY

A review of the promising and developing Power-over-Fiber technology – the transmission of high-power energy via optical fiber to remote consumers was carried out. The advantages of this technology, as well as its possible application in fire and explosion hazardous production, are considered. The advantages and disadvantages of developing precision measuring systems based on PoF technology are presented. It is noted that PoF technology is becoming more and more in demand in the field of power supply of telecommunications and IT systems.

Keywords: power transmission, optical fiber, precision measurements, 5G networks, energy efficiency.

Введение

В последние десятилетия происходит активное развитие технологий, так или иначе связанных с оптикой: волоконная оптика, интегральная оптика, квантовая оптика, оптоэлектроника и т.д. Для всех этих направлений в настоящее время применяется обобщающий термин – «фотоника».

Основной упор в фотонике закономерно делается на разработке и совершенствовании оптических инфокоммуникационных систем, т.е. систем передачи и обработки информации, работающих в оптическом частотном диапазоне. Однако имеются не связанные с инфокоммуникационными задачами направления (по крайней мере, напрямую), в которых могут оказаться востребованы технологии фотоники.

Одним из таких перспективных направлений является развитие технологии передачи энергии в виде оптического излучения на значительные расстояния для энергоснабжения потребителей различных типов (датчики, прецизионные системы исполнительные механизмы и др.) [1]. В рамках такого подхода можно выделить два отдельных направления: передача оптической энергии большой мощности в воздухе/вакууме – технология PoA/V (Power-over-Air/Vacuum) [2] и передача оптической энергии большой мощности по оптическим световодам (волокнам) – технология Power-over-Fiber (PoF) [3].

Передача энергии через воздушный канал на современном этапе развития науки и техники не очень эффективна из-за большого поглощения излучения в атмосфере и подвержена влиянию погодных условий, например, становится невозможной в дождь или снег. Решением могут стать волоконно-оптические технологии, которые сегодня являются основным способом передачи информации.

Power-over-fiber – это инновационная технология питания электронных устройств по оптическому волокну [4]. Технология позволяет осуществлять питание устройства с передаваемой мощностью от десятков милливатт до десятков ватт, при этом длина передачи варьируется от нескольких метров до 100 км, обеспечивая при этом электрическую изоляцию между устройством и источником питания [5]. Основными элементами системы PoF (рис. 1) являются источник лазерного излучения (800, 950, 1050, 1480 нм и др.),

волоконно-оптический кабель и фотоэлектрический преобразователь (конвертер оптической энергии).

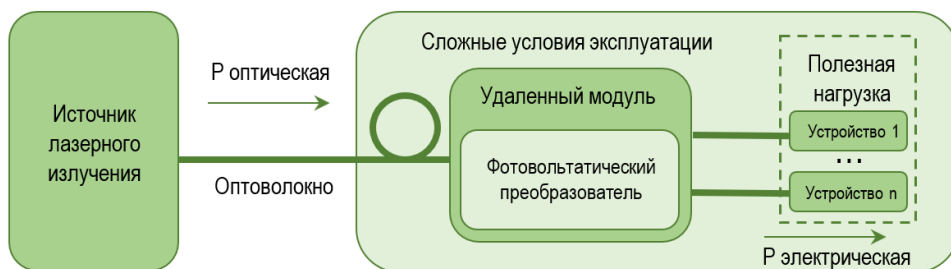


Рис. 1. Структурная схема системы PoF

Оптическая технология передачи энергии большой мощности позволяет передавать энергию оптического (лазерного) излучения удаленным потребителям с её последующим преобразованием в электрическую энергию с помощью фотоэлектрического преобразователя (ФЭПРВС) (рис. 2).

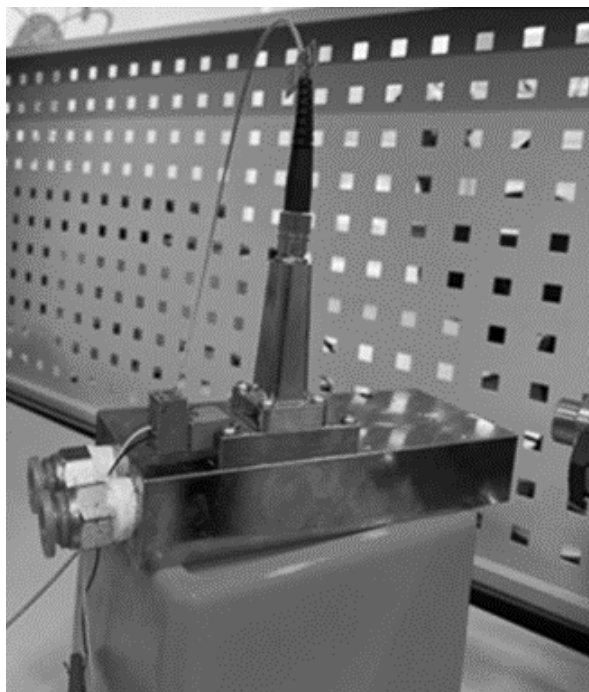


Рис. 2. Фотоэлектрический преобразователь YCH-H6424-25-FC-A фирмы «MH GoPower»

Использование данной технологии позволяет отказаться от металлических проводников и аккумуляторов в тех случаях, когда их применение связано с серьезными проблемами с точки зрения технической реализации. Например, когда это может повлиять на функциональность оборудования или же представлять угрозу для обслуживающего персонала.

Можно выделить следующие основные преимущества технологии PoF:

- полная гальваническая развязка питаемого устройства от источника питания;
- помехозащищенность линии питания;
- отсутствие влияния на соседние линии связи;
- снижение риска возгорания проводки вследствие повреждения изоляции;
- уменьшение габаритов и веса линии питания.

Технологии PoF применяются в контрольно-измерительных системах для электрических сетей (высоковольтные датчики, камеры для контроля подстанций), в судовом и бортовом оборудовании (во взрывоопасных зонах), телекоммуникационных сетях (антенны сотовой связи) и в медицинской технике (высоковольтные элементы лечебно-диагностического оборудования) [6]. Также такие системы могут использоваться для защиты системы энергопитания от опасных электромагнитных импульсов, например, от молнии или для снижения риска воспламенения функциональных узлов системы энергоснабжения в сложных производственных условиях. Энергоснабжение через оптическое волокно также может быть востребовано в приложениях, в которых важно избегать воздействия на чувствительные элементы устройств со стороны электромагнитных полей, создаваемых переменным электрическим током. Также PoF-технологии могут найти применение в военных приложениях, требующих скрытности [4].

Ниже охарактеризованы основные направления, в которых технологии PoF могут быть наиболее востребованы (рис. 3):

- пожаро- и взрывоопасные производства;
- прецизионные датчики и системы на их основе;
- телекоммуникации и специализированные системы, требующие скрытности.

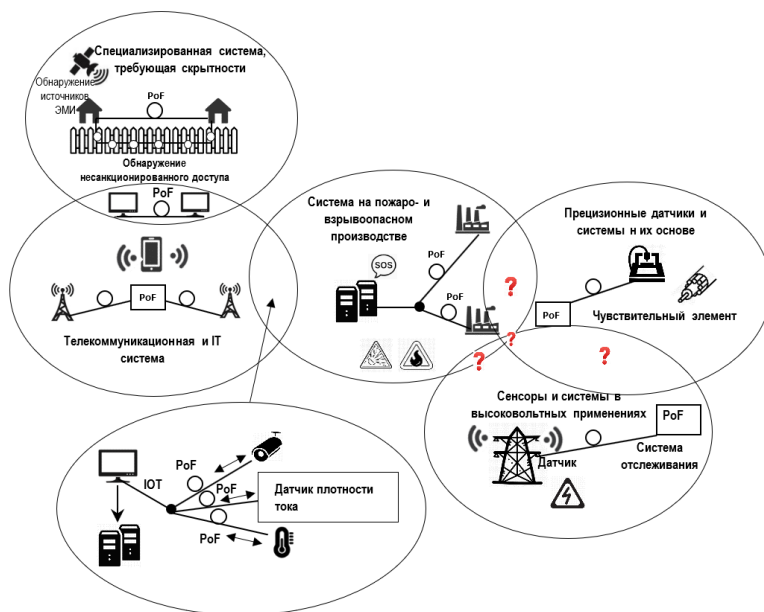


Рис. 3. Основные направления применения систем с использованием технологии PoF

1. Энергоснабжение систем на пожаро- и взрывоопасном производстве

Технология PoF может быть успешно применена для питания сенсоров, средств мониторинга и контроля доступа во взрывоопасном и пожароопасном производстве. К взрывоопасному производству традиционно относят следующие промышленные направления: горнодобывающая промышленность, нефтегазовый сектор, опасные производства военного назначения и другие аналогичные промышленные объекты.

Системы, разработанные с применением технологии PoF, могут успешно применяться для контроля предельно допустимой концентрации взрывоопасных, легковоспламеняющихся и вредных веществ в воздухе, мониторинга параметров окружающей среды, таких как температура, влажность, освещенность, а также для контроля доступа с целью предотвращения проникновения посторонних лиц на критически важные объекты инфраструктуры промышленных предприятий [7, 8].

Сегодня широко распространены традиционные технологии энергоснабжения сенсорных сетей, телеметрических систем и других аналогичных приборов, основанные на питании устройств от проводной

электрической сети. Такие технологии хорошо развиты и широко используются в непрерывном процессе добычи полезных ископаемых, нефти и газа, а также в производственных процессах, связанных с высоким риском возгорания или взрыва.

Однако в научных статьях последнего времени исследователи все чаще заявляют, что оптическая система является более современным, эффективным и безопасным методом передачи энергии для энергоснабжения подобных потребителей. В своих работах авторы публикаций описывают применение технологии передачи энергии большой мощности по волокну исключительно в положительном свете, обходя сложные исследовательские инженерные задачи, которые необходимо решить для внедрения систем на основе технологии PoF в инфраструктуру промышленных объектов.

Авторы многих статей [9, 10] априори считают, что технология Power-over-Fiber пожаро- и взрывобезопасна. Только в немногочисленных источниках, например [11], исследователи проводят работы с целью определения реального уровня безопасности данной технологии. В данной публикации отмечается, что предельная оптическая мощность, которая может быть передана по технологии PoF в условиях пожаро- взрывоопасной среды, не превышает 50 мВт.

С учетом реальной эффективности преобразования энергии оптического излучения в электрическую энергию КПД фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) для используемых длин волн (808, 980, 1064, 1330, 1550 нм) [3, 12] сегодня не превышает 35 % [13]. Исходя из вышеизложенного, получается, что система, установленная на удаленном конце волоконного кабеля, питаемая от фотоэлектрического преобразователя, должна обладать очень низким энергопотреблением, в районе 15–20 мВт. А это, в свою очередь, сужает количество сенсоров, модулей сбора и обработки данных с датчиков физических величин, а также исполнительных устройств, которые могут быть одновременно запитаны по данной технологии, при этом выдерживая строгие требования по пожаро- и взрывобезопасности. Данный факт означает, что существенно сужается число реальных применений, где на промышленных объектах может использоваться технология PoF в ее современном виде.

Также необходимо отметить, что для внедрения технологии PoF в такую ответственную и социально значимую сферу потребуются

колоссальные финансовые вложения, а также огромные трудозатраты, связанные с проведением испытаний и сертификацией с целью подтверждения соответствия требованиям по уровням пожаро- и взрывобезопасности. Отсюда можно сделать вывод, что рентабельность проектов на основе PoF-технологии для промышленных объектов с повышенными требованиями к пожаро- и взрывобезопасности на сегодняшний день находится на крайне низком уровне.

Отметим, что если добиться необходимого повышения КПД системы энергоснабжения удаленных объектов, основанной на технологии PoF, то решения, реализованные с применением этой технологии, имеют все шансы стать конкурентоспособными и востребованными в данном сегменте рынка.

Повысить КПД преобразования оптической энергии в электрическую можно, например, используя нелинейный регулятор для формирования обратной связи между лазерным источником и фотоэлектрическим преобразователем и/или используя новые типы волокна для снижения затухания в линии.

Кроме того, целесообразно направить усилия ученых и инженеров на совершенствование архитектуры PoF-систем. Например, изучить возможность уменьшения массогабаритных параметров системы за счет передачи энергии и обмена данными между блоком управления и датчиками по одному оптоволоконному кабелю. Такой подход существенно сократит объем кабельного хозяйства, а это, в свою очередь, приведёт к уменьшению себестоимости системы в целом.

Таким образом, если сосредоточить усилия ученых и инженеров на конструктивной оптимизации технологии PoF, топологии оптоволоконных сетей и алгоритмов функционирования систем на их основе, а также оптимизировать их с точки зрения потребления электроэнергии, то в конечном итоге это положительно отразится на рентабельности и востребованности таких систем на рынке.

2. Энергопитание прецизионных датчиков и систем на их основе с применением технологии PoF

Прецизионные измерения требуют особо тщательной стыковки всех компонентов системы между собой с целью минимизации паразитных эффектов, таких как шумы (температурный, дробовый и др.) электрические и магнитные поля, возникающие как снаружи системы,

так и порождаемые ее внутренними компонентами. Другими важными аспектами являются затухание полезного сигнала и его целостность при передаче между функциональными узлами. С этой точки зрения технология PoF может внести существенный положительный вклад для достижения новой ступени в прецизионных измерениях. На текущий момент примеры реализации прецизионных измерительных систем с применением технологии PoF описаны в достаточно небольшом перечне научных работ. Обзор наиболее значимых, на наш взгляд, работ представлен ниже.

Например, в статье [13] описываются результаты эксперимента по использованию двухспектрального волоконно-оптического пирометра, имеющего 2 рабочие длины волны, в основу которого входят InGaAs (арсенид галлия-индия) фотодетекторы и малошумящие трансимпедансные усилители с высоким коэффициентом усиления. Нововведением, описанным в статье, является особенная конструкция затвора. Суть её реализации заключается в использовании оптоволоконного переключателя опорной волны, питание которого осуществляется с применением технологии PoF. По сравнению с традиционным методом питания такой подход позволяет поместить переключатель максимально близко к объекту измерения. Рабочий диапазон температур, в котором проводились испытания пирометра с волоконно-оптическим датчиком, составлял 170–530°C. Целью использования данного пирометра является быстрое измерение температуры в процессах обработки материалов или при работе роторного двигателя [14] в тех случаях, когда необходимо определить температуру в конкретной области. Однако в случае быстровращающегося резака или при наличии сильных электромагнитных помех, создаваемых работой двигателя, использование привычных радиационных пирометров, инфракрасных камер и электрических датчиков ограничивается множеством факторов [15, 16]. Такими факторами являются: сложность позиционирования аппаратуры, высокая чувствительность датчиков к электромагнитным помехам, а в случае применения радиационных пирометров накладываются ограничения, связанные с необходимостью компромисса между обеспечением подходящего пространственного разрешения и сбором достаточного количества излучаемого света.

Использование волоконно-оптического пирометра в перечисленных случаях позволяет непосредственно контролировать изменения

температуры с высокой скоростью в точно заданных областях диаметром не более 1 мм. Однако возникает проблема недостаточной точности измерений низких температур. Такая проблема возникает, например, когда требуется измерить температуру полимерных композиционных материалов или металлов с низкой излучательной способностью.

В другой статье, посвящённой применению PoF-технологий при проектировании прецизионных систем [17], описываются принципы построения волоконно-оптической системы, регистрирующей сейсмическую активность в естественных акваториях. Ключевыми элементами данной системы являются молекулярно-электронные датчики-приёмники упругих волн, волоконно-оптические интеррогаторы (системы сбора данных с датчиков), оптоэлектронные компоненты для организации энергоснабжения чувствительных элементов регистратора сейсмоактивности с помощью технологии PoF, оптоволоконные кабели для телеметрии и передачи оптической энергии большой мощности. Такие системы применяют, когда необходимо провести сейсмические исследования акватории мирового океана, в том числе перед началом разработки нефтегазовых месторождений [18]. При решении задач мониторинга со значительной протяжённостью донных кос и долговременной инсталляцией возникает проблема с появлением электромагнитных помех, к ней добавляются и потери при передаче сигнала на большие расстояния, а также необходимость организации пожаробезопасных цепей энергоснабжения компонентов устройства. Следовательно, возникает задача по улучшению отношения сигнал/шум и обеспечению необходимой надёжности работы системы. Известные активно используемые методы хотя и позволяют добиться приемлемых результатов [17], но, в свою очередь, сильно усложняют итоговую схему, делая её более громоздкой и финансово затратной, а нововведённые компоненты также подвергаются влиянию электромагнитных помех. Соответственно, энергоснабжение донной регистрирующей системы для морской сейсморазведки, реализованное на основе технологии PoF, оказалось оптимальным решением указанных проблем [17].

В целом в вышеприведённых статьях авторы отмечают, что применение PoF-технологии уменьшает количество компонентов в системе, что позволяет избежать проблем с синхронизацией между ними. Экспериментальные результаты с использованием оптического

переключателя также дают положительный результат при работе в верхней границе температурного диапазона, увеличив чувствительность измерений на два порядка с мВ/°С до десятых долей мкВ/°С. Но одновременно с этим такой подход усложнил аналогичные измерения на более низких температурах диапазона измерений. Применение технологии PoF в сейсмических регистрирующих системах решает проблему энергоснабжения сейсмодатчиков и гидрофонов, открывая возможность пассивного гидроакустического мониторинга акватории в месте её развёртывания.

Таким образом, плюсы от использования технологии PoF при разработке прецизионных измерительных систем следующие:

- Технология PoF снижает общую сложность схемы, упрощая ее за счет уменьшения числа компонентов.
- Технология PoF обеспечивает быстрое и точное измерение определяемых физических величин, без искажений, связанных с наличием сильных электромагнитных помех.
- Технология PoF упрощает синхронизацию между компонентами устройства за счёт уменьшения их общего числа в сравнении с типовыми конструкциями измерительных приборов.
- Технология PoF обеспечивает пожаробезопасность за счёт отсутствия возможного электрического замыкания.
- Технология PoF уменьшает конечную стоимость системы за счёт минимизации числа используемых компонентов по сравнению классическими подходами.

Однако стоит отметить, что использование технологии PoF при разработке прецизионных измерительных систем в настоящий момент сопряжено с рядом сложностей. Основные из них перечислены ниже:

- Использование оптических компонентов в некоторых случаях может оказывать негативное влияние на процесс измерения физических величин при низких температурах без использования дополнительного усилителя [13].
- Интегрирование решений на базе технологии PoF зачастую связано с изменением архитектуры построения измерительной системы, а также сопряжено с использованием дополнительных оптоэлектронных компонентов, отсутствующих в опробованных ранее решениях. В таких случаях достаточно сложно достоверно оценить

вклад самой технологии PoF в получаемые точностные характеристики измерительных систем.

Например, если обратиться к задачам пирометрии, то необходимо отметить, что на сегодня в научных статьях отсутствуют данные об использовании пирометра для измерения температуры при быстро протекающих циклах нагревания или охлаждения. Это не позволяет сделать вывод о пригодности такого подхода для решения большого числа прикладных задач.

В целом, при создании широкой номенклатуры измерительных приборов с применением технологии PoF в настоящее время имеется еще одна существенная проблема – она заключается в том, что необходимые фотоэлектрические преобразователи для энергоснабжения прецизионных измерительных систем (регистраторов сейсмической активности, пирометров и др.) пока что малодоступны в серийном промышленном производстве, несмотря на их теоретическую проработанность.

3. Энергоснабжение телекоммуникационных и IT-систем (RF: 5G, ARoF, и т.д.) за счет PoF-технологии

Сегодня оптические линии связи успешно конкурируют с традиционными медными линиями и беспроводными технологиями. Основой систем передачи оптического излучения является оптическое волокно. Именно оптическое волокно позволяет многократно увеличить объемы и скорость передаваемой информации по сравнению с традиционной электрической кабельной связью. Технология PoF становится все более востребованной в сегменте передачи данных стандарта 5G.

Для внедрения технологии 5G нового поколения необходимо решить большой перечень сложных задач. Среди них особо стоит выделить следующие: высокая скорость передачи данных, низкая задержка и малое потребление энергии. Совершенствование сетей широкополосного доступа направлено на повышение их рентабельности и предусматривает интеграцию технологии передачи оптической мощности, а также пакетов данных в одном и том же канале одномодового волокна (SMF). Централизованные сети радиодоступа (C-RAN) на основе «аналоговой передачи радиочастотных сигналов по

оптическому волокну» (Analog Radio over Fiber /ARoF) могут справиться с задачами, указанными выше.

Технология ARoF с архитектурой «front-haul» для сетей 5G обладает рядом важных преимуществ, таких как низкие потери при передаче и конструктивная простота, требуемая для реализации технологии удаленных антенных блоков, а также соответствие закладываемым требованиям по пропускной способности, необходимой для сетей 5G нового поколения. Благодаря этому направление развития технологии передачи данных имеет большие перспективы для воплощения в сфере мобильного волоконного соединения, где будет использовано мультиплексирование с пространственным разделением каналов (SDM) [5].

Развитие технологии 5G идет в направлении уменьшения размера ячеек удаленных антенных блоков, что позволяет обеспечить требуемые полосы пропускания радиочастотных сигналов. Однако такой подход приводит к многократному увеличению необходимого количества используемых удаленных антенных блоков. При этом существует потенциальная возможность упростить конструкцию удаленных антенных блоков и снизить их энергопотребление до типовых значений порядка 100 мВт. Для оптического питания удаленных антенных блоков можно использовать решения на базе PoF [3, 19]. В данном случае применение технологии PoF позволит существенно улучшить показатели энергоэффективности инфраструктуры сетей передачи данных нового поколения. Для энергоснабжения удаленных объектов по технологии PoF необходимо использовать оптоволоконные световоды. В настоящий момент в существующих сетях доступа повсеместно используют именно оптические волокна для организации инфраструктуры передачи данных. Таким образом, оптическое волокно проложено именно в тех местах, где оно требуется для организации сетей доступа «малых сот», а кроме того, оно максимально доступно для потенциальных клиентов. Также стоит отметить, что высоких показателей энергоэффективности можно добиться за счет использования специальных алгоритмов оптимизации энергопотребления в случае организации динамического энергоснабжения удаленных антенных блоков оптической энергией по оптоволоконному кабелю.

Трафик данных стандартов квадратурной амплитудной модуляции – 64QAM, 16QAM 256QAM и квадратурной фазовой моду-

ляции – QPSK с полосой пропускания 100 МГц возможно передавать одновременно с передачей оптической энергии большой мощности по технологии PoF. Сегодня передача радиочастотных сигналов по оптическим световодам (технология RoF) через одномодовое волокно с одновременным введением сигнала PoF осуществима для оптических линий длиной от 100 м до 10 км и мощностью от 0,5 до 2 Вт. При этом величина вектора ошибки соответствует стандарту 5G «New Radio» и связана обратной зависимостью с величиной мощности передаваемой энергии. Величина вектора ошибки 4,3 % может быть достигнута с помощью радиочастотного сигнала с частотой 20 ГГц при использовании квадратурной фазовой модуляции при одновременной передаче 870 мВт оптической мощности на фотоэлектрический элемент, установленный на конце одномодового волокна линии протяженностью 10 км [3].

Таким образом, при разработке систем оптического энергоснабжения телекоммуникационных систем нового поколения следует рассмотреть следующие наиболее важные аспекты:

- 1) увеличение передаваемой мощности;
- 2) увеличение длины передачи;
- 3) использование более сложных конструкций волоконных кабелей;
- 4) увеличение КПД платформ PoF, используемых в телекоммуникационных системах;
- 5) повышение частоты сигнала;
- 6) увеличение скорости передачи данных.

Рассматривая положительные стороны описываемой PoF-технологии с точки зрения ее использования в телекоммуникациях, можно выделить ряд основных преимуществ:

- возможность встраивания в имеющуюся телекоммуникационную инфраструктуру, при этом улучшается технологичность процесса построения материально-технической базы, что позволяет использовать технологию PoF повсеместно;
- внедрение технологии PoF обеспечивает экономное потребление мировых энергоресурсов, а также помогает снизить выбросы углекислого газа в окружающую среду [20], что положительно отразится на мировой экологической обстановке.

Все перечисленные выше преимущества в итоге позволяют интегрировать систему на базе PoF в технологию передачи данных стандарта 5G, тем самым увеличивая ее конкурентоспособность.

Стоит отметить, что в статьях, посвященных проблемам внедрения технологии PoF в телекоммуникациях, авторы зачастую используют упрощенные инфраструктурные модели. Это не позволяет провести полноценный анализ преимуществ и недостатков таких разработок. Например, в статье [3] рассматривается лишь один объект для внедрения технологии PoF – стадион. Следовательно, нельзя определить точно, как данная система будет работать в менее благоприятных условиях и покажет себя в критических ситуациях при использовании в гражданской, промышленной или военной инфраструктуре. К вышеизложенному следует добавить, что результаты исследований, приводимых в статьях по данной тематике, зачастую представлены только с использованием одних лишь методов моделирования. Так, в статье [19] рассматриваются два способа передачи данных и энергоснабжения по оптическому волокну: с одной общей сердцевиной, используемой одновременно для передачи данных и энергоснабжения по оптическому волокну, и с несколькими сердцевинами многосердцевинных оптических волокон, выделенными для передачи данных, а также несколькими выделенными сердцевинами для энергоснабжения. При этом все результаты получены с помощью программного обеспечения, а опытные данные авторами публикации не приведены. Для объективной оценки требуется больше результатов натурных испытаний.

Еще одним минусом при внедрении решений на базе PoF следует указать сложность реализации на практике данной технологии. При этом, рассматривая сложность реализации технологии PoF для 5G, нужно отметить, что при одновременной передаче и данных, и энергии по одному оптическому каналу возникает дополнительная хроматическая дисперсия, особенно на высоких (десятки ГГц) несущих частотах, что значительно ограничивает доступную дальность передачи энергии [2].

Если рассматривать вопрос интеграции PoF в существующую телекоммуникационную инфраструктуру, можно предположить, что она теоретически возможна, но потребует мощных источников лазерного излучения [21], фотоэлектрических преобразователей и пассивных устройств. Также для ее реализации целесообразно предо-

ставить доступ к централизованной конфигурации большому числу пользователей, тем самым разделив накладные расходы на содержание инфраструктуры между всеми абонентами.

Отдельно стоит отметить, что компоненты, необходимые для реализации гибридной системы 5G с оптическим питанием, такие как лазерные диоды большой мощности, весьма дорогостоящи, что в целом негативно отражается на конкурентоспособности систем, разработанных на базе технологии PoF. Данная проблема может быть решена, если рассматривать использование альтернативных, более дешевых источников оптического излучения большой мощности, например, мощных светоизлучающих диодов видимого или ИК оптического диапазона.

До конца непроработанным является и вопрос надежности систем, реализованных с применением технологии PoF. Учитывая, что в данном случае используются сложные оптоэлектронные компоненты: лазерные диоды высокой мощности и фотоэлектрический преобразователь, то в конечном итоге это отразится на времени бесперебойной работы всей системы, а также на том, как часто будут проводиться регламентное техническое обслуживание и ремонтные работы.

В целом технология PoF обеспечивает простой, менее энергозатратный, экономичный, а главное, быстровнедряемый способ одновременной передачи данных и оптической энергии большой мощности по уже проложенным телекоммуникационным оптоволоконным каналам связи.

Заключение

Возможность внедрения PoF-технологии в настоящее время изучается во многих научно-исследовательских и коммерческих организациях. Соответственно, можно предположить, что работы по развитию данного направления будут востребованы в ближайшем будущем. Технология PoF может успешно применяться в сфере энергоснабжения систем на пожаро- и взрывоопасном производстве, для энергоспитания прецизионных датчиков и систем на их основе, а также для энергоснабжения телекоммуникационных и IT-систем. Данная технология обладает рядом плюсов: взрыво- и пожаробезопасность, экологичность, доступность, эффективность, возможность быстрого внедрения, экономичность и надёжность. Однако

существуют и нерешенные проблемы. Они связаны с дефицитом надежных и энергоэффективных излучателей, фотоэлектрических преобразователей и с отсутствием оптимальных алгоритмов управления такими системами. Решение указанных проблем является необходимым условием для внедрения PoF-технологии не только в исследовательских лабораториях, но и на предприятиях реального сектора промышленности.

Список литературы

1. Передача энергии лазерным излучением в свободном пространстве Бойчук Е.С., Киреева Н.М., Гаркушин А.А., Струк В.К., Криштоп В.В., Карпец Ю.М., Ливашвили А.И // Бюллетень научный сообщений: сб. науч. тр. Вып. 25. – 2020. – №. 25. – С. 91–102.
2. Charging a smartphone across a room using lasers / V. Iyer [et al.] // Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies. – 2018. – Т. 1. – №. 4. – С. 1–21.
3. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT / Fahad M.A. Al-Zubaidi, Student Member, IEEE, J.D. López Cardona, D.S. Montero, C. Vázquez, Senior Member // IEEE Journal of lightwave technology. – 2021. – Vol. 39. – №13.
4. Системы передачи энергии по оптическому волокну / А.А. Гаркушин, В.К. Струк, В.В. Криштоп, Е.С. Бойчук, Ю.М. Карпец // Бюллетень научный сообщений: сб. науч. тр. Вып. 25. – 2020. – №. 25. – С. 48–53.
5. Carmen Vázquez, Multicore fiber scenarios supporting power over fiber in radio over fiber systems / Juan Dayron López-cardona, Pedro Contreras Iallana, David Sánchez Montero, Fahad Mohammed Abdulhussein Al-Zubaidi, Sandra Pérez-Prieto, Isabel Pérez Garcilópez // IEEE journal of lightwave technology. – 2019.
6. Крюков Ю.А., Антонов А.Н. Интегрированная система передачи электрической энергии и данных на основе волоконно-оптического кабеля связи. – № RU114236U1 – 2011.
7. Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments / J.D. Lopez-Cardona, Carmen Vazquez, Senior Member, IEEE, David Sanchez Montero, Pedro Contreras Lallana // IEEE journal of lightwave technology. – 2018. – Vol. 36, № 3. – February 1.

8. Smart Remote Nodes Fed by Power Over Fiber in Internet of Things Applications / Juan D. López-Cardona, David Sánchez Montero, Carmen Vázquez, Senior Member // IEEE sensors journal. – 2019. – Vol. 19, № 17.

9. Progress towards vertically stacked InAlGaAs photovoltaic power converters for fiber power transmission at 1310 nm. / Wilkins M.M., Beattie M.N., Xia, D. Tam, M.C. Zamiri, M. Valdivia, C.E. Fafard, S., Masson D.P., Krich, J.J. Wasilewski, Z.R. // Yokohama. – Japan, 23–25 April 2019.

10. Klamouris. C. Condition monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors / Worms K., Wegh F., Leuthold J., Stork W // Yokohama, Japan. – 23–25 April 2019. – P. OWPT-7-02.

11. Задворнов С.А., Соколовский А.А. О пажаро- и взрыво-безопасности волоконно-оптических гибридных измерительных систем // Бюллетень научных сообщений: сб. науч. тр. Вып. 3. – 2007. – №. 3. – С. 11–14.

12. Зависимость характеристик системы PoF от расстояния передачи энергии / А.А. Гаркушин, Е.С. Бойчук, И.Р. Дроздов, В.К. Струк, Ю.А. Конин, В.А. Щербаков, В.А. Максименко, В.В. Криштоп // Бюллетень научных сообщений: сб. науч. тр. Вып. 6. – 2021. – №. 6. – С. 42–43.

13. Fiber-Optic Pyrometr with Optically Powered Switch for Temperature Measurements / C. Vazques, S. Perez-Prieto, J. Lopez-Cardona // Scopus. – 2018. – С. 1–10.

14. Temperature fiber optic pyrometer for fast time resolved temperature measurements / M. Willsch, T. Bosselmann, D. Gaenshirt, J. Kaiser, M. Villnow, M. Banda // Low Proceedings of Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors. – Limerick, Ireland, 31 May–3 June 2016. – Paper 99160R.

15. Esenowo K, Etu I., Ukanide V.N. The design of a signal conditioning & acquisition elements of a chopped broadband radiation pyrometer // Int. J. Res. Eng. Technol. – 2015. – Vol. 4. – P. 461–470.

16. Burgess G.K., Foote P.D. Characteristics of Radiation Pyrometers; Bulletin of Bureau of Standards / University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1915. – Vol. 12.

17. Российский опыт и перспективы создания систем сейсмического 4D мониторинга / С.В. Головин, Ю.А. Разин,

С.В. Курков, Е.Р. Надеждин // Геофизические исследования. – 2019. – Т. 20, № 4. – С. 52–64.

18. Разин А.Ю., Головин С.В. 4D сейсмический мониторинг нефтегазовых шельфовых месторождений акваторий северных морей с помощью донных регистрирующих систем // Научный аспект. – 2018. – № 4. – С. 779–798.

19. Modes J.D. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep / J.D. Modes, López Cardona, P.C. Lallana, R. Altuna, A. Fresno-Hernández, X. Barreiro, C. Vázquez Senior Member // Journal of lightwave technology. – 2021. – Vol. 39, № 24. – December 15.

20. Vázquez C., MulticoreFiber Scenarios Supporting Power Over Fiber in Radio Over Fiber Systems / J.D. López-Cardona, P.C. Lallana, D.S. Montero, F.M.A. Al-Zubaidi, S. Pérez-Prieto, I.P. Garcilópez // IEEE Access 2019.

21. Kuboki H., Matsuura M. Optically powered radio-over-fiber system based on center- and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber // Opt. Lett. – 2018. – Vol. 43, no. 5. – P. 1067–1070.

References

1. Boichuk E.S., Kireeva N.M., Garkushin A.A., Struk V.K., Krishtop V.V., Karpets Iu.M., Livashvili A.I. Peredacha energii lazernym izlucheniem v svobodnom prostranstve [Energy transfer by laser radiation in free space]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2020, iss. 25, no. 25, pp. 91-102.

2. Iyer V. et al. Charging a smartphone across a room using lasers. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, 2018, vol. 1, no. 4, pp. 1-21.

3. Fahad M.A. Al-Zubaidi, Student Member, IEEE, López Cardona J.D., Montero D.S., Vázquez C., Senior Member. Optically Powered Radio-Over-Fiber Systems in Support of 5G Cellular Networks and IoT. *IEEE Journal of lightwave technology*, 2021, vol. 39, no. 13.

4. Garkushin A.A., Struk V.K., Krishtop V.V., Boichuk E.S., Karpets Iu.M. Sistemy peredachi energii po opticheskomu voloknu [Optical fiber power transmission systems]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2020, iss. 25, no. 25, pp. 48-53.

5. Juan Dayron López-cardona, Pedro Contreras Iallana, David Sánchez Montero, Fahad Mohammed Abdulhussein Al-Zubaidi, Sandra Pérez-Prieto, Isabel Pérez Garcilópez. Carmen Vázquez, Multicore fiber scenarios supporting power over fiber in radio over fiber systems. *IEEE journal of lightwave technology*, 2019.

6. Kriukov Iu.A., Antonov A.N. Integriruvannaia sistema peredachi elektricheskoi energii i dannykh na osnove volokonno-opticheskogo kabelia sviazi [Integrated system for the transmission of electrical energy and data based on a fiber-optic communication cable]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. RU114236U1 (2011).

7. Lopez-Cardona J.D., Vazquez Carmen, Senior Member, IEEE, Sanchez Montero David, Contreras Lallana Pedro. Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments. *IEEE journal of light-wave technology*, 2018, vol. 36, no. 3, february 1.

8. Juan D. López-Cardona, Sánchez Montero David, Vázquez Carmen, Senior Member. Smart Remote Nodes Fed by Power over Fiber in Internet of Things Applications. *IEEE sensors journal*, 2019, vol. 19, no. 17.

9. Wilkins M.M., Beattie M.N., Xia, D. Tam, M.C. Zamiri, M. Valdivia, C.E. Fafard, S., Masson D.P., Krich, J.J. Wasilewski, Z.R. Progress towards vertically stacked InAlGaAs photovoltaic power converters for fiber power transmission at 1310 nm. Yokohama. Japan, 23-25 April 2019.

10. Worms K., Klamouris C., Wegh F., Leuthold J., Stork W. Condition monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors. Yokohama, Japan. 23-25 April 2019, OWPT-7-02 p.

11. Zadvornov S.A., Sokolovskii A.A. O pazharo- i vzryvobezopasnosti volokonno-opticheskikh gibridnykh izmeritel'nykh sistem [About fire and explosion safety of fiber-optic hybrid measuring systems]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2007, iss. 3, no. 3, pp. 11-14.

12. Garkushin A.A., Boichuk E.S., Drozdov I.R., Struk V.K., Konin Iu.A., Shcherbakov V.A., Maksimenko V.A., Krishtop V.V. Zavisimost' kharakteristik sistemy PoF ot rasstoianiia peredachi energii [Dependence of PoF system characteristics on power transmission distance]. *Biulleten' nauchnyi soobshchenii. Sbornik nauchnyi trudov*, 2021, iss. 6, no.6, pp. 42-43.

13. Vazques C., Perez-Prieto S., Lopez-Cardona J. Fiber-Optic Pyrometr with Optically Powered Switch for Temperature Measurements. *Scopus*, 2018, pp. 1-10.

14. Willsch M., Bosselmann T., Gaenshirt D., Kaiser J., Villnow M., Banda M. Temperature Fiber Optic Pyrometer for Fast Time Resolved Temperature Measurements. *Low Proceedings of Sixth European Workshop on Optical Fibre Sensors*. Limerick, Ireland, 31 May-3 June 2016, Paper 99160R.
15. Esenowo K., Etu I., Ukanide V.N. The design of a signal conditioning & acquisition elements of a chopped broadband radiation pyrometer. *Int. J. Res. Eng. Technol.*, 2015, vol. 4, pp. 461-470.
16. Burgess G.K., Foote P.D. Characteristics of Radiation Pyrometers; Bulletin of Bureau of Standards. University of Michigan: Ann Arbor, MI, USA, 1915, vol. 12.
17. Golovin S.V., Razin Iu.A., Kurkov S.V., Nadezhdin E.R. Rossiiskii opyt i perspektivy sozdaniia sistem seismicheskogo 4D monitoringa [Russian experience and prospects for creating 4D seismic monitoring systems]. *Geofizicheskie issledovaniia*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 52-64.
18. Razin A.Iu., Golovin S.V. 4D seismicheskii monitoring neftegazovykh shel'fovykh mestorozhdenii akvatorii severnykh morei s pomoshch'iu donnykh registriruiushchikh sistem [4D seismic monitoring of offshore oil and gas fields in the waters of the northern seas using bottom recording systems]. *Nauchnyi aspekt*, 2018, no. 4, pp. 779-798.
19. Modes J.D., López Cardona, Lallana P.C., Altuna R., Fresno-Hernández A., Barreiro X., Vázquez C. Senior Member. Modes J.D. Optically feeding 1.75 W with 100 m MMF in efficient C-RAN front-hauls with Sleep. *Journal of lightwave technology*, 2021, vol. 39, no. 24, December 15.
20. Vázquez C., López-Cardona J.D., Lallana P.C., Montero D.S., Al-Zubaidi F.M.A., Pérez-Prieto S., Garcilópez I.P. MulticoreFiber Scenarios Supporting Power Over Fiber in Radio Over Fiber Systems. *IEEE Access*, 2019.
21. Kuboki H., Matsuura M. Optically powered radio-over-fiber system based on center- and offset-launching techniques using a conventional multimode fiber. *Opt. Lett.*, 2018, vol. 43, no. 5, pp. 1067-1070.

Сведения об авторах

ГАРКУШИН Алексей Алексеевич

e-mail: garkushin@pnppk.ru

Заместитель директора научно-образовательного центра по проектам, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

КРИШТОП Виктор Владимирович

e-mail: Krishtop@pnppk.ru

Главный научный сотрудник НИИ радиофотоники и оптоэлектроники, заместитель директора научно-образовательного центра по проектам, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

МАКСИМЕНКО Виталий Александрович

e-mail: mva30@mail.ru

Доцент, кандидат физико-математических наук, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

ГАРИПОВА Мария Альфритовна

e-mail: GaripovaMA@pnppk.ru

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

ТРАПЕЗНИКОВ Кирилл Дмитриевич

e-mail: tkd@pnppk.ru

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

About the authors

GARKUSHIN Alexey Alekseevich

e-mail: garkushin@pnppk.ru

Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Projects Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

KRISHTOP Viktor Vladimirovich

e-mail: Krishtop@pnppk.ru

Chief Researcher of the Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics, Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Projects Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

MAKSIMENKO Vitaly Aleksandrovich

e-mail: mva30@mail.ru

Associate Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

GARIPOVA Maria Alfritovna

e-mail: GaripovaMA@pnppk.ru

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

TRAPEZNIKOV Kirill Dmitrievich

e-mail: tkd@pnppk.ru

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

НИФОНТОВА Елизавета Васильевна
e-mail: *NifontovaEV@pnppk.ru*

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

NIFONTOVA Elizaveta Vasilievna
e-mail: *NifontovaEV@pnppk.ru*

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

ЗУЕВА Полина Владимировна
e-mail: *ZuevaPV@pnppk.ru*

Техник, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, Россия)

ZUEVA Polina Vladimirovna
e-mail: *ZuevaPV@pnppk.ru*

Technician, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm National Research Polytechnic University (Perm, Russia)

Финансирование: исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2023-0005)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 09.01.2023

Одобрена: 15.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Financing: the research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSNM-2023-0005).

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 09/01/2022

Approved: 15/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Перспективы применения технологии POWER-OVER-FIBER / Гаркушин А.А., Криштоп В.В., Максименко В.А., Гарипова М.А., Милуков Н.С., Трапезников К.Д., Нифонтова Е.В., Зуева П.В. // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 46–67.

Please cite this article in English as: Garkushin A.A., Krishtop V.V., Maksimenko V.A., Garipova M.A., Milyukov N.S., Trapeznikov K.D., Nifontova E.V., Zueva P.V. Prospects for application of POWER-OVER-FIBER technology // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 46-67.

УДК 681.7.068, 535.37, 548.4

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.04

М.В. Смирнов¹, Н.В. Сидоров¹, М.Н. Палатников¹, В.Б. Пикулев²¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ Российской академии наук, Апатиты, Россия²Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДЕФЕКТНЫЕ ЦЕНТРЫ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ МАГНИЕМ

Исследована фотолюминесценция в ближней ИК-области серии кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19\text{--}5,29 \text{ мол.}\% \text{ MgO})$, полученных по разным технологиям. Показано, что вклад в фотолюминесценцию исследованных кристаллов вносят две основные полосы при 1,53 и 1,35 эВ, природа которых связана с собственными дефектными центрами. Интенсивность данных полос, особенно полосы при 1,53 эВ, в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(1,16\text{--}5,29 \text{ мол.}\% \text{ MgO})$ хорошо коррелирует с концентрацией гидроксильных групп в зависимости от концентрации легирующей примеси, что обуславливает наличие комплексного центра свечения с участием OH^- -групп.

Ключевые слова: ниобат лития, легирование, фотолюминесценция, центры свечения, дефекты, гидроксильные группы.

M.V. Smirnov¹, N.V. Sidorov¹, M.N. Palatnikov¹, V.B. Pikulev²¹Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia²Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

LUMINESCENT DEFECT CENTERS IN MAGNESIUM-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

The photoluminescence of $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0.19\text{--}5.29 \text{ mol.}\% \text{ MgO})$ crystals obtained by various technologies has been studied in the near IR region. It showed that a contribution to the photoluminescence of the crystals was made by two main bands at 1.53 and 1.35 eV being associated with intrinsic defect centers in the crystals. The intensity of these bands, especially the band at 1.53 eV, in $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0.19\text{--}5.29 \text{ mol.}\% \text{ MgO})$ crystals correlated well with the concentration of hydroxyl groups in ones. Therefore, there was a complex luminescence center including OH^- groups in the crystals.

Keywords: lithium niobate, doping, photoluminescence, luminescence centers, defects, hydroxyl groups.

Введение

Создание на основе монокристалла ниобата лития (LiNbO_3) новых (обладающих низкими эффектом фоторефракции, коэрцитивным полем и фотолюминесценцией) и модифицирование уже имеющих функцио-

нальных нелинейно-оптических монокристаллических материалов для телекоммуникационного оборудования, для электрооптических элементов интегральной оптики (модуляторов, переключателей, оптических затворов), для преобразования лазерного и широкополосного излучения является актуальной задачей современного оптического материаловедения [1, 2]. Дефекты (собственные и лазерно индуцированные) кристаллической структуры ниобата лития как сегнетоэлектрической фазы переменного состава играют ключевую роль в формировании наиболее важных физических свойств материалов. Эффективным способом регулирования ансамбля точечных дефектов является легирование кристаллов ниобата лития металлическими элементами. Для использования кристаллов LiNbO_3 в оптических устройствах в качестве легирующих элементов преимущественно используют цинк и магний [3–5]. Легирование магнием или цинком позволяет значительно снизить коэрцитивное поле ($\sim 1,4\text{--}4,6$ кВ/мм) относительно конгруэнтного кристалла (~ 21 кВ/мм), что позволяет использовать кристаллы для создания функциональных элементов для преобразования и модуляции лазерного излучения на периодически поляризованных доменных структурах субмикронных размеров с плоскими границами [6–9]. При этом монокристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (5,0 мол. % MgO) уже используются в промышленности в качестве таких преобразователей излучения [10].

Вхождение катионов металла (Mg , Zn) в конгруэнтный кристалл LiNbO_3 с изменением его концентрации носит скачкообразный (пороговый) характер. Так, концентрационные пороги в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ и $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ наблюдаются при 3,0 и 5,5 мол. % для Mg и при 4,0 и 7,5 мол. % для Zn . Переход через пороги сопровождается резким снижением фоторефракции за счёт изменения механизма вхождения, легирующей примеси, в структуру кристалла и резкого снижения вследствие этого концентрации точечных дефектов Nb_{Li} , являющихся глубокими электронным ловушками [4, 11, 12]. Такая зависимость распределения структурных дефектов от концентрации легирующей примеси должна отражаться на фотolumинесцентных свойствах кристалла ниобата лития, так как последние сильно зависят от дефектного состояния кристалла. В данной работе представлены исследования фотolumинесцентных свойств серии кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (0,19–5,29 мол. % MgO), полученных по разным технологиям. В качестве кристалла сравнения использован кристалл конгруэнтного состава ($\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$).

Экспериментальная часть

Все кристаллы ниобата лития были выращены из платиновых тиглей методом Чохральского в воздушной атмосфере на установке «Кристалл 2» с индукционным нагревом, оснащенной системой автоматического контроля диаметра [13]. Кристалл LiNbO_3 конг был получен из гранулированной шихты ниобата лития с концентрацией $[\text{Li}_2\text{O}] = 48,6$ мол.%. Методом прямого легирования расплава были получены монокристаллы $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19, 1,53, 1,66, 2,14 \text{ и } 3,03 \text{ мол.}\% \text{ MgO в кристалле})$. Методом легирования с использованием твердофазной лигатуры был получен кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(5,23 \text{ мол.}\% \text{ MgO в кристалле})$. Методом гомогенного легирования был получен монокристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(5,29 \text{ мол.}\% \text{ MgO в кристалле})$. Описание методов легирования и особенности выращивания монокристаллов представлены в работах [13, 14].

Монодоменизация кристаллов проводилась посредством послеростового термического и электротермического отжига выращенных кристаллов [13].

Образцы для исследования имели форму прямоугольного параллелепипеда (размеры $\sim 4 \cdot 5 \cdot 6 \text{ мм}^3$), ребра которых совпадали по направлению с кристаллографическими осями X, Y, Z (Z – полярная ось кристалла). Грани параллелепипедов тщательно полировались.

Измерение спектров фотолюминесценции проводилось в 90-градусной геометрии исследуемых образцов с помощью спектрографа SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu) в диапазоне длин волн 800–1050 нм с разрешением 0,2 нм в нормальных условиях. В качестве источника возбуждения люминесценции использовался непрерывный He–Cd лазер ($\lambda_{\text{возб}} = 325 \text{ нм}$, 15 мВт). Из каждого фотолюминесцентного спектра вычитался фоновый сигнал.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции в ближней ИК-области серии кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19 \div 5,29 \text{ мол.}\% \text{ MgO})$ относительно кристалла LiNbO_3 конг. Видно, что все спектры состоят из широкой полосы люминесценции с главным максимумом при 1,5 эВ для кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19\text{--}3,03 \text{ мол.}\% \text{ MgO})$ и подобны спектру

кристалла LiNbO_3 конг, (см. рис. 1, *a*). При этом в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(5,29 \text{ мол.\% MgO})$ и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(5,23 \text{ мол.\% MgO})$ люминесцентное гало наблюдается при 1,45 и 1,4 эВ соответственно. Зависимость интегральной интенсивности фотolumинесценции от концентрации магния можно разбить на два участка: плавное и слабое уменьшение в области концентраций 0–1,53 мол.% MgO, резкие скачкообразные изменения с монотонным уменьшением в области концентраций 1,66–5,29 мол.% MgO (рис. 2, *a*).

Согласно работам [15, 16], вклад в спектр фотolumинесценции в ближней ИК-области вносят несколько перекрывающихся центров свечения. Разложение спектров исследуемых кристаллов на составляющие проводилось на основании литературных данных [15, 16] и данных для номинально чистого кристалла LiNbO_3 конг [17]. Разложение спектра даёт две полосы излучения при 1,35 и 1,53 эВ, которые вносят наибольший вклад в фотolumинесценцию. Малоинтенсивные максимумы при 1,24, 1,34, 1,45 и 1,64 эВ практически не влияют на общий люминесцентный сигнал: их общая доля в среднем составляет $\approx 2\%$. Малоинтенсивные линии связаны со следовыми количествами неконтролируемых примесей Cr^{3+} , V^{2+} и др. Люминесценция от таких примесных центров наблюдается во всех исследуемых нами кристаллах вне зависимости от состава, метода легирования, типа легирующего элемента и её концентрации в кристалле. В таблице приведены параметры главных полос люминесценции при 1,35 и 1,53 эВ для кристаллов LiNbO_3 конг и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19\text{--}5,29 \text{ мол.\% MgO})$.

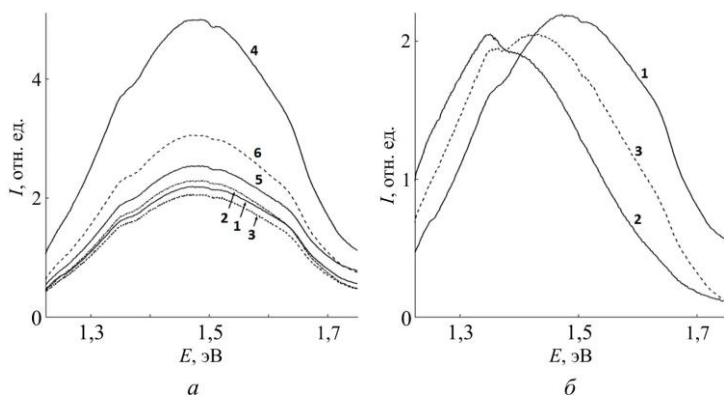


Рис. 1. Спектры фотolumинесценции кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$:
a – LiNbO_3 конг (1), 0,19 (2), 1,53 (3), 1,66 (4), 2,14 (5) и 3,03 (6) мол.% MgO;
б – LiNbO_3 конг (1), 5,23 (2), 5,29 (3) мол.% MgO

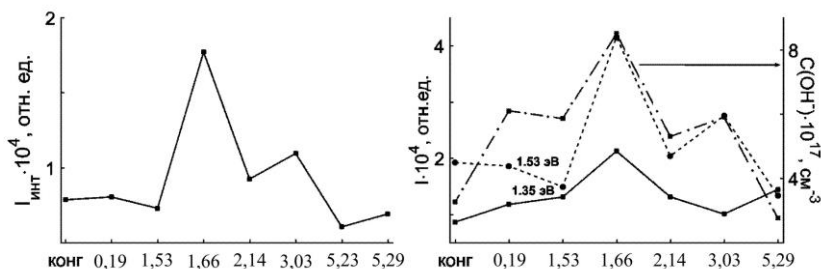


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности спектра фотолюминесценции (а) и интенсивности максимумов при 1,35 и 1,53 эВ в сравнении с концентрацией ОН^- групп (б) от концентрации магния в кристалле

Рассмотрим более детально изменение интенсивности максимумов 1,35 и 1,53 эВ в зависимости от концентрации магния в кристалле и метода легирования. На рис. 2, б представлены изменения интенсивности максимумов при 1,35 и 1,53 эВ в зависимости от концентрации магния в кристалле. Данные максимумы относятся к поляронным дефектам, интенсивность которых сильно зависит от многих факторов: состава, типа и концентрации легирующей примеси, технологии выращивания [18, 19]. По мере увеличения концентрации в диапазоне 0–1,53 мол.% MgO в кристалле происходит уменьшение интенсивности люминесценции максимума при 1,53 эВ с одновременным увеличением интенсивности максимума при 1,35 эВ (см. рис. 2, б). При дальнейшем увеличении концентрации магния (в диапазоне концентраций 1,53–1,66 мол.% MgO) наблюдается рост интенсивности обоих максимумов. При этом в спектре кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(1,66 \text{ мол.\% MgO})$ наблюдается максимальная интенсивность свечения обоих максимумов. Дальнейшее повышение концентрации магния в кристалле приводит к падению интенсивности данных максимумов. При концентрации легирующей примеси $\text{MgO} = 5,23 \dots 5,29 \text{ мол.\%}$ доминирует уже максимум при 1,35 эВ над максимумом при 1,53 эВ (см. рис. 2, б). Стоит отметить, что основное влияние на спектр фотолюминесценции в ближней ИК-области при концентрации примеси $\text{MgO} = 5,23 \text{--} 5,29 \text{ мол.\%}$ может вносить метод легирования кристалла. Кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(5,23 \text{ мол.\% MgO})$, полученный методом с использованием твердофазной лигатуры, показывает лучшее перераспределение энергии в полосу излучения при 1,35 эВ, чем кристалл $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(5,29 \text{ мол.\% MgO})$, полученный методом гомогенного легирования.

**Спектральные характеристики главных полос люминесценции
при 1,35 и 1,53 эВ для исследуемых кристаллов**

№ п/п	Параметры пиков	Концентрация магния в кристалле, мол. %							
		0	0,19	1,53	1,66	2,14	3,03	5,23	5,29
1	I, отн. ед.	8632	11782	13090	21254	13126	10069	15837	14433
	ΔE , эВ	0,228	0,242	0,251	0,254	0,247	0,231	0,243	0,239
	E, эВ	1,354	1,370	1,385	1,361	1,370	1,345	1,328	1,349
2	I, отн. ед.	19215	18599	14923	41554	20376	27538	8788	13335
	ΔE , эВ	0,296	0,268	0,250	0,290	0,281	0,305	0,267	0,247
	E, эВ	1,534	1,544	1,563	1,534	1,555	1,523	1,493	1,517

На основании расчётных данных [20] по ИК-спектрам поглощения в области валентных колебаний гидроксильных групп кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ нами построена зависимость концентрации OH^- групп (см. рис. 2, б). Видно, что наблюдается достаточно сильная корреляция между концентрацией OH -групп и центрами свечения при 1,35 и 1,53 эВ. В частности, при концентрациях $\text{MgO} > 1,53$ мол. % в кристалле происходит увеличение концентрации OH -групп с одновременным увеличением интенсивности центров свечения при 1,53 и 1,35 эВ. Последующая концентрационная зависимость OH -групп в диапазоне концентраций $\text{MgO} = 1,66\text{--}5,29$ мол. % приводит к взаимному изменению интенсивности полос излучения при 1,35 и 1,53 эВ. В то же время для кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19 \text{ мол. \% MgO})$ и $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(1,53 \text{ мол. \% MgO})$ корреляция данных центров свечения с концентрацией OH -групп достаточно слабая. Это обусловлено тем, что в данной концентрационной области процесс излучательной рекомбинации связан с доминирующим вкладом центров свечения с участием поляронов малого радиуса Nb_{Li} и Nb_{Nb} [16].

Полученные нами данные позволяют расширить объяснение природы центров свечения, эмиссия которых наблюдается в ближней ИК-области, и зонного характера релаксации электронных возбуждений в кристаллах $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}(0,19\text{--}5,29 \text{ мол. \% MgO})$, а именно особенности локализации в структуре кристалла ниобата лития атомов водорода и водородная связь с атомами кислорода кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 оказывают заметное влияние на геометрию кластеров MeO_6 и на центры свечения. Известно, что атом водорода локализуется в трёх позициях в структуре кристалла конгруэнтного состава [20], и в ИК-спектре поглощения кристалла $\text{LiNbO}_3\text{конг}$ в области валентных колебаний OH -групп наблюдаются три явных

максимума при 3470, 3483 и 3486 см^{-1} . В стехиометрическом кристалле, выращенном методом НТТSSG из конгруэнтного расплава с присутствием щелочного растворителя $\text{K}_2\text{O} = 12,1$ мол.%, присутствует только одна линия с частотой 3466 см^{-1} , т.е. атомы водорода в таком кристалле расположены на полярной оси и локализуются только в литиевом октаэдре с образованием дефекта OH-Li . В нестехиометрических кристаллах концентрация OH -групп выше, чем в нестехиометрических, и атомы водорода, помимо позиции на полярной оси в литиевом октаэдре, имеют другие структурные позиции, и их концентрация в этих дополнительных позициях меняется в зависимости от состава кристалла и технологий [20]. Из полученных нами экспериментальных данных видно, что этот факт существенно влияет на центры свечения, люминесценция которых наблюдается при 1,35 и 1,53 эВ. Концентрация OH -групп в кристалле в основном влияет на интенсивность полосы люминесценции при 1,53 эВ в ближней ИК-области.

Заключение

В диапазоне концентраций 0–1,53 мол.% MgO в кристалле $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ с увеличением концентрации магния наблюдается сначала уменьшение полярной люминесценции, а затем её резкий рост до значения, превышающего эмиссию в кристалле $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ приблизительно в три раза. В диапазоне концентраций 1,66–5,29 мол.% MgO происходит падение интенсивности фотолюминесценции. При концентрации 5,23–5,29 мол.% MgO вклад полосы излучения при 1,35 эВ в общий люминесцентный сигнал преобладает над вкладом полосы при 1,54 эВ, что не наблюдается для легированных кристаллов с концентрацией MgO менее 5,23 мол.%. Для кристаллов $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ (1,66–5,29 мол.% MgO) наблюдается сильная корреляция между интенсивностью полосы 1,53 эВ и концентрацией OH -групп в кристалле, что подтверждает аддитивный характер вклада в полярную люминесценцию и образование комплексных центров свечения с участием OH -групп при концентрации $\text{MgO} \geq 1,66$ мол.%.

Список литературы

1. Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals // *Physica Status Solidi* (a). – 2004. – Vol. 201, № 2. – P. 253–283.

2. Wong K.K. Properties of lithium niobate. – London: The Institution of Engineering and Technology, 2002. – 432 p.
3. Influence of the damage resistant impurities Zn and Mg on the UV-excited luminescence in LiNbO_3 / C. Fischer, M. Wöhlecke, T. Volk, N. Rubinina // *Physica Status Solidi (a)*. – 1993. – Vol. 137. – P. 247–255.
4. Concentration threshold effect on properties of zinc-doped lithium niobate crystals / M.N. Palatnikov, N.V. Sidorov, O.V. Makarova, D.V. Manukovskaya, L.A. Aleshina, A.V. Kadetova // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2017. – Vol. 100. – P. 3703–3711.
5. Defect structure of near-stoichiometric Mg-doped LiNbO_3 crystals prepared by different method / J. Yang, M. Lai, J. Shang, Q. Li, L. Zhang, J. Sun // *Journal of Crystal Growth*. – 2022. – Vol. 580. – P. 126478.
6. Effect of Mg concentration on the domain reversal of Mg-doped LiNbO_3 / Y. Chen, W. Yan, J. Guo, S. Chen, G. Zhang, Z. Xia // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87. – P. 212904(1-3).
7. Domain inversion and optical damage in Zn doped near-stoichiometric lithium niobate crystal / S. Kumaragurubaran, S. Takekawa, M. Nakamura, S. Ganesamoorthy, K. Terabe, K. Kitamura // *Conference on Lasers & Electro-Optics*. – 2005. – Vol. 1. – P. 393-395.
8. The role of nonstoichiometry in 180° domain switching of LiNbO_3 crystals / V. Gopalana, T.E. Mitchell, Y. Furukawa, K. Kitamura // *Applied Physics Letters*. – 1998. – Vol. 72. – P. 1981–1983.
9. Decay of domains created by local switching on non-polar cut of MgO doped LiNbO_3 single crystals / Yu.M. Alikin, A.P. Turygin, M.S. Kosobokov, D.O. Alikin, V.Ya. Shur // *Ferroelectrics*. – 2022. – Vol. 592, № 1. – P. 12–18.
10. Dualwavelength source from 5% MgO:PPLN cylinders for the characterization of nonlinear infrared crystals / V. Kemlin, D. Jegouso, J. Debray, E. Boursier, P. Segonds, B. Boulanger, H. Ishizuki, T. Taira, G. Mennerat, J. Melkonian, A. Godard // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, № 23. – P. 28886–28891.
11. Ниобат лития, дефекты, фоторефракция, колебательный спектр, поляритоны / Н.В. Сидоров, Т.Р. Волк, Б.Н. Маврин, В.Т. Калинников. – М.: Наука, 2003. – 256 с.
12. Schlarb U., Betzler K. Influence of the defect structure on the refractive indices of undoped and Mg-doped lithium niobate // *Physical Review B*. – Vol. 50, № 2. – P. 751–757.
13. Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития: монография / М.Н. Палатников, Н.В. Си-

доров, О.В. Макарова, И.В. Бирюкова. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2017. – 241 с.

14. The search of homogeneity of LiNbO_3 crystals grown of charge with different genesis / M.N. Palatnikov, I.V. Birukova, S.M. Masloboeva, O.V. Makarova, D.V. Manukovskaya, N.V. Sidorov // *Journal of Crystal Growth*. – 2014. – Vol. 386. – P. 113–118.

15. Decay time of polaron photoluminescence in congruent lithium niobate / A. Harhira, L. Guilbert, P. Bourson, H. Rinnert // *Physica Status Solidi (c)*. – 2007. – Vol. 4, № 3. – P. 926–929.

16. Gated luminescence in as-grown and reduced undoped LiNbO_3 crystals / S.M. Kostritskii, M. Aillerie, S. Margueron, P. Bourson // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2013. – Vol. 416. – P. 012033(1–6).

17. Features of the defect structure and luminescence of nominally pure lithium niobate crystals produced using different technologies / M. Smirnov, D. Manukovskaya, N. Sidorov, M. Palatnikov // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 1. – P. 255–277.

18. Comparative study of composition dependences of photorefractive and related effects in LiNbO_3 and LiTaO_3 crystals / S.M. Kostritskii, O.G. Sevostyanov, P. Bourson, M. Aillerie, M.D. Fontana, D. Kip // *Ferroelectrics*. – 2007. – Vol. 352, № 1. – P. 61–71.

19. Polaron luminescence in iron-doped lithium niobate / A. Harhira, L. Guilbert, P. Bourson, H. Rinnert // *Applied Physics B*. – 2008. – Vol. 92. – P. 555–561.

20. Бобрева Л.А. Физико-химические основы технологий оптических высокосовершенных номинально чистых и легированных нелинейно-оптических монокристаллов ниобата лития с низким эффектом фото-рефракции: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Апатиты, 2020. – 24 с.

References

1. Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals. *Physica Status Solidi (a)*, 2004, vol. 201, no. 2, pp. 253–283.

2. Wong K.K. Properties of lithium niobate. London: The Institution of Engineering and Technology, 2002, 432 p.

3. Fischer C., Wöhlecke M., Volk T., Rubinina N. Influence of the damage resistant impurities Zn and Mg on the UV-excited luminescence in LiNbO_3 . *Physica Status Solidi (a)*, 1993, vol. 137, pp. 247–255.

4. Palatnikov M.N., Sidorov N.V., Makarova O.V., Manukovskaya D.V., Aleshina L.A., Kadetova A.V. Concentration threshold effect on properties

of zinc-doped lithium niobate crystals. *Journal of the American Ceramic Society*, 2017, vol. 100, pp. 3703-3711.

5. Yang J., Lai M., Shang J., Li Q., Zhang L., Sun J. Defect structure of near-stoichiometric Mg-doped LiNbO₃ crystals prepared by different method. *Journal of Crystal Growth*, 2022, vol. 580, 126478 p.

6. Chen Y., Yan W., Guo J., Chen S., Zhang G., Xia Z. Effect of Mg concentration on the domain reversal of Mg-doped LiNbO₃. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, 212904(1-3) p.

7. Kumaragurubaran S., Takekawa S., Nakamura M., Ganesamoorthy S., Terabe K., Kitamura K. Domain inversion and optical damage in Zn doped near-stoichiometric lithium niobate crystal. *Conference on Lasers & Electro-Optics*, 2005, vol. 1, pp. 393-395.

8. Gopalana V., Mitchell T.E., Furukawa Y., Kitamura K. The role of nonstoichiometry in 180° domain switching of LiNbO₃ crystals. *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 72, pp. 1981-1983.

9. Alikin Yu.M., Turygin A.P., Kosobokov M.S., Alikin D.O., Shur V.Ya. Decay of domains created by local switching on non-polar cut of MgO doped LiNbO₃ single crystals. *Ferroelectrics*, 2022, vol. 592, no. 1, pp. 12-18.

10. Kemlin V., Jegouso D., Debray J., Boursier E., Segonds P., Boulanger B., Ishizuki H., Taira T., Mennerat G., Melkonian J., Godard A. Dualwavelength source from 5 % MgO:PPLN cylinders for the characterization of nonlinear infrared crystals. *Optics Express*, 2013, vol. 21, no. 23, pp. 28886-28891.

11. Sidorov N.V., Volk T.R., Mavrin B.N., Kalinnikov V.T. Niobat litia, defekty, fotorefraktsiia, kolebatel'nyi spektr, poliaritony [Lithium niobate, defects, photorefraction, vibrational spectrum, polaritons]. Moscow: Nauka, 2003, 256 p.

12. Schlarb U., Betzler K. Influence of the defect structure on the refractive indices of undoped and Mg-doped lithium niobate. *Physical Review B*, vol. 50, no. 2, pp. 751-757.

13. Palatnikov M.N., Sidorov N.V., Makarova O.V., Biriukova I.V. Fundamental'nye aspekty tekhnologii sil'no legirovannykh kristallov niobata litia. [Fundamental aspects of the technology of highly doped lithium niobate crystals: monograph]. Apatity: Kol'skii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk, 2017, 241 p.

14. Palatnikov M.N., Biriukova I.V., Masloboeva S.M., Makarova O.V., Manukovskaya D.V., Sidorov N.V. The search of homogeneity of LiNbO₃ crystals grown of charge with different genesis. *Journal of Crystal Growth*, 2014, vol. 386, pp. 113-118.

15. Harhira A., Guilbert L., Bourson P., Rinnert H. Decay time of polaron photoluminescence in congruent lithium niobate. *Physica Status Solidi (c)*, 2007, vol. 4, no. 3, pp. 926-929.

16. Kostritskii S.M., Aillerie M., Margueron S., Bourson P. Gated luminescence in as-grown and reduced undoped LiNbO₃ crystals. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, vol. 416, 012033(1-6) p.

17. Smirnov M., Manukovskaya D., Sidorov N., Palatnikov M. Features of the defect structure and luminescence of nominally pure lithium niobate crystals produced using different technologies. *Materials*, 2023, vol. 16, no. 1, pp. 255-277.

18. Kostritskii S.M., Sevostyanov O.G., Bourson P., Aillerie M., Fontana M.D., Kip D. Comparative study of composition dependences of photo-refractive and related effects in LiNbO₃ and LiTaO₃ crystals. *Ferroelectrics*, 2007, vol. 352, no. 1, pp. 61-71.

19. Harhira A., Guilbert L., Bourson P., Rinnert H. Polaron luminescence in iron-doped lithium niobate. *Applied Physics B*, 2008, vol. 92, pp. 555-561.

20. Bobreva L.A. Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii opticheski vysokosovershennykh nominal'no chistyykh i legirovannykh nelineino-opticheskikh monokristallov niobata litia s nizkim efektom fotorefraktsii [Physico-chemical fundamentals of technologies of optically highly perfected nominally pure and doped nonlinear optical single crystals of lithium niobate with a low photorefractive effect]. Abstract of Ph. D. thesis. Apatity, 2020, 24 p.

Сведения об авторах

СМИРНОВ Максим Владимирович

e-mail: m.smirnov@ksc.ru

Инженер-исследователь, институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН (Апатиты, Россия)

СИДОРОВ Николай Васильевич

e-mail: n.sidorov@ksc.ru

Доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН (Апатиты, Россия)

About the authors

SMIRNOV Maxim Vladimirovich

e-mail: m.smirnov@ksc.ru

Research Engineer, Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials. I.V. Tananaeva KSC RAS (Apatity, Russia)

SIDOROV Nikolay Vasilievich

e-mail: n.sidorov@ksc.ru

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Materials for Electronic Engineering, Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials. I.V. Tananaeva KSC RAS (Apatity, Russia)

ПАЛАТНИКОВ Михаил Николаевич e-mail: *m.palatnikov@ksc.ru*

Доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН (Апатиты, Россия)

ПИКУЛЕВ Виталий Борисович e-mail: *pikulev@petrsu.ru*

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Россия)

PALATNIKOV Mikhail Nikolaevich e-mail: *m.palatnikov@ksc.ru*

Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Electronic Engineering Materials, Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials named after V.I. I.V. Tananaeva KSC RAS (Apatity, Russia)

PIKULEV Vitaly Borisovich e-mail: *pikulev@petrsu.ru*

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Solid State Physics, FTI Petrsu, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russia)

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 12.01.2023

Одобрена: 18.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 12/01/2023

Approved: 18/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Люминесцентные дефектные центры в кристаллах ниобата лития, легированных магнием / М.В. Смирнов, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников, В.Б. ПикULEV // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 68–79.

Please cite this article in English as: Smirnov M.V., Sidorov N.V., Palatnikov M.N., Pikulev V.B. Luminescent defect centers in magnesium-doped lithium niobate crystals // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 68-79.

УДК 681.7.068

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.05

О.Р. Стародуб, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛАСТЕРОВ В ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского КНЦ Российской академии наук,
Апатиты, Россия

С использованием в качестве структурной единицы («элементарной ячейки») кристалла кислородно-октаэдрического кластера MeO_6 (Me: Nb, Li, вакансия, примесный элемент) и полуклассического атомистического подхода выполнено компьютерное моделирование крупных кластеров в структуре кристалла ниобата лития (LiNbO_3), легированного трехвалентным металлом. Такой подход позволяет избежать обязательные при использовании в качестве структурной единицы элементарной ячейки кристалла потери разорванности и электронейтральности кислородных октаэдров O_6 по краям исследуемого кластера, а также позволяет отойти от традиционных вакансионных сплит-моделей. Показано, что наиболее устойчивым является кластер конгруэнтного состава.

Ключевые слова: ниобат лития, моделирование, кластеры, вакансионные модели, дефекты подрешётки, монокристаллы, сегнетоэлектрики.

O.R. Starodub, N.V. Sidorov, M.N. Palatnikov

Tananaev Institute of Chemistry – Subdivision of the Federal Research Centre
“Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

COMPUTER SIMULATION OF CLUSTERS IN DOPED CRYSTALS OF LITHIUM NIOBATE

Using as a structural unit (“unit cell”) a MeO_6 oxygen-octahedral cluster crystal (Me: Nb, Li, vacancy, impurity element) and a semiclassical atomistic approach, computer simulation of large clusters in the structure of a lithium niobate (LiNbO_3) crystal doped with trivalent metal. This approach makes it possible to avoid, unavoidable when using a crystal unit cell as a structural unit, the loss of discontinuity and electroneutrality of oxygen octahedra O_6 at the edges of the cluster under study, and also allows you to move away from traditional vacancy split models.

Keywords: lithium niobate, modeling, clusters, vacancy models, sublattice defects, single crystals, ferroelectrics

Введение

Монокристалл ниобата лития (LiNbO_3) является одним из наиболее важных современных функциональных нелинейно-оптических материалов электронной техники. Особенности его кислородно-октаэдри-

ческой структуры позволяют эффективно регулировать физические характеристики путем изменения отношения $R = [\text{Li}]/[\text{Nb}]$ и легированием [1–4]. Как фаза переменного состава кристалл LiNbO_3 характеризуется глубоко дефектной структурой. Основными дефектами, влияющими на физические характеристики кристалла, являются точечные дефекты катионной подрешетки в виде катионов и вакансий, расположенных не в своих позициях. Катионы ниобия, расположенные в позициях катионов лития (Nb_{Li}), являются наиболее глубокими электронными ловушками [5, 6], влияющими на эффект фоторефракции (optical damage). Легирование катионами с постоянной валентностью, как и увеличение отношения $R = [\text{Li}]/[\text{Nb}]$, уменьшает в кристалле концентрацию точечных дефектов Nb_{Li} [2–4, 6].

Помимо точечных дефектов катионной подрешетки для кристалла LiNbO_3 характерны также комплексные дефекты и микроструктурированность, природа которой в настоящее время не ясна [4]. Легирующие катионы и точечные дефекты катионной подрешетки в виде катионов и вакансий (V), расположенных в структуре кристалла LiNbO_3 вдоль полярной оси не в своих позициях (Nb_{Li} , Nb_V , V_{Li} и др.), не располагаются равномерно вдоль полярной оси, а ассоциируются в достаточно крупные кластеры, размер которых может достигать многие сотни элементарных ячеек. В формировании таких кластеров заметную роль помимо точечных дефектов играют комплексные дефекты в виде поляронов и дефектов, обусловленных существованием водородных связей. Крупные кластеры в структуре ниобата лития, в свою очередь, состоят из микрокластеров – кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 , обладающих дипольным моментом и определяющих особенности сегнетоэлектрических и нелинейно-оптических свойств кристалла LiNbO_3 . Микрокластеры MeO_6 являются по существу «элементарной ячейкой» крупных кластеров. Однако в отличие от классической элементарной ячейки кристалла различные «элементарные ячейки» из микрокластеров MeO_6 не эквивалентны друг другу по форме и размерам. Ввиду наличия большого количества точечных дефектов разного типа в кристалле существует большое разнообразие дипольных кислородно-октаэдрических кластеров [2, 4–6]. При изменении состава кристалла и особенно состава катионной подрешетки наблюдаются деформация кластеров MeO_6 и изменение порядка чередования основных (Li^+ , Nb^{5+}), легирующих катионов и вакантных октаэдров вдоль полярной оси кристалла, а также деформация всего

крупного кластера. В настоящее время прямое экспериментальное исследование структуры как отдельных микрокластеров MeO_6 , так и состоящих из них кластеров большого размера, а также динамики их развития с изменением состава кристалла, ввиду малости размера кластеров, практически невозможно. В связи с этим для понимания влияния микроструктурированности на физические свойства кристалла является важным компьютерное моделирование структуры кластеров различного типа.

Первыми моделями описания особенностей расположения вдоль полярной оси точечных дефектов катионной подрешетки были модель литиевых вакансий и модель ниобиевых вакансий [7, 8]. Доннерберг и Зотов [7, 8], используя компьютерное моделирование, создали более сложные вакансионные сплит-модели для исследования дефектной структуры ниобата лития. Такой подход позволяет теоретически качественно предсказывать некоторые свойства кристаллов LiNbO_3 как номинально чистых с разным отношением R , так легированных металлическими и неметаллическими катионами. С появлением полно-профильного рентгеноструктурного анализа (метод Ритвельда) появилась возможность сравнить данные компьютерного моделирования, используя вакансионные сплит-модели, с данными рентгеноструктурного анализа. Однако при этом микроструктурированность кристалла не учитывается, поскольку используются экспериментальные данные, усредненные по всему объему кристалла. Компьютерное моделирование структуры кислородно-октаэдрических кластеров с использованием в качестве «элементарной ячейки кислородно-октаэдрический кластер MeO_6 » позволяет информативно исследовать структурные искажения в крупных кластерах различного вида и микроструктурированность кристалла в целом, что делает возможным прогнозирование изменения физических характеристик кристалла ниобата лития при изменении его стехиометрии и легировании. Такой подход может быть важным для разработки высокосоввершенных активно-нелинейных лазерных сред и материалов для преобразования и модуляции лазерного и широкополосного излучений. Легирование металлами с постоянной валентностью (Mg , Zn и др.) понижает эффект фоторефракции, легирование редкоземельными металлами (обладающих, как правило, валентностью 3) улучшает эмиссионные свойства кристаллов ниобата лития. При этом снижается концентрация точечных дефектов Nb_{Li} , и в некоторых случаях происходит упорядочение структуры кристалла [9].

Методика работы

Для моделирования были рассмотрены кластеры с разным отношением Li/Nb (от 0,92 до 1,00) и с разным процентным содержанием легирующего трехвалентного металла (5, 7 и 10 мол.%). Полученные гексагональные координаты атомов [9, 11] с помощью разработанного нами программного пакета были переведены в декартовы и оттранслированы на объем моделируемых кластеров (порядка семи тысяч ионов). При этом кластер строился из микрокластеров MeO_6 , а не элементарных ячеек, что даёт определённые преимущества при расчёте, поскольку позволяет предотвратить разорванность кислородных октаэдров по краям модельного кластера, а также сохранять электронейтральность. При построении кластера из элементарных ячеек электронейтральность кристалла не сохраняется. К тому же разработанный нами специальный пакет программ учитывает искажения при легировании кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 и переводит их в состояние с наименьшей энергией методами молекулярной динамики при помощи различных потенциалов, в том числе потенциала Букингема. Заброс ионов в кислородные октаэдры проводится случайным порядком с использованием вихря Мерсена.

На втором этапе работы модельный кластер пропускается через программу KeClast, которая минимизирует энергию кластера, удаляя так называемые критические атомы [10], т.е. атомы с максимальной энергией, удаление которых понижает суммарную энергию кластера. Входными параметрами для программы KeClast являются сорта и заряды ионов и координаты ионов. Расчёт энергии кластера проводился с применением потенциалов кулоновского притяжения и Борна–Майера [10, 12]. При минимизации энергии кластера применялся механизм пошаговой оптимизации критических атомов. Удаление критических атомов продолжается, пока уменьшается энергия исследуемого кластера [10, 12].

Действие программы KeClast происходит следующим образом: вычисляются энергии попарного взаимодействия ионов с применением кулоновского потенциала. Затем полученные энергии складываются для получения удвоенной исходной энергии исследуемого кластера. В кластере выявляются так называемые критические ионы – те ионы, энергия взаимодействия которых с соседними ионами положительна. Из кластера удаляется ион с самой высокой энергией, и энергия клас-

тера пересчитывается заново. Сравниваются энергии кластера до и после удаления иона. Если энергия оказывается меньше, значит, кластер стал более устойчивым. В противном случае удалённый ион возвращается в систему, и мы переходим к следующему критическому иону. Расчёт программой KeClast производится до тех пор, пока не будут удалены все критические ионы, позволяющие минимизировать энергию кластера. На этом этапе моделируются точечные дефекты в структуре кластера и уточняется отношение Li/Nb [10, 12].

Инновацией в расчётах является то, что моделирование ведётся на основании кислородно-октаэдрических кластеров MeO_6 , а не элементарных ячеек. Это позволяет избежать, помимо потери электронной нейтральности, разорванности кислородных октаэдров по краям исследуемой структуры. Кроме того, нет необходимости использовать в расчетах сложные вакансионные сплит-модели. Катионы Li^+ и Nb^{5+} , Me^{3+} и вакансии в каркас из кислородных октаэдров O_6 помещаются методом случайного заброса, учитывая энергетический подбор каждой позиции: ион или вакансия забрасывается туда, где энергия кластера оказывается минимальной. Здесь ион или вакансия фиксируется, возможность замены ионом другого сорта невозможна. Данная итерация повторяется до полного заполнения всех октаэдров кристалла LiNbO_3 заданного состава.

Результаты и их обсуждение

Некоторые результаты расчётов кластеров в беспримесном и легированном кристалле в ниобате лития описаны в статьях [10, 12]. Разработанный нами специальный пакет программ позволяет учитывать структурные точечные дефекты в катионной подрешетке типа Nb_{Li} , Nb_{V} , V_{Li} и др., искажения кислородных октаэдров O_6 , что дает возможность уточнения расположения ионов в них, причём дефекты моделируются не по всему объёму кристалла, а непосредственно в структуре кластеров. В качестве входных параметров используются типы атомов, формальные заряды, координаты, полученные из законов симметрии и пространственных групп на основе рентгеноструктурных данных [10]. Энергия кластеров рассчитывается с применением различных эмпирических и полуэмпирических потенциалов методами молекулярной динамики [12]. На основе проведенной минимизации энергии можно произвести сравнительный анализ структур кислородно-октаэдрических кластеров различного

размера и состава в кристалле ниобата лития до и после оптимизации, а также оценить влияние примесного иона на упорядоченность (совершенство) структуры кластера.

В результате оптимизации отношение $R = \text{Li/Nb}$ падает у беспримесных кластеров примерно на 0,35 и у легированных кластеров на 0,3 (таблица). Доля стехиометрической структуры ($R = 1$) в кластере немного снижается при увеличении соотношения Li/Nb лития к ниобию. Существенно отметить то, что полученная после оптимизации энергия кластера имеет явно выраженный минимум как раз при близком к конгруэнтному соотношению Li/Nb (рис. 1), что подтверждается экспериментальными данными о максимальной устойчивости реальных кристаллов именно с конгруэнтным соотношением. Состав стехиометрического кристалла находится на границе области гомогенности и является неустойчивым [1].

Энергия кластера до и после оптимизации приведена в таблице.

Энергия кластера до и после оптимизации (БК – беспримесный кристалл, ЛК – кристалл, легированный ионом $3+$)

Исходное отношение Li/Nb	Конечное отношение Li/Nb		Энергия до оптимизации		Энергия после оптимизации	
	БК	ЛК	БК	ЛК	БК	ЛК
0,92	0,885390	0,897816	-130,1501	-217,5270	-241,8938	-250,7727
0,95	0,911545	0,923972	-128,2540	-215,8165	-241,9212	-249,1462
0,96	0,922278	0,933481	-128,23	-213,6450	-242,8900	-248,3951
0,97	0,937434	0,948517	-126,7215	-213,8088	-243,5790	-247,7550
0,98	0,944850	0,955373	-119,02	-214,8086	-246,2900	-250,5516
1,00	0,965041	0,976307	-124,2239	-214,3362	-242,5227	-252,0593

Линейное поведение в кластере величины $R = \text{Li/Nb}$ с изменением состава кластера (рис. 2) хорошо подтверждается данными спектроскопии комбинационного рассеяния света: зависимости ширины линий в спектре КРС кристалла ниобата лития в зависимости от величины R носят линейный характер в пределах области гомогенности. Последний факт свидетельствует о линейном изменении в пределах области гомогенности квазиупругих постоянных колебаний, происходящих вдоль полярной оси (A_1 -типа симметрии) и перпендикулярно полярной оси (E -типа симметрии).

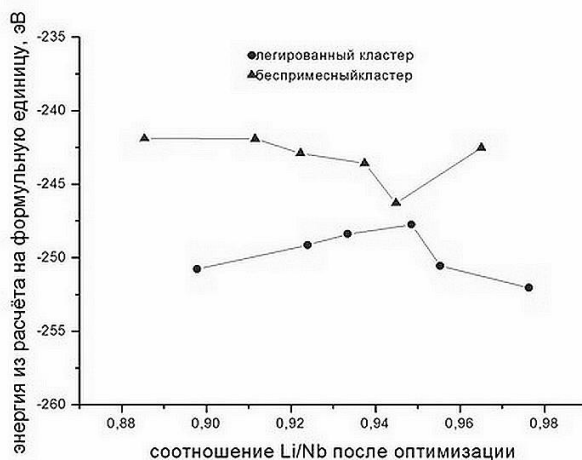


Рис. 1. Энергия кластера ниобата лития после оптимизации в расчёте на формульную единицу

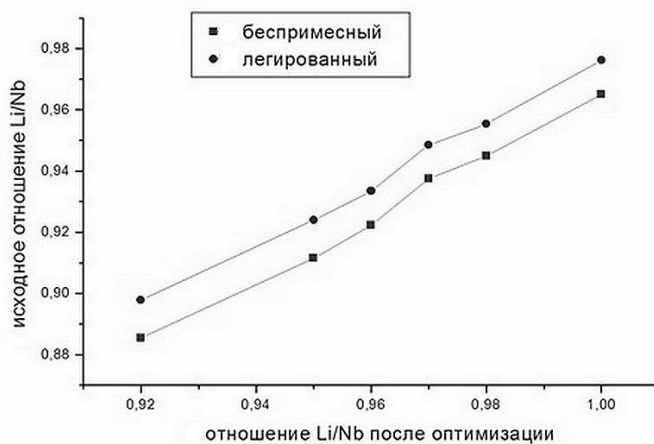


Рис. 2. Отношение Li/Nb после оптимизации моделируемого кластера при различных исходных соотношениях Li/Nb

Заключение

Проведенные нами расчёты с примесным ионом 3^+ обнаружили минимум энергии кластера при $R = \text{Li/Nb} = 0,946$ (конгруэнтный состав беспримесного кристалла) и резкое уменьшение энергии на

выходе после минимизации при приближении отношения $R = \text{Li}/\text{Nb}$ к единице, что свидетельствует о наибольшем упорядочении структуры кластера в кристалле конгруэнтного состава. Понижение энергии после оптимизации модельного кластера с примесным ионом Z^{+} по сравнению с беспримесным модельным кластером подтверждается данными спектроскопии комбинационного рассеяния света, свидетельствующими о наличии наиболее упорядоченной структуры кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:Me}$ в определенном диапазоне концентраций легирующего элемента [13]. Разрабатываемый нами подход формирования крупных кластеров в кристалле ниобата лития на основе кислородно-октаэдрических кластеров – «элементарных ячеек» MeO_6 , а не классических элементарных ячеек, даёт возможность избежать потери разорванности и электронейтральности октаэдров по краям исследуемого кластера, а также позволяет отойти от традиционных вакансионных сплит-моделей.

Список литературы

1. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития. – М.: Наука, 1987. – 264 с.
2. Volk T., Wöhlecke M. Lithium niobate. Defects, photorefractive and ferroelectric switching. – Berlin: Springer. – 2008. – P. 250.
3. Boron influence on defect structure and properties of lithium niobate crystals / N.V. Sidorov, N.A. Teplyakova, O.V. Makarova, M.N. Palatnikov, R.A. Titov, D.V. Manukovskaya, I.V. Birukova // Crystals. – 2021. – Vol. 11. – P. 458.
4. Fontana M.D., Bourson P. Microstructure and defects probed by Raman spectroscopy in lithium niobate crystals and devices // Applied Physics Reviews. – 2015. – Vol. 2, № 4. – P. 040602(1–14).
5. Conducting domain walls in lithium niobate single crystals / M. Schröder, A. Haußmann, A. Thiessen, E. Soergel, T. Woike, L.M. Eng // Advanced Functional Materials. – 2012. – Vol. 22, № 18. – P. 3936–3944.
6. Влияние кластерных дефектов переменного состава на оптические и радиационные характеристики оксидных кристаллов / С.Ф. Бурачас, А.А. Васильев, М.С. Ипполитов, В.И. Манько, Ю.А. Савельев, Г. Таймулайтис // Кристаллография. – 2007. – Т. 52, № 6. – С. 1124–1130.
7. Computer-simulation studies of intrinsic defects in crystals / H. Donnerberg, S.M. Tomlinson, C.R.A. Catlow, O.F. Schirmer // Physical Review B. – 1989. – Vol. 40, № 17. – P. 11909–11916.

8. Cation substitution models of congruent investigated by X-ray and neutron powder diffraction / N. Zotov, H. Boysen, F. Frey, T. Metzger, E. Born // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1994. – Vol. 55, № 2. – P. 145–152.

9. Ordered defect lattice in lithium niobate crystals / L.A. Aleshina, O.V. Sidorova, A.V. Kadetova, N.V. Sidorov, N.A. Teplyakova, M.N. Palatnikov // *Inorganic Materials*. – 2019. – Vol. 55, № 7. – P. 692–697.

10. Investigation of the cluster formation in lithium niobate crystals by computer modeling method / V.M. Voskresenskii, O.R. Starodub, N.V. Sidorov, M.N. Palatnikov // *Crystallography Reports*. – 2017. – Vol. 62, №. 2. – P. 205–209.

11. Кадетова А.В., Палатников М.Н., Сидорова О.В. Структурные особенности кристаллов ниобата лития, легированных редкоземельными и щелочноземельными элементами // XXII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (ВКС-XXII): сб. тез. (Екатеринбург, 25–28 августа 2021 г.). – Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та, 2021. – С. 112–113.

12. Влияние легирующего иона на процессы дефектообразования в моделируемых кластерах ниобата лития / О.Р. Стародуб, В.М. Воскресенский, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова*. – Тверь: Изд-во Твер. гос. ун-та, 2020. – Вып. 12. – С. 180–189.

13. Effects of the ordering of structural units of the cationic sublattice of $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ crystals and their manifestation in Raman spectra / N.V. Sidorov, A.A. Yanichev, M.N. Palatnikov, A.A. Gabain // *Optics and Spectroscopy*. – 2014. – Vol. 116, №2. – P. 281–290.

References

1. Kuz'minov Iu.S. *Elektroopticheskie i nelineinoopticheskie kristally niobata litia* [Electro-optical and nonlinear-optical lithium niobate crystal]. Moscow: Nauka, 1987, 264 p.

2. Volk T., Wöhlecke M. *Lithium niobate. Defects, photorefractive and ferroelectric switching*. Berlin: Springer, 2008, 250 p.

3. Sidorov N.V., Teplyakova N.A., Makarova O.V., Palatnikov M.N., Titov R.A., Manukovskaya D.V., Birukova I.V. Boron influence on defect structure and properties of lithium niobate crystals. *Crystals*, 2021, vol. 11, 458 p.

4. Fontana M.D., Bourson P. Microstructure and defects probed by Raman spectroscopy in lithium niobate crystals and devices. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2, no. 4, 040602(1-14) P.

5. Schröder M., Haußmann A., Thiessen A., Soergel E., Woike T., Eng L.M. Conducting domain walls in lithium niobate single crystals. *Advanced Functional Materials*, 2012, vol. 22, no. 18, pp. 3936-3944.

6. Burachas S.F., Vasil'ev A.A., Ippolitov M.S., Man'ko V.I., Savell'ev Iu.A., Taimulaitis G. Vliianie klasternykh defektov peremennogo sostava na opticheskie i radiatsionnye kharakteristiki oksidnykh kristallov [Influence of cluster defects of variable composition on optical and radiation characteristics of oxide crystals]. *Kristallografiia*, 2007, vol. 52, no. 6, pp. 1124-1130.

7. Donnerberg H., Tomlinson S.M., Catlow C.R.A., Schirmer O.F. Computer-simulation studies of intrinsic defects in crystals. *Physical Review B*, 1989, vol. 40, no. 17, pp. 11909-11916.

8. Zotov N., Boysen H., Frey F., Metzger T., Born E. Cation substitution models of congruent investigated by X-ray and neutron powder diffraction. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1994, vol. 55, no. 2, pp. 145-152.

9. Aleshina L.A., Sidorova O.V., Kadetova A.V., Sidorov N.V., Teplyakova N.A., Palatnikov M.N. Ordered defect lattice in lithium niobate crystals. *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55, no. 7, pp. 692-697.

10. Voskresenskii V.M., Starodub O.R., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. Investigation of the cluster formation in lithium niobate crystals by computer modeling method. *Crystallography Reports*, 2017, vol. 62, no. 2, pp. 205-209.

11. Kadetova A.V., Palatnikov M.N., Sidorova O.V. Strukturnye osobennosti kristallov niobata litiia, legirovannykh redkozemel'nymi i shchelochnozemel'nymi elementami [Structural features of lithium niobate crystals doped with rare earth and alkaline earth elements]. *XXII Vserossiiskaia konferentsiia po fizike segnetoelektrikov (VKS-XXII). Cbornik tezisov (Ekaterinburg, 25-28 Avgusta 2021)*. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet, 2021, pp. 112-113.

12. Starodub O.R., Voskresenskii V.M., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. Vliianie legiruiushchego iona na protsessy defektoobrazovaniia v modeliruemykh klasterakh niobata litiia [Effect of doping ion on defect formation processes in simulated lithium niobate clusters]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniia klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*.

Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov. Ed. V.M. Samsonov, N.Iu. Sdobniakov. Tver': Tverskoi gosudarstvennyi universitet, 2020, iss. 12, pp. 180-189.

13. Sidorov N.V., Yanichev A.A., Palatnikov M.N., Gabain A.A. Effects of the ordering of structural units of the cationic sublattice of $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ crystals and their manifestation in Raman spectra. *Optics and Spectroscopy*, 2014, vol. 116, no. 2, pp. 281-290.

Сведения об авторах

СТАРОДУБ Ольга Ростиславна

e-mail: o.starodub@ksc.ru

Кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, (Апатиты, Россия)

СИДОРОВ Николай Васильевич

e-mail: n.sidorov@ksc.ru

Доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, (Апатиты, Россия)

ПАЛАТНИКОВ Михаил Николаевич

e-mail: m.palatnikov@ksc.ru

Доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории материалов электронной техники, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, (Апатиты, Россия)

About the authors

STARODUB Olga Rostislavna

e-mail: o.starodub@ksc.ru

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Electronic Engineering Materials, Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials named after I.V. Tananaeva KSC RAS, (Apatity, Russia)

SIDOROV Nikolay Vasilievich

e-mail: n.sidorov@ksc.ru

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Materials for Electronic Engineering, Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials. I.V. Tananaeva KSC RAS, (Apatity, Russia)

PALATNIKOV Mikhail Nikolaevich

e-mail: m.palatnikov@ksc.ru

Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Materials for Electronic Engineering, Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials. I.V. Tananaeva KSC RAS, (Apatity, Russia)

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 14.01.2023

Одобрена: 20.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 14/01/2023

Approved: 20/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Стародуб, О.Р. Компьютерное моделирование кластеров в легированных кристаллах ниобата лития / О.Р. Стародуб, Н.В. Сидоров, М.Н. Палатников // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 80–91.

Please cite this article in English as: Starodub O.R., Sidorov N.V., Palatnikov M.N. Computer simulation of clusters in doped crystals of lithium niobate // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 80-91.

УДК 681.7.068/.069

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.06

А.В. Сюй

Центр фотоники и двумерных материалов Московского
физико-технического института (Национальный исследовательский
университет), Долгопрудный, Россия

НОВЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МАКСЕНОВ ДЛЯ СБОРА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Впервые предлагается провести системное исследование синтеза и фотоактивных свойств гетероструктур MXene из четырехкомпонентных MAX-фаз. Получены важные фундаментальные знания о структуре энергетических зон таких материалов, что позволило объяснить процессы фотовозбуждения и переноса заряда в фотокаталитических композициях этого класса. Изучен механизм каталитического действия композиций гетероструктур MXene. Проведенные исследования расширяют область фундаментальных знаний о гетероструктурах MXene и являются основой для их практического использования, в том числе для перехода на новые материалы для нужд альтернативной энергетики.

Ключевые слова: максены, MAX-фаза, гетероструктура, оптические свойства, фотокатализ, фотоотгрев, сбор солнечной энергии.

A.V. Syuy

Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and
Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

NEW MAXEN-BASED HETEROSTRUCTURES FOR SOLAR ENERGY HARVESTING

A systematic study of the synthesis and photoactive properties of MXene heterostructures from four-component MAX phases is proposed for the first time. Important fundamental knowledge on the energy band structure of such materials was obtained, which allowed to explain the photoexcitation and charge transfer processes in photocatalytic compositions of this class. The mechanism of catalytic action of MXene heterostructure compositions was studied. Conducted research extends the field of fundamental knowledge about MXene heterostructures and provides a basis for their practical application, including the transition to new materials for the needs of alternative energy.

Keywords: MXene, MX-phase, heterostructure, optical properties, photocatalysis, photogeneration, solar energy harvesting.

Дефицит энергии и воды признан одной из самых серьезных глобальных проблем XXI века. По оценкам специалистов, к 2050 г. мировые потребности в энергоресурсах составят 50 ТВт для поддержания экономического роста. Поскольку солнце ежедневно дает Земле

173 000 ТВт энергии, а солнечная энергия считается теоретически неисчерпаемой, многие исследователи посвятили свою работу поиску материалов для эффективного сбора солнечной энергии.

Солнечное излучение находится в диапазоне от 295 до 2500 нм, причем наиболее интенсивное солнечное излучение происходит в диапазоне видимого света, так что 43 % солнечной энергии, достигающей поверхности Земли, приходится на диапазон длин волн от 400 до 700 нм. Чтобы максимально использовать солнечное излучение для нужд человечества, оптические материалы для эффективного сбора солнечной энергии должны обладать сильным и широкополосным поглощением. Полупроводники, которые являются наиболее часто используемыми материалами в таких приложениях, имеют широкую запрещенную зону и активны только в УФ-диапазоне. Например, TiO_2 является наиболее изученным и используемым материалом для преобразования солнечной энергии из-за простоты обработки, химической стабильности, большой площади поверхности, низкой стоимости, нетоксичности и отличных характеристик миграции заряда. Однако он имеет широкую запрещенную зону 3,2–3,5 эВ, что ограничивает разделение зарядов в диапазоне менее чем 5 % солнечного спектра. При применении полупроводниковых материалов в схемах использования солнечной энергии исследователи часто сталкиваются с двумя проблемами – ограниченное поглощение света и быстрая рекомбинация зарядов, хотя использовалось множество различных стратегий (например, инженерия дефектов или легирование) увеличения эффективности полупроводников для использования солнечной энергии. Соотношение эффективности и стоимости еще не соответствует значениям, необходимым для сопоставления с традиционными источниками ископаемого топлива и достижения широкого коммерческого применения.

Целью данной работы является разработка гетероструктур максен с двойным переходным металлом и изучение механизмов усиленного поглощения света в таких системах для сбора солнечной энергии.

Наноллисты DTM-MXene с химической формулой $(\text{B}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{C}$, $(\text{B}_{1-x}\text{Ti}_x)_3\text{C}_2$ получены травлением из четырех компонентных MAX-фаз, где М – пара переходных металлов $(\text{B}_{1-x}\text{Ti}_x)$, А – металл (Al), X – углерод (C), $x = 0 \dots 1$, В = V, Nb, Ta, Cr, Mo. Конкретными применениями, когда эти материалы используют солнечное излучение

в качестве источника энергии, являются фототермический нагрев воды, фотокаталитическое очищение воды и реакция фотокаталитического расщепления воды для генерации водорода. Поскольку преобразование солнечной энергии регулируется четырьмя процессами (поглощение света, разделение зарядов, миграция заряда и рекомбинация заряда), то для достижения этой цели будут изучены и оптимизированы механизмы повышения плазмонных эффектов в материалах D-MXene для преобразования солнечной энергии путем сочетания систематического дизайна образцов с методами точной характеристики, фототермическими и фотокаталитическими испытаниями и теоретическими разработками.

Чтобы преодолеть это ограничение, мы будем использовать двойной переходный металл MXenes (D-MXenes). MXenes – это класс плазмонных 2D-материалов, которые имеют большие перспективы для преобразования солнечной энергии благодаря разнообразному элементному составу, уникальной 2D-структуре, большой удельной площади поверхности, обильным поверхностным окончаниям, отличным фотоэлектронным свойствам. Недавнее внедрение MXenes с двойным переходным металлом (D-MXenes) еще больше увеличивает количество возможных структур MXenes и возможности настройки их свойств для соответствия конкретному применению. В зависимости от химического состава и метода изготовления эти материалы демонстрируют большое поглощение в широкой полосе пропускания ($\sim 1,55$ мкм), охватывая значительное спектральное окно от видимого до ближнего ИК-диапазона, настраиваемые плазмонные резонансы и регулируемую работу выхода в большом диапазоне от менее 2,14 (самая низкая работа выхода для всех металлов, цезия) до более 5,65 эВ (самая высокая работа выхода для всех металлов у платины).

С открытием уникальных физических свойств однослойного графена в 2004 г. [1] интерес к двумерным материалам растет с каждым годом [2, 3], и не будет преувеличением сказать, что публикации о двумерных материалах преобладают по количеству на страницах ведущих научных журналов в области нанотехнологий. Благодаря своим превосходным свойствам они нашли применение в различных новых областях знаний, таких как накопление энергии, оптоэлектроника, зондирование газа, сбор энергии, теплопроводность и изготовление электронных устройств. MXenes (карбиды, карбо-

нитриды и нитриды переходных металлов) находятся среди последних дополнений к 2D-миру [4, 5]. Они составляют большое семейство двумерных материалов, насчитывающих более 30 различных типов и сотни предсказанных расчетами. MXenes демонстрируют высокую электропроводность ($2 \times 10^5 \text{ См} \times \text{м}^{-1}$) наравне с многослойным графеном [6], высокую теплопроводность, большую удельную площадь поверхности [7], богатый химический состав поверхности благодаря их способности функционализации [8, 9], легкое диспергирование в ряде растворителей, включая воду [10], и, что наиболее важно, потрясающие фотоэлектрические свойства, способствующие использованию солнечной энергии. Они считаются очень перспективными материалами для различных областей применения в фотокатализе, медицине, фотонике, трибологии и могут быть использованы в качестве материалов для накопления энергии, защиты от электромагнитных помех, армирования композитов, очистки воды, газов и биосенсоров, смазок и т.д., для фото-, электро- и химического катализа [11, 12]. Несмотря на большие перспективы использования этих материалов в сборе солнечной энергии, исследования все еще находятся на начальной стадии. Более того, исследовательские усилия были сконцентрированы на трехкомпонентных МАХ-фазах и полученных из них MXenes, тогда как четырехкомпонентные МАХ-фазы и MXenes на их основе находятся буквально только в начале исследований [13, 14]. В последние годы большое внимание было уделено различным гибридным структурам, которые объединяют два или более двумерных материалов (гетероструктуры Ван-дер-Ваальса) [15, 16], в которых устранены недостатки отдельных материалов и сохранены их лучшие свойства. Сообщения о гибридных материалах на основе двойных переходных металлов MXenes полностью отсутствуют в научной литературе.

Настоящие исследования находятся в авангарде современных исследований в области 2D-материалов и преобразования солнечной энергии. В работе предлагается систематическое изучение синтеза четырехкомпонентных МАХ-фаз, создание гетероструктур MXenes в сочетании с другими двумерными материалами, а также комплексное исследование фотоэлектрических свойств. Впервые фотокаталитическая активность таких гетероструктур MXenes систематически исследована. Результаты исследований значительно расширяют фундамен-

тальные знания о MXenes и являются основой для их практического использования, включая переход на новые материалы для нужд преобразования солнечной энергии.

С момента своего открытия в 2011 г. MXenes привлекли значительное внимание научного сообщества благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Однако из многих теоретически предсказанных составов синтезировано только 30, и на данный момент существует лишь несколько публикаций, посвященных проблеме создания MXenes из четырехкомпонентных МАХ-фаз [17, 18], где исследуются достаточно простые структуры и отсутствуют экспериментальные данные о свойствах, важных для их применения в преобразовании солнечной энергии.

Можно предположить, что синтез новых MXenes, их сборка в гибридные материалы, определение и контроль их фотоэлектрических свойств представляют значительный научный интерес [19–23]. С точки зрения решения комплекса амбициозных задач, предложенных в этой работе, следует отметить, что наша группа имеет налаженные связи с Лабораторией пластического деформирования материалов Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения Российской академии наук, владеющей технологией создания МАХ-фаз путем спекания и экструзии, а также наличие всего необходимого оборудования для создания гетероструктур MXenes в сочетании с другими двумерными материалами [24–28]. Для характеристики синтезированных материалов будет использоваться аналитическое оборудование Центра фотоники и двумерных материалов МФТИ и оборудование Центра коллективного использования уникального научного оборудования в области нанотехнологий (Центр коллективного пользования МФТИ). Центры оснащены всем необходимым для реализации проекта оборудованием как технологическим, так и аналитическим. Полученные данные будут также проверены теоретическими методами *ab initio* расчетов, предоставленными нашими партнерами из Лаборатории компьютерного моделирования материалов МФТИ. Достижимость запланированных результатов гарантируется использованием оригинальных и одновременно апробированных теоретических и экспериментальных методов и подходов.

В настоящее время интенсивные исследования фотоактивности полупроводниковых материалов можно условно разделить на две большие группы:

I) познание фотофизических свойств материалов (фундаментальные исследования);

II) исследование перспектив их практического применения в разнообразных современных технологиях, в том числе для нужд экологически чистой, ресурсосберегающей энергетики (прикладные исследования).

Наиболее перспективным в гетерогенном фотокатализе является использование видимого (солнечного) света для активации фотокаталитических реакций, а наиболее эффективным – поглощение в области так называемого собственного поглощения полупроводников и диэлектриков (при межзонных электронных переходах). Поэтому ширина энергетической щели полупроводниковых фотокатализаторов должна соответствовать видимой области спектра: $E_g < 3,0 \text{ eV}$. Вместе с тем энергетическая щель «идеального» фотокатализатора не должна быть слишком узкой, а положение уровней энергии зоны проводимости (CB) и валентной зоны (VB) должно удовлетворять определенным условиям. Так, например, в случае фотокаталитического разложения воды уровень энергии (в вакуумной шкале), соответствующий дну зоны проводимости фотокатализатора, должен быть больше редокс-потенциала H^+/H_2 ($-4,5 \text{ eV}$), а уровень потолка валентной зоны – меньше редокс-потенциала $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ($-5,73 \text{ eV}$). При этом ширина энергетической щели эффективных фотокатализаторов должна несколько превышать пороговую энергию фотонов, при которых теоретически возможно разложение воды на газообразный кислород и водород ($E_g > 1,23 \text{ eV}$, см., например, [29]).

Соответствующий почти всем приведенным условиям и отличающийся химической устойчивостью, нетоксичностью и дешевизной диоксид титана является наиболее популярным катализатором. Вместе с тем подчеркнем следующее: фотокаталитические реакции характерны для твердых тел разной природы, и в том числе для сложных оксидов и твердых тел других классов. Кроме разложения воды – наиболее ценной фотокаталитической реакции для запасаания солнечной энергии, все большее внимание привлекают исследования других реакций, потенциально перспективных для преобразования солнечной

энергии в химическую. Это, например, восстановление CO_2 до CO и их совместное с H_2O преобразование с запасением энергии [30, 31]. В настоящее время также интенсивно проводятся исследования фотокаталитического окисления молекул как органических, так и неорганических. Это связано главным образом с практическим использованием фотокаталитического способа очистки воды и воздуха от загрязнений различной химической природы [32, 33]. Значительное число работ сегодня посвящено также исследованию явлений, родственных гетерогенному фотокатализу, – фотоиндуцированной супергидрофильности поверхности [34] и фотобактерицидному эффекту, обусловленному воздействием на микроорганизмы активного кислорода и радикальных частиц, генерируемых при фотооблучении дисперсных твердых тел [35]. Еще раз подчеркнем, что диоксид титана и композиции на его основе до сих пор остаются наиболее популярными фотокатализаторами [36].

В исследованиях фотокаталитических систем для нужд экологически чистой энергетики в последние 10–15 лет можно выделить три основных направления:

- 1) сенсibilизация диоксида титана к видимому (солнечному) свету;
- 2) повышение эффективности фотокатализаторов на основе диоксида титана за счет снижения рекомбинационных потерь фотоносителей;
- 3) поиск новых фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету.

Настоящую работу следует рассматривать в ключе поиска фотокатализаторов, чувствительных к видимому свету. В этом направлении также можно выделить ряд подходов.

Первый – это включение в круг фотокатализаторов простых соединений с относительно небольшой шириной энергетической щели ($E_g = 2 - 2,5$ эВ), собственное поглощение которых находится в видимой области спектра. Это, например, оксид меди Cu_2O , которому ранее не уделялось достаточного внимания как фотокатализатору, но который сегодня рассматривается и как самостоятельный фотокатализатор [37, 38] и как важный компонент композитных фотокатализаторов [39].

Второй – это поиск и исследование фотокатализаторов на основе сложных оксидов и соединений другой химической природы. Примером этого могут служить, например, оксиды переходных металлов (BiVO_4 , Ag_3VO_4 , SnNb_2O_6 , BiTaO_4 и др.), нитриды (C_3N_4), нитриды металлов (Ta_3N_5), оксинитриды металлов (TaON , $\text{Ti}_3\text{O}_3\text{N}_2$, $\text{Zr}_3\text{O}_3\text{N}_2$, LaTaON_2 , SrTaO_2N , LaTiO_2N и др.), карбидные и нитридные MXenes типа M_3X_2 и M_2X , где M – переходной металл, X – углерод или азот [40, 41], шпинели ZnAl_2O_4 [42], ZnGa_2O_4 [43], слоистые соединения, например, титан-ниобаты [44], вольфраматы [45], апатиты [46] и соединения другой химической природы.

Также как потенциальные фотокатализаторы сегодня рассматриваются разнообразные оксидные, неоксидные и смешанные висмут-содержащие соединения. Как фотокатализаторы изучаются, в частности: оксидбромиды [47], оксиодаты [48] и оксихлориды висмута [49], а также вольфраматы [50], ферраты [51], ванадаты висмута [52], висмут-содержащие слоистые перовскитоподобные оксиды со структурой фаз ауривиллиуса на основе $(\text{BiO})_2\text{CO}_3$ [53], а также гетероструктуры на основе висмут-содержащих соединений, такие как $\text{Bi}_5\text{O}_7\text{I}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ [54], $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{TiO}_2$ [55] и допированные фотокатализаторы: $\text{Au}/\text{BiOCl}@m\text{SiO}_2$ [56], Pt/BiFeO_3 [57] и Nd допированный BiVO_4 [58].

В последнее время возрос интерес к фотокаталитическим композициям на основе висмутатов щелочноземельных металлов (в частности, в приведенных работах исследуются композиции висмутат кальция – оксид висмута и висмутат стронция – оксид висмута) [59–63]. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны соединений висмута достаточно мала, и эти соединения оказываются чувствительны к видимому свету. Создание на основе висмут-содержащих соединений гетерогенных композиций позволяет значительно повысить эффективность разделения электрон-дырочных пар, образующихся при фотоактивации, и следовательно, повысить квантовый выход таких каталитических композиций.

На основе хорошо известного обзора [64] профессор Масахиро Мияучи [65] выделил ниобаты в качестве подкласса потенциально перспективных фотокатализаторов, обладающих достаточным потенциалом для инициирования реакции расщепления вода, а значит, для потенциального применения для нужд экологически чистой и ресурсосберегающей энергетики.

Действительно, фотокаталитическим свойствам ниобата лития и его возможности использования для разложения воды и генерации водорода с последнее время уделяется все больше внимания [64–68]. Во всех этих и других работах по этой тематике для активации фотостимулированных процессов используется УФ-излучение. Это связано с тем, что ниобаты обладают энергетической щелью, достигающей величины порядка 3,5 эВ. Это делает невозможным их активацию видимым светом. С другой стороны, преимуществом ниобата лития являются широкие возможности его легирования. При этом легирующие примеси могут в значительной степени изменять его оптические свойства.

В последнее время еще один класс материалов привлекает огромное внимание ученых различных областей знаний из-за их уникальных свойств, в том числе и фотокаталитических, это слоистые двумерные материалы и MXenes [69–72]. Особенно перспективным следует отметить гетероструктуры MXenes в комбинации с двумерными материалами [73–75].

Сделанный выше всесторонний обзор основных направлений развития научных исследований в области фотокатализа для нужд экологически чистой энергетики показывает, что в основном проводимые исследования носят практико-ориентированный характер. Однако предлагаемая работа направлена на всестороннее исследование фотокаталитических свойств новых материалов, перспективных для нужд водородной энергетики. Подобные исследования ценны как сами по себе (с точки зрения фундаментальной науки), так и с позиции того, что они могут опосредованно повлиять на практико-ориентированные исследования.

Список литературы

1. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov // *Science* 340. – 2013. – 1226419.
2. Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides // *Nature Photonics*. – 2016. – 10. – 216–226; Jia B., 2D optical materials and the implications for photonics / K.F. Mak, J. Shan // *APL Photonics*. – 2019. – 4. – 080401.

3. Van der Waals heterostructures for high-performance device applications: challenges and opportunities / S.J. Liang, B. Cheng, X. Cui, F. Miao // *Advanced Materials*. – 2019. – 32 (27). – 1903800.
4. A perspective on MXenes: Their synthesis, properties, and recent applications / K.A. Papadopolou, A. Chroneos, D. Parfitt, S-R. G. Christopoulos // *J. Appl. Phys.* – 2020. – 128. – 170902.
5. Gonzalez-Julian J. Processing of MAX phases: From synthesis to applications // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2021. – 104. – 659–690.
6. Surface-agnostic highly stretchable and bendable conductive MXene multilayers / H. An, T. Habib, S. Shah, H. Gao, M. Radovic, M.J. Green, J.L. Lutkenhaus // *Sci. Adv.* – 2018. – 4, eaaq0118.
7. High capacitance of surface-modified 2D titanium carbide in acidic electrolyte Electrochem / Y. Dall'Agnese, M. R. Lukatskaya, K. M. Cook, P-L. Taberna, Y. Gogotsi, P. Simon // *Commun.* – 2017. – 48. – 118–22.
8. Control of MXenes' electronic properties through termination and intercalation / J.L. Hart, K. Hantanasirisakul, A.C. Lang, B. Anasori, D. Pinto, Y. Pivak Y, J.T. van Omme, S.J. May, Y. Gogotsi, M.L. Taheri // *Nat. Commun.* – 2019. – 10. – 522.
9. Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review / M. Khazaei, A. Ranjbar, M. Arai, T. Sasaki, S. Yunoki // *J. Mater. Chem.* – 2017. – A, 5. – 2488–503.
10. Maleski K., Mochalin V.N., Gogotsi Y. Dispersions of two-dimensional titanium carbide MXene in organic solvents // *Chem. Mater.* – 2017. – 29. – 1632–40.
11. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage / Babak Anasori, Maria R. Lukatskaya and Yury Gogotsi // *Nature Reviews / Materials*. – Vol. 2. – Article Number 16098.
12. Current Trends in MXene-Based Nanomaterials for Energy Storage and Conversion System: A Mini Review / Karthik Kannan, Kishor Kumar Sadasivuni, Aboubakr M. Abdullah and Bijandra Kumar // *Catalysts*. – 2020. – 10. – 495.
13. Synthesis of MAX Phases in the Zr-Ti-Al C System / B. Tunca [et al.] // *Inorg. Chem.* – 2017. – 56. – 3489–3498.
14. Synthesis of new M-layer solid-solution 312 MAX phases ($\text{Ta}_{1-x}\text{Ti}_x$)₃AlC₂ ($x = 0.4, 0.62, 0.75, 0.91$ or 0.95), and their corresponding MXenes / T.P. Maxwell Rigby [et al.] // *RSC Adv.* – 2021. – 11. – 3110–3114.

15. Geim A.K., Grigorieva I.V. Van der Waals heterostructures // *Nature*. – 2013. – 499, 419–425.
16. Liu Y., Huang Y., Duan X. Van der Waals integration before and beyond two-dimensional materials // *Nature*. – 2019. – 567. – 323–333.
17. Synthesis of MAX phases in the Zr-Ti-Al-C system / B. Tunca [et al.] // *Inorg. Chem.* – 2017. – 56. – 3489–3498.
18. Synthesis of new M-layer solid-solution 312 MAX phases (Ta_{1-x}Ti_x)₃AlC₂ (x = 0.4, 0.62, 0.75, 0.91 or 0.95), and their corresponding MXenes / Maxwell T.P. Rigby [et al.] // *RSC Adv.* – 2021. – 11. – 3110–3114.
19. Design of Heterostructures of MXene/Two-Dimensional Organic Frameworks for Na–O₂ Batteries with a New Mechanism and a New Descriptor / Yuxiang Min, Hao Yuan, Wugang Wang, Lai Xu // *J. Phys. Chem. Lett.* – 2021. – 12. – 2742–2748.
20. A perspective on MXenes: Their synthesis, properties, and recent applications / Konstantina A. Papadopoulou, Alexander Chroneos, David Parfitt, Stavros-Richard G. Christopoulos // *J. Appl. Phys.* – 2020. – 128. – 170902.
21. Jesus Gonzalez-Julian. Processing of MAX phases: From synthesis to applications // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2021. – 104. – 659–690.
22. Current trends in MXene-based nanomaterials for energy storage and conversion system: A Mini Review / Karthik Kannan, Kishor Kumar Sadasivuni, Aboubakr M. Abdullah, Bijandra Kumar // *Catalysts*. – 2020. – Vol 10. – P. 495.
23. 2D/2D Heterojunction of R-scheme Ti₃C₂ MXene/MoS₂ nanosheets for enhanced photocatalytic performance / Ziyu Yao, Huajun Sun, Huiting Sui, Xiaofang Liu // *Nanoscale Research Letters*. – 2020. – Vol. 15. – P. 78.
24. Dense Ti₃AlC₂ based materials obtained by SHS-extrusion and compression methods / A. Pazniak, P. Bazhin, I. Shchetinin, E. Kolesnikov, A. Prokopets, N. Shplis, A. Stolin, D. Kuznetsov // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45. – P. 2020–2027.
25. Бажин П.М., Стельмах Л.С., Столин А.М. Влияние степени деформации на формирование МАХ-фазы в материалах на основе Ti–Al–C при СВС-экструзии // *Неорганические материалы*. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 330–335.
26. Synthesis, characterization, optoelectronic and photocatalytic properties of Sr₂Bi₂O₅/SrCO₃ and Sr₃Bi₂O₆/SrCO₃ heterostructures with

varying SrCO_3 content / D.S. Shtarev, A.V. Shtareva, R. Kevorkyants, A.V. Syuy // *Chemosphere*. – 2021. – Vol. 267. – P. 129229. DOI: 10.1016/j.chemosphere. – 2020. – P. 129229.

27. Unraveling the diffusion properties of zeolite-based multi-component catalyst by combined gravimetric analysis and IR spectroscopy (AGIR) / Peng Peng, Stosic Dusan, Aitblal Abdelhafid, Vimont Alexandre, Bazin Philippe, Liu Xin-Mei, Yan Zi-Feng, Mintova Svetlana, Travert Arnaud // *ACS Catalysis*. – 2020. – Vol. 10. – P. 6822–6830.

28. Multiscale Mechanistic Insights of Shaped Catalyst Body Formulations and Their Impact on Catalytic Properties / Whiting Gareth Chung Sang-Ho, Stosic Dusan, Dutta Chowdhury Abhishek, I. van der Wal Lars, Fu Donglong, Zecevic Jovana, Travert Arnaud, Houben Klaartje, Baldus Marc, Weckhuysen Bert I. // *ACS Catalysis*. – 2019. – 9. – 4792–4803.

29. Photocatalytic water splitting – the untamed dream: a review of recent advances / T. Jafari, E. Moharrer, A. ShiraziAmin, R. Miao, W. Song, S.L. Suib // *Molecules*. – 2016. – 21. – 900. – P. 2–29.

30. Go Sahara, Osamu Ishitani. Efficient Photocatalysts for CO_2 Reduction // *Inorg. Chem*. – 2015. – 54. – 5096–5104.

31. Coupling carbon dioxide reduction with water oxidation in nanoscale photocatalytic assemblies / Wooyul Kim, Beth Anne McClure, Eran Edri, Heinz Frei. // *Chem. Soc. Rev.* – 2016. DOI: 10.1039/c6cs00062b.

32. Zhixiang Zhang, Zheng Jiang, Wenfeng Shangguan. Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: A state-of-the-art review // *Catalysis Today*. – 2016. – 264. – P. 270–278.

33. Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutants in wastewater using different modified titanium dioxides: A comparative review / H. Zangeneh, A.A.L. Zinatizadeh, M. Habibi, M. Akia, M. Hasnain Isa. // *J. Industr. Engin. Chem*. – 2015. – Vol. 26. – P. 1–36.

34. Swagata Banerjee, Dionysios D. Dionysiou, Suresh C. Pillai Self-cleaning applications of TiO_2 by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2015. – 176–177. – P. 396–428.

35. A review of solar and visible light active TiO_2 photocatalysis for treating bacteria, cyanotoxins and contaminants of emerging concern / Rachel Fagan, Declan E. McCormack, Dionysios D. Dionysiou, Suresh C. Pillai // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2016. – 42. – P. 2–14.

36. Akira Fujishima, Xintong Zhang, Donald A. Tryk TiO_2 photocatalysis and related surface phenomena // *Surface Science Reports*. – 2008. – Vol. 63. – P. 515–582.

37. Efficient visible-light photocatalytic performance of cuprous oxide porous nanosheet arrays / Xianghua Li, Jianqiang Wang, Yihe Zhang, Minhua Cao // *Materials Research Bulletin*. – 2015. – Vol. 70. – P. 728–734.

38. Photocatalytic activity of CuO and Cu_2O nanowires / V. Scuderi, G. Amiard, S. Boninelli, S. Scalese, M. Miritello, P.M. Sberna, G. Impellizzeri, V. Privitera // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2016. – Vol. 42. – P. 89–93.

39. Efficient visible-light photocatalytic hydrogen evolution and enhanced photostability of core@shell $\text{Cu}_2\text{O}@g\text{-C}_3\text{N}_4$ octahedra / Li Liu, Yuehong Qi, Jinshan Hu, Yinghua Liang, Wenquan Cui // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 351. – P. 1146–1154.

40. Manan Ahmed, Guo Xinxin. A Review of Metal Oxynitrides for Photocatalysis // *Inorganic Chemistry Frontiers*. – P. 2–30. DOI: 10.1039/C5QI00202H

41. A perspective on MXenes: Their synthesis, properties, and recent applications / Konstantina A. Papadopoulou, Alexander Chroneos, David Parfitt, Stavros-Richard G. Christopoulos // *J. Appl. Phys.* – 2020. – 128. – 170902.

42. Synthesis of zinc aluminate (ZnAl_2O_4) spinel and its application as photocatalyst / Suellen Battiston, Caroline Rigo, Eric da Cruz Severo, Marcio Antonio Mazutti, Raquel Cristine Kuhn, André Gündel, Edson Luiz Foletto // *Materials Research*. – 2014. – 17(3). – 734–738.

43. Synthesis of uniform ZnGa_2O_4 nanoparticles with high photocatalytic activity / Yufeng Yuan, Junjian Huang, Weixia Tu, Simin Huang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – 616. – P. 461–467.

44. Ion exchanged potassium titanoniobate as photocatalyst under visible light / Koichi Inoue, Satoshi Suzuki, Masayuki Nagai // *J. Electroceram.* – 2010. – 24. – P. 110–114.

45. Hossein Farsi, Zahra Barzgari, Seyede Zahra Askari. Sunlight-induced photocatalytic activity of nanostructured calcium tungstate for methylene blue degradation // *Res. Chem. Intermed.* – 2015. – 41. – P. 5463–5474.

46. Band gap and photocatalytic properties of Ti-substituted hydroxyapatite: Comparison with anatase- TiO_2 / Mineharu Tsukada, Masato

Wakamura, Naoya Yoshida, Toshiya Watanabe // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. – 2011. – 338. – P. 18–23.

47. A facile approach for the tunable fabrication of BiOBr photocatalysts with high activity and stability / Rui Li, Xiaoya Gao, Caimei Fan, Xiaochao Zhang, Yawen Wang, Yunfang Wang // *Applied Surface Science*. – 2015. – 355. – P. 1075–1082.

48. Lijun Cheng, Yong Kang. Bi₅O₇I/Bi₂O₃ composite photocatalyst with enhanced visible light photocatalytic activity // *Catalysis Communications*. – 2015. – 72. – P. 16–19.

49. Au/BiOCl heterojunction within mesoporous silica shell as stable plasmonic photocatalyst for efficient organic pollutants decomposition under visible light / Xiaoqing Yan, Xiaohui Zhu, Renhong Li, Wenxing Chen // *Journal of Hazardous Materials*. – 2016. – 303. – P. 1–9.

50. Onestep synthesis of Bi₂WO₆/TiO₂ heterojunctions with enhanced photocatalytic and superhydrophobic property via hydrothermal method / Chengyu Yang, Yan Huang, Feng Li, Taohai Li // *J. Mater. Sci.* DOI 10.1007/s10853-015- 9433-y.

51. Synthesis of Pt/BiFeO₃ heterostructured photocatalysts for highly efficient visible-light photocatalytic performances / Feng Niu, Da Chen, Laishun Qin, Tong Gao, Ning Zhang, Sen Wang, Zhi Chen, Jiangying Wang, Xingguo Sun, Yuexiang Huang // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2015. – 143. – P. 386–396.

52. The synthesise of lanthanide doped BiVO₄ and its enhanced photocatalytic activity // *Journal of Molecular Liquids*. – 2015. – 211. – P. 25–30.

53. Zilin Ni, Yanjuan Sun, Yuxin Zhang, Fan Dong. Fabrication, modification and application of (BiO)₂CO₃-based photocatalysts: A review / Xiaoming Gao, Zihang Wang, Xiang Zhai, Feng Fu, Wenhong Li // *Applied Surface Science*. – 2016. – 365. – P. 314–335.

54. Lijun Cheng, Yong Kang. Bi₅O₇I/Bi₂O₃ composite photocatalyst with enhanced visible light photocatalytic activity // *Catalysis Communications*. – 2015. – 72. – P. 16–19.

55. One-step synthesis of Bi₂WO₆/TiO₂ heterojunctions with enhanced photocatalytic and superhydrophobic property via hydrothermal method / Chengyu Yang, Yan Huang, Feng Li, Taohai Li // *J. Mater. Sci.* DOI 10.1007/s10853-015-9433-y.

56. Au/BiOCl heterojunction within mesoporous silica shell as stable plasmonic photocatalyst for efficient organic pollutants decomposition under visible light / Xiaoqing Yan, Xiaohui Zhu, Renhong Li, Wenxing Chen // *Journal of Hazardous Materials*. – 2016. – 303. – P. 1–9.

57. Synthesis of Pt/BiFeO₃ heterostructured photocatalysts for highly efficient visible-light photocatalytic performances / Feng Niu, Da Chen n, Laishun Qin n, Tong Gao, Ning Zhang, Sen Wang, Zhi Chen, Jiangying Wang, Xingguo Sun, Yuexiang Huang // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2015. – 143. – P. 386–396.

58. The synthesize of lanthanide doped BiVO₄ and its enhanced photocatalytic activity / Xiaoming Gao, Zihang Wang, Xiang Zhai, Feng Fu, Wenhong Li // *Journal of Molecular Liquids*. – 2015. – 211. – P. 25–30.

59. Photocatalytic degradation of methylene blue on CaBi₆O₁₀/Bi₂O₃ composites under visible light / Yongjiao Wang, Yiming He, Tingting Li, Jun Cai, Mengfei Luo, Leihong Zhao // *Chemical Engineering Journal*. – 2012. – Vol. 189–190. – P. 473–481.

60. Novel CaBi₆O₁₀ photocatalyst for methylene blue degradation under visible light irradiation / Yongjiao Wang, Yiming He, Tingting Li, Jun Cai, Mengfei Luo, Leihong Zhao // *Catal. Communications*. – 2012. – Vol. 18. – P. 161–164,

61. Preparation and photocatalytic activity of novel efficient photocatalyst Sr₂Bi₂O₅ / Zhichao Shan, Yajuan Xia, Yuxiang Yang, Hanming Ding, Fuqiang Huang // *Materials Letters*. – 2009. – Vol. 63, no. 1. – P. 75–77.

62. Efficient destruction of pathogenic bacteria with NiO/SrBi₂O₄ under visible light irradiation / Chun Hu, Xuexiang Hu, Jian Guo, Jiuhui Qu // *Envir. Science & Technology*. – 2006. – Vol. 40, no. 17. – P. 5508–5513.

63. Shtarev D.S., Shtareva A.V. Photocatalytic degradation of the diesel fuel by using the calcium bismuthate – bismuth oxide photocatalyst composition // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – Vol. 377. – P. 204–208.

64. Scaife D.E. Oxide semiconductors in photoelectrochemical conversion of solar energy // *Solar Energy*. – 1980. – Vol. 25, no. 1. – P. 41–54.

65. Photocatalytic carbon dioxide reduction by copper oxide nanocluster-grafted niobate nanosheets / Ge Yin, Masami Nishikawa, Yoshio Nosaka, Nagarajan Srinivasan, Daiki Atarashi, Etsuo Sakai, and Masahiro Miyauchi // *ACS Nano*. – 9, 2. – 2111–2119.

66. Zielińska Beata, Borowiak-Palen Ewa, Kalenzuk Ryszard J. Preparation and characterization of lithium niobate as a novel photocatalyst in hydrogen generation // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – Vol. 69. – Iss. 1. – 2008. – P. 236–242.
67. Saito K., Koga K., Kudo A. Lithium niobate nanowires for photocatalytic water splitting // *Dalton Trans.* – 2011. – Apr 21. – 40(15). – 3909-3913. DOI: 10.1039/c0dt01844a. Epub 2011 Mar 8.
68. Matt Stock. An investigation of the photocatalytic properties of lithium niobate and barium titanate // PhD thesis. Cranfield University. – 2012.
69. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage / Babak Anasori, Maria R. Lukatskaya, Yury Gogotsi // *Nature Reviews. Materials*. – Vol. 2. – Article Number 16098.
70. Additive-free MXene liquid crystals and fibers / Jizhen Zhang [et al.] // *ACS Cent. Sci.* – 2020. – 6. – P. 254–265.
71. Advances in MXene films: synthesis, assembly and applications / Xiaohua Li, Feitian Ran, FanYang, Jun Long, Lu Shao // *Transactions of Tianjin University*. – 2021. – 27. – 217–247.
72. Harnessing the unique properties of MXenes for advanced rechargeable batteries / Deobrat Singh [et. al.] // *J. Phys. Energy*. – 2021. – Vol. 3. – 012005.
73. Unusual synthesis of safflower-shaped $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$ heterostructures initiated from two-dimensional Ti_3C_2 MXene / Nghe My Tran, Qui Thanh Hoai Ta, Jin-Seo Noh // *Applied Surface Science*. – 2021. – 538. – 148023.
74. Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides (MXenes) / Babak Anasori, Yu Xie, Majid Beidaghi, Jun Lu, Brian C. Hosler, Lars Hultman, Paul R. C. Kent, Yury Gogotsi, Michel W. Barsoum // *ACS Nano*. – 2015. – Vol. 9. – № 10. – P. 9507–9516.
75. Pillared Mo_2TiC_2 MXene for high-power and long-life lithium and sodium-ion batteries / Philip A. Maughan, Luc Bouscarrat, Valerie R. Seymour, Shouqi Shao, Sarah J. Haigh, Richard Dawson, Nuria Tapia-Ruiz and Nuno Bimbo // *Nanoscale Adv.* – 2021. – 3. – 3145.

References

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films. *Science* 340, 2013, 1226419.

2. Mak K.F., Shan J. Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides. *Nature Photonics*, 2016, 10, pp. 216-226; B. Jia, 2D optical materials and the implications for photonics. *APL Photonics*, 2019, 4, 080401.
3. Liang S.J., Cheng B., Cui X., Miao F. Van der Waals heterostructures for high-performance device applications: challenges and opportunities. *Advanced Materials*, 2019, 32 (27), 1903800.
4. Papadopoulou K.A., Chroneos A., Parfitt D., Christopoulos S-R. G. A perspective on MXenes: Their synthesis, properties, and recent applications. *J. Appl. Phys.*, 2020, 128, 170902.
5. Gonzalez-Julian J. Processing of MAX phases: From synthesis to applications. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 104, pp. 659-690.
6. An H., Habib T., Shah S., Gao H., Radovic M., Green M.J., Lutkenhaus J.L. Surface-agnostic highly stretchable and bendable conductive MXene multilayers. *Sci. Adv.*, 2018, 4, eaaq0118.
7. Dall'Agnese Y., Lukatskaya M.R., Cook K.M., Taberna P-L., Gogotsi Y., Simon P. High capacitance of surface-modified 2D titanium carbide in acidic electrolyte. *Electrochemistry Communications*, 2017, 48, pp. 118-22.
8. Hart J.L., Hantanasirisakul K., Lang A.C., Anasori B., Pinto D., Pivak Y., Omme van J.T., May S.J., Gogotsi Y., Taheri M.L. Control of MXenes' electronic properties through termination and intercalation. *Nat. Commun.*, 2019, 10, 522.
9. Khazaei M., Ranjbar A., Arai M., Sasaki T., Yunoki S. Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review. *J. Mater. Chem.*, 2017, A, 5, 2488-503.
10. Maleski K., Mochalin V.N., Gogotsi Y. Dispersions of two-dimensional titanium carbide MXene in organic solvents. *Chem. Mater.*, 2017, 29, 1632-40.
11. Anasori Babak, Lukatskaya Maria R., Gogotsi Yury. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nature Reviews Materials*, 2017, vol. 2, Article Number 16098.
12. Karthik Kannan, Kishor Kumar Sadasivuni, Aboubakr M. Abdullah, Bijandra Kumar Current Trends in MXene-Based Nanomaterials for Energy Storage and Conversion System: A Mini Review. *Catalysts*, 2020, 10, 495.

13. Tunca B. et al. Synthesis of MAX Phases in the Zr-Ti-Al C System. *Inorg. Chem.*, 2017, 56, 3489-3498.
14. Maxwell Rigby T.P. et al. Synthesis of new M-layer solid-solution 312 MAX phases $(\text{Ta}_{1-x}\text{Ti}_x)_3\text{AlC}_2$ ($x = 0.4, 0.62, 0.75, 0.91$ or 0.95), and their corresponding MXenes. *RSC Adv.*, 2021, 11, 3110-3114.
15. Geim A.K., Grigorieva I.V. Van der Waals heterostructures. *Nature*, 2013, 499, 419-425.
16. Liu Y., Huang Y., Duan X. Van der Waals integration before and beyond two-dimensional materials. *Nature*, 2019, 567, 323-333.
17. Tunca B. et al. Synthesis of MAX Phases in the Zr-Ti-Al-C System. *Inorg. Chem.*, 2017, 56, 3489-3498.
18. Maxwell T.P. Rigby et al. Synthesis of new M-layer solid-solution 312 MAX phases $(\text{Ta}_x\text{Ti}_{1-x})_3\text{AlC}_2$ ($x = 0.4, 0.62, 0.75, 0.91$ or 0.95), and their corresponding MXenes. *RSC Adv.*, 2021, 11, 3110-3114.
19. Min Yuxiang, Yuan Hao, Wang Wugang, Xu Lai Design of Heterostructures of MXene/Two-Dimensional Organic Frameworks for Na-O₂ Batteries with a New Mechanism and a New Descriptor. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2021, 12, 2742-2748.
20. Konstantina A. Papadopoulou, Alexander Chroneos, David Parfitt, Stavros-Richard G. Christopoulos. A perspective on MXenes: Their synthesis, properties, and recent applications. *J. Appl. Phys.*, 2020, 128, 170902.
21. Jesus Gonzalez-Julian. Processing of MAX phases: From synthesis to applications. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 104, 659-690.
22. Karthik Kannan, Kishor Kumar Sadasivuni, Aboubakr M. Abdullah, Bijandra Kumar. Current Trends in MXene-Based Nanomaterials for Energy Storage and Conversion System: A Mini Review. *Catalysts*, 2020, 10, 495.
23. Ziyu Yao, Huajun Sun, Huiting Sui, Xiaofang Liu. 2D/2D Heterojunction of R-scheme Ti_3C_2 MXene/ MoS_2 Nanosheets for Enhanced Photocatalytic Performance. *Nanoscale Research Letters*, 2020, 15, 78.
24. Pazniak A., Bazhin P., Shchetinin I., Kolesnikov E., Prokopets A., Shplis N., Stolin A., Kuznetsov D. Dense Ti_3AlC_2 based materials obtained by SHS-extrusion and compression methods. *Ceramics International*, 2019, 45, 2020-2027.
25. Bazhin P.M., Stel'makh L.S., Stolin A.M. Vliianie stepeni deformatsii na formirovanie MAKh-fazy v materialakh na osnove Ti-Al-Cpri

SVS-ekstruzii [Influence of the degree of deformation on the formation of the MAX phase in Ti-Al-based materials during SHS extrusion]. *Neorganicheskie materialy*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 330-335.

26. Shtarev D.S., Shtareva A.V., Kevorkyants R., Syuy A.V. Synthesis, characterization, optoelectronic and photocatalytic properties of $\text{Sr}_2\text{Bi}_2\text{O}_5/\text{SrCO}_3$ and $\text{Sr}_3\text{Bi}_2\text{O}_6/\text{SrCO}_3$ heterostructures with varying SrCO_3 content. *Chemosphere*, 2021, 267, 129229. DOI: 10/1016/j.chemosphere, 2020, 129229.

27. Peng Peng, Stosic Dusan, Aitblal Abdelhafid, Vimont Alexandre, Bazin Philippe, Liu Xin-Mei, Yan Zi-Feng, Mintova Svetlana, Travert Arnaud. Unraveling the diffusion properties of zeolite-based multicomponent catalyst by combined gravimetric analysis and IR spectroscopy (AGIR). *ACS Catalysis*, 2020, 10, 6822-6830.

28. Whiting Gareth, Chung Sang-Ho, Stosic Dusan, Dutta Chowdhury Abhishek, Lars I. van der Wal, Fu Donglong, Zecevic Jovana, Travert Arnaud, Houben Klaartje, Baldus Marc, Weckhuysen Bert M. Multiscale Mechanistic Insights of Shaped Catalyst Body Formulations and Their Impact on Catalytic Properties. *ACS Catalysis*, 2019, 9, 4792-4803.

29. Jafari T., Moharrer E., ShiraziAmin A., Miao R., Song W., Suib S.L. Photocatalytic Water Splitting - The Untamed Dream: A Review of Recent Advances. *Molecules*, 2016, 21, 900, pp. 2-29.

30. Go Sahara, Osamu Ishitani. Efficient Photocatalysts for CO_2 Reduction. *Inorg. Chem.*, 2015, 54, 5096-5104.

31. Wooyul Kim, Beth Anne McClure, Eran Edri, Heinz Frei. Coupling carbon dioxide reduction with water oxidation in nanoscale photocatalytic assemblies. *Chem. Soc. Rev.*, 2016. DOI: 10.1039/c6cs00062b

32. Zhixiang Zhang, Zheng Jiang, Wenfeng Shangguan. Low-temperature catalysis for VOCs removal in technology and application: A state-of-the-art review. *Catalysis Today*, 2016, 264, pp. 270-278.

33. Zangeneh H., Zinatizadeh A.A.L., Habibi M., Akia M., Hasnain Isa M. Photocatalytic oxidation of organic dyes and pollutants in wastewater using different modified titanium dioxides: A comparative review. *J. Industr. Engin. Chem.*, 2015, 26, pp. 1-36.

34. Swagata Banerjee, Dionysios D. Dionysiou, Suresh C. Pillai. Self-cleaning applications of TiO_2 by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 176-177, pp. 396-428.

35. Rachel Fagan, Declan E. McCormack, Dionysios D. Dionysiou, Suresh C. Pillai. A review of solar and visible light active TiO₂ photocatalysis for treating bacteria, cyanotoxins and contaminants of emerging concern. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2016, 42, pp. 2-14.
36. Akira Fujishima, Xintong Zhang, Donald A. Tryk. TiO₂ photocatalysis and related surface phenomena. *Surface Science Reports*, 2008, 63, 515-582.
37. Xianghua Li, Jianqiang Wang, Yihe Zhang, Minhua Cao. Efficient visible-light photocatalytic performance of cuprous oxide porous nanosheet arrays. *Materials Research Bulletin*, 2015, 70, pp. 728-734.
38. Scuderi V., Amiard G., Boninelli S., Scalese S., Miritello M., Sberna P.M., Impellizzeri G., Privitera V. Photocatalytic activity of CuO and Cu₂O nanowires. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2016, 42, pp. 89-93.
39. Li Liu, Yuehong Qi, Jinshan Hu, Yinghua Liang, Wenquan Cui. Efficient visible-light photocatalytic hydrogen evolution and enhanced photostability of core@shell Cu₂O@g-C₃N₄ octahedra. *Applied Surface Science*, 2015, 351, pp. 1146-1154.
40. Manan Ahmed, Guo Xinxin. A Review of Metal Oxynitrides for Photocatalysis. *Inorganic Chemistry Frontiers*, pp. 2-30. DOI: 10.1039/C5QI00202H
41. Konstantina A. Papadopoulou, Alexander Chroneos, David Parfitt, Stavros-Richard G. Christopoulos. A perspective on MXenes: Their synthesis, properties, and recent applications. *J. Appl. Phys.*, 2020, 128, 170902.
42. Suellen Battiston, Caroline Rigo, Eric da Cruz Severo, Marcio Antonio Mazutti, Raquel Cristine Kuhn, André Gündel, Edson Luiz Foletto. Synthesis of Zinc Aluminate (ZnAl₂O₄) Spinel and Its Application as Photocatalyst. *Materials Research*, 2014, 17(3), 734-738.
43. Yufeng Yuan, Junjian Huang, Weixia Tu, Simin Huang. Synthesis of uniform ZnGa₂O₄ nanoparticles with high photocatalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 616, pp. 461-467.
44. Koichi Inoue, Satoshi Suzuki, Masayuki Nagai. Ion exchanged potassium titanoniobate as photocatalyst under visible light. *J. Electroceram*, 2010, 24, pp. 110-114.
45. Hossein Farsi, Zahra Barzgari, Seyede Zahra Askari. Sunlight-induced photocatalytic activity of nanostructured calcium tungstate for methylene blue degradation. *Res. Chem. Intermed.*, 2015, 41, pp. 5463-5474.

46. Mineharu Tsukada, Masato Wakamura, Naoya Yoshida, Toshiya Watanabe. Band gap and photocatalytic properties of Ti-substituted hydroxypapatite: Comparison with anatase-TiO₂. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2011, 338, pp. 18-23.

47. Rui Li, Xiaoya Gao, Caimei Fan, Xiaochao Zhang, Yawen Wang, Yunfang Wang. A facile approach for the tunable fabrication of BiOBr photocatalysts with high activity and stability. *Applied Surface Science*, 2015, 355, pp. 1075-1082.

48. Lijun Cheng, Yong Kang. Bi₅O₇I/Bi₂O₃ composite photocatalyst with enhanced visible light photocatalytic activity. *Catalysis Communications*, 2015, 72, pp. 16-19.

49. Xiaoqing Yan, Xiaohui Zhu, Renhong Li, Wenxing Chen. Au/BiOCl heterojunction within mesoporous silica shell as stable plasmonic photocatalyst for efficient organic pollutants decomposition under visible light. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 303, pp. 1-9.

50. Chengyu Yang, Yan Huang, Feng Li, Taohai Li. Onestep synthesis of Bi₂WO₆/TiO₂ heterojunctions with enhanced photocatalytic and superhydrophobic property via hydrothermal method. *J. Mater. Sci.* DOI: 10.1007/s10853-015-9433-y

51. Feng Niu, Da Chen, Laishun Qin, Tong Gao, Ning Zhang, Sen Wang, Zhi Chen, Jiangying Wang, Xingguo Sun, Yuexiang Huang. Synthesis of Pt/BiFeO₃ heterostructured photocatalysts for highly efficient visible-light photocatalytic performances. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 143, pp. 386-396.

52. The synthesis of lanthanide doped BiVO₄ and its enhanced photocatalytic activity. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 211, pp. 25-30.

53. Zilin Ni, Yanjuan Sun, Yuxin Zhang, Fan Dong. Fabrication, modification and application of (BiO)₂CO₃-based photocatalysts: A review. *Applied Surface Science*, 2016, 365, pp. 314-335.

54. Lijun Cheng, Yong Kang. Bi₅O₇I/Bi₂O₃ composite photocatalyst with enhanced visible light photocatalytic activity. *Catalysis Communications*, 2015, 72, pp. 16-19.

55. Chengyu Yang, Yan Huang, Feng Li, Taohai Li. One-step synthesis of Bi₂WO₆/TiO₂ heterojunctions with enhanced photocatalytic and superhydrophobic property via hydrothermal method. *J. Mater. Sci.* DOI: 10.1007/s10853-015-9433-y

56. Xiaoqing Yan, Xiaohui Zhu, Renhong Li, Wenxing Chen. Au/BiOCl heterojunction within mesoporous silica shell as stable plasmonic photocatalyst for efficient organic pollutants decomposition under visible light. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 303, pp. 1-9.
57. Feng Niu, Da Chen n, Laishun Qin n, Tong Gao, Ning Zhang, Sen Wang, Zhi Chen, Jiangying Wang, Xingguo Sun, Yuexiang Huang. Synthesis of Pt/BiFeO₃ heterostructured photocatalysts for highly efficient visible-light photocatalytic performances. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 143, pp. 386-396.
58. Xiaoming Gao, Zihang Wang, Xiang Zhai, Feng Fu, Wenhong Li. The synthesize of lanthanide doped BiVO₄ and its enhanced photocatalytic activity. *Journal of Molecular Liquids*, 2015, 211, pp. 25-30.
59. Yongjiao Wang, Yiming He, Tingting Li, Jun Cai, Mengfei Luo, Leihong Zhao. Photocatalytic degradation of methylene blue on Ca-Bi₆O₁₀/Bi₂O₃ composites under visible light. *Chemical Engineering Journal*, 2012, vol. 189-190, pp. 473-481.
60. Yongjiao Wang, Yiming He, Tingting Li, Jun Cai, Mengfei Luo, Leihong Zhao. Novel CaBi₆O₁₀ photocatalyst for methylene blue degradation under visible light irradiation. *Catal. Communications*, 2012, vol. 18, pp. 161-164.
61. Zhichao Shan, Yujuan Xia, Yuxiang Yang, Hanming Ding, Fuqiang Huang. Preparation and photocatalytic activity of novel efficient photocatalyst Sr₂Bi₂O₅. *Materials Letters*, 2009, vol. 63, no. 1, pp. 75-77.
62. Chun Hu, Xuexiang Hu, Jian Guo, Jiuhui Qu. Efficient Destruction of Pathogenic Bacteria with NiO/SrBi₂O₄ under Visible Light Irradiation. *Envir. Science & Technology*, 2006, vol. 40, no. 17, pp. 5508-5513.
63. Shtarev D.S., Shtareva A.V. Photocatalytic Degradation of the Diesel Fuel by Using the Calcium Bismuthate - Bismuth Oxide Photocatalyst Composition. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 377, pp. 204-208.
64. Scaife D.E. Oxide semiconductors in photoelectrochemical conversion of solar energy. *Solar Energy*, 1980, vol. 25, no. 1, pp. 41-54.
65. Ge Yin, Masami Nishikawa, Yoshio Nosaka, Nagarajan Srinivasan, Daiki Atarashi, Etsuo Sakai, Masahiro Miyauchi. Photocatalytic Carbon Dioxide Reduction by Copper Oxide Nanocluster-Grafted Niobate Nanosheets. *ACS Nano*, 9, 2, 2111-2119.

66. Beata Zielińska, Ewa Borowiak-Palen, Ryszard J. Kalenzuk. Preparation and characterization of lithium niobate as a novel photocatalyst in hydrogen generation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 69, iss. 1, 2008, pp. 236-242.
67. Saito K., Koga K., Kudo A. Lithium niobate nanowires for photocatalytic water splitting. *Dalton Trans.*, 2011, Apr 21; 40(15): 3909-13. DOI: 10.1039/c0dt01844a. Epub 2011 Mar 8
68. Matt Stock. An investigation of the photocatalytic properties of lithium niobate and barium titanate. Ph. D. thesis. Cranfield University, 2012.
69. Babak Anasori, Maria R. Lukatskaya, Yury Gogotsi. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nature Reviews Materials*, 2017, vol. 2, Article Number 16098.
70. Jizhen Zhang et al. Additive-Free MXene Liquid Crystals and Fibers *ACS Cent. Sci.*, 2020, 6, pp. 254-265.
71. Xiaohua Li, Feitian Ran, FanYang, Jun Long, Lu Shao. Advances in MXene Films: Synthesis, Assembly and Applications. *Transactions of Tianjin University*, 2021, 27:217-247.
72. Deobrat Singh et. al. Harnessing the unique properties of MXenes for advanced rechargeable batteries. *J. Phys. Energy*, 2021, 3, 012005.
73. Nghe My Tran, Qui Thanh Hoai Ta, Jin-Seo Noh. Unusual synthesis of safflower-shaped $\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2$ heterostructures initiated from two-dimensional Ti_3C_2 MXene. *Applied Surface Science*, 2021, 538, 148023.
74. Babak Anasori, Yu Xie, Majid Beidaghi, Jun Lu, Brian C. Hosler, Lars Hultman, Paul R. C. Kent, Yury Gogotsi, Michel W. Barsoum. Two-Dimensional, Ordered, Double Transition Metals Carbides (MXenes). *ACS Nano*, 2015, vol. 9, no. 10, pp. 9507-9516.
75. Philip A. Maughan, Luc Bouscarrat, Valerie R. Seymour, Shouqi Shao, Sarah J. Haigh, Richard Dawson, Nuria Tapia-Ruiz, Nuno Bimbo. Pillared Mo_2TiC_2 MXene for high-power and long-life lithium and sodium-ion batteries. *Nanoscale Adv.*, 2021, 3, 3145.

Сведения об авторе

СЮЙ Александр Вячеславович

e-mail: *alsyuy271@gmail.com*

Ведущий научный сотрудник Центра фотоники и двумерных материалов, Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет)

About the author

SYUY Alexander Vyacheslavovich

e-mail: *alsyuy271@gmail.com*

Leading Researcher, Center for Photonics and 2D Materials, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора: 100 %.

Получена: 16.01.2023

Одобрена: 22.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Conflict of Interest: The author declare no conflict of interest.

Author Contributions: Author have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 16/01/2023

Approved: 22/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Суй, А.В. Новые гетероструктуры на основе максенов для сбора солнечной энергии / А.В. Суй // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 92–115.

Please cite this article in English as: Syuy A.V. New maxen-based heterostructures for solar energy harvesting // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 92-115.

УДК 621.372.082.5

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.07

Д.Г. Гилев^{1,2}¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия²Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Исследовался волоконно-оптический резонатор (РВО), применяемый в качестве чувствительного элемента датчика угловой скорости. Приведены измеренные рабочие параметры РВО, и найдена зависимость смещения резонансной частоты от угловой скорости. Разработанный макет позволил измерить минимальную чувствительность к угловой скорости данного резонатора и провести оценку максимального диапазона измерения. Оценка диапазона измерения угловой скорости дает значения от минус 600 000 °/с до минус 10 °/с и от 10 °/с до 600 000 °/с.

Ключевые слова: волоконно-оптический резонатор, гироскоп, датчик угловой скорости, эффект Саньяка.

D.G. Gilev¹Perm National Research Polytechnic university, Perm, Russia²Perm Research and Production Instrument-Making company, Perm, Russia

ESTIMATION OF THE DYNAMIC RANGE OF THE ANGULAR VELOCITY SENSOR BASED ON A FIBER-OPTIC RESONATOR

In the work, a fiber-optic resonator (FOR) was studied, which is used as a sensitive element of the angular velocity sensor. The measured operating parameters of the RVO are given and the dependence of the resonant frequency shift on the angular velocity is found. The developed layout made it possible to measure the minimum sensitivity to the angular velocity of this resonator and to evaluate the maximum measurement range. An estimate of the angular velocity measurement range gives values from minus 600,000 °/s to minus 10 °/s and from 10 °/s to 600,000 °/s.

Keywords: fiber optic resonator, gyroscope, angular velocity sensor, Sagnac effect.

Введение

Оптические резонаторы представляют собой систему из нескольких отражающих элементов, например, полость с двумя частично пропускающими зеркалами (интерферометр Фабри–Перо), резонаторы

с модами шепчущей галереи (РМШГ), волоконно-оптические резонаторы (РВО) и кольцевые интегрально-оптические резонаторы (КИОР).

Такие резонаторы находят применение в самых различных областях науки и техники: в лазерной технике для стабилизации частоты излучения [1], в метрологии для сверхточного измерения перемещений [2], в спектроскопии для измерения концентрации различных веществ [3], в биофизике для определения наличия патогенов [4], в качестве неклассических источников фотонов [5], датчиков температуры [6], оптоэлектронных генераторов [7] и т.д.

Особый интерес представляет применение резонаторов в качестве чувствительного элемента (ЧЭ) гироскопов для целей воздушной и морской навигации, а именно для измерения угловой скорости и угла поворота технических систем [8–10]. В настоящее время в навигации применяются несколько видов гироскопов: кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ), волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), гироскоп на основе микро-электромеханических систем (МЭМС), твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) и динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ).

Уменьшение размера данных гироскопов (ВОГ и КЛГ) возможно только за счет уменьшения объема волоконного и лазерного контура, что приводит к увеличению потерь и снижению чувствительности.

МЭМС-гироскопы и ДНГ являются малогабаритными и относительно дешевыми устройствами, однако обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение: высокую шумовую составляющую из-за недостатков конструкции [13], высокую чувствительность к ускорению, ударам и вибрациям [14]. В настоящее время на российском рынке не представлены МЭМС выше средней точности из-за санкционных ограничений.

ТВГ обладают высокой точностью измерения и малыми массогабаритными параметрами. Основной недостаток ТВГ – ограниченный динамический диапазон (динамический диапазон высокоточных ТВГ составляет менее ± 30 °/с) и необходимость прецизионного изготовления комплектующих [15].

ПАО «ПНППК» ведет разработку миниатюрного резонансного оптического гироскопа (МРОГ), который будет обладать весовыми и габаритными параметрами, меньшими, чем у ВОГ и КЛГ, и будет более стойким к механическим воздействиям, чем МЭМС-гироскопы и

ДНГ. По сравнению с ТВГ он обладает меньшим энергопотреблением и большим динамическим диапазоном. Теоретически достижимая точность МРОГ относится к высокому классу точности гироскопов (менее $1^\circ/\text{ч}$).

В качестве возможного претендента на роль ЧЭ таких гироскопов нами предлагается волоконно-оптический резонатор. В работе рассматривается математическое описание оптических резонаторов и их рабочих параметров, а также сравнение изготовленных чувствительных элементов между собой.

1. Оптический кольцевой резонатор и его рабочие параметры

В общем случае оптический кольцевой резонатор (ОКР) состоит из области связи и замкнутого резонансного контура. ОКР в общем случае состоит из двух прямых волноводных каналов, двух областей связи и замкнутого оптического контура. Схема ОКР представлена на рис. 1.

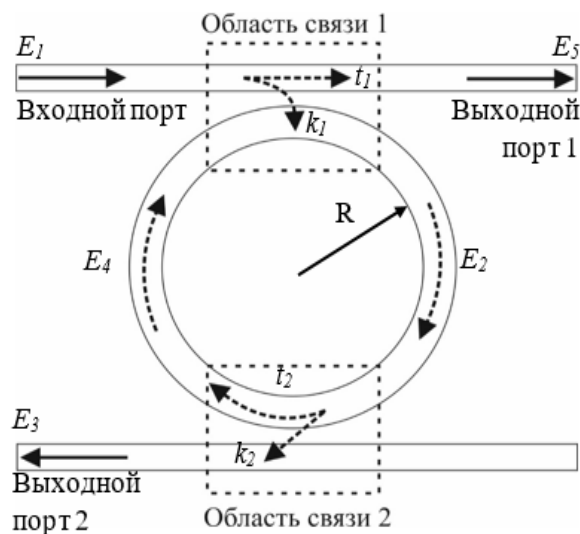


Рис. 1. Схема ОКР: E_n – распространяющиеся электромагнитные волны ($n = 1, 2, 3, 4, 5$), R – радиус кольца, k_1 – коэффициент связи в первой области связи, t_1 – коэффициент прохождения в первой области связи, k_2 – коэффициент связи во второй области связи, t_2 – коэффициент прохождения во второй области связи

Внутри области связи происходит интерференция сигналов. Резонанс наблюдается на определенной длине волны, при которой целое число длин волн укладывается по длине резонансного контура.

В случае, когда на вход резонатора подается широкополосный оптический сигнал, резонатор действует как оптический фильтр. Спектральное распределение выходного сигнала и сигнала внутри резонатора показано на рис. 2. Максимальной интенсивности I соответствует резонансная длина волны (λ_{res}).

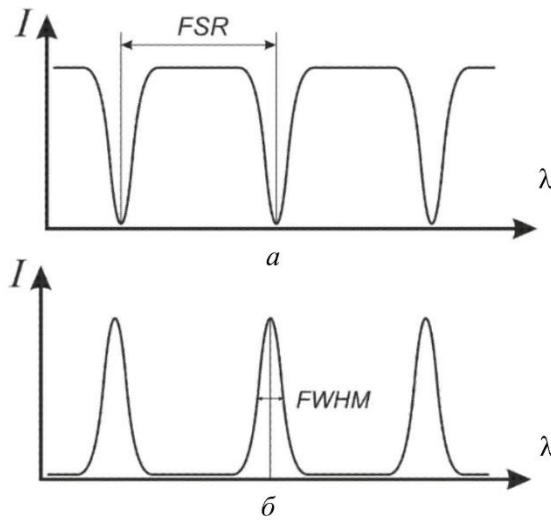


Рис. 2. Спектры ОКР: a – спектральное распределение выходного сигнала; b – спектральное распределение сигнала внутри резонатора; I – интенсивность, λ – длина волны, $FWHM$ (Full width at half maximum) – ширина резонансного пика на полувывоте, FSR (Free Spectral Range) – свободный спектральный диапазон

Выделяют несколько рабочих параметров резонатора – FSR , $FWHM$, Q -factor.

FSR (Free Spectral Range) – свободный спектральный диапазон, который является разностью между резонансными частотами [16]. $FWHM$ (Full Width at Half Maximum) – ширина спектра на уровне минус 3 дБ резонансного выреза от максимального значения интенсивности, соответствующего уровню 0 дБ. Q -factor, или добротность резонатора пропорциональна полной энергии внутри резонатора, деленной на энергию, потерянную за один проход оптического излучения по замкнутому контуру.

Внешние факторы, такие как температура, давление, изменение состава вещества, окружающего оптический контур, вызывают изменение эффективного показателя преломления материала резонатора, что приводит к изменению длины оптического пути и смещению резонансных частот пропорционально «силе» внешнего воздействия.

В случае высокой добротности резонатора уменьшается ширина резонансного пика кольцевого оптического контура. Малое значение FWHM приводит к более резкому скату резонансной кривой, так что даже малое воздействие на резонатор какого-либо из факторов (температура, давление, изменение состава вещества, вращение) будет отражаться на мощности детектируемого сигнала в достаточной степени для детектирования физического воздействия. В случае низкой добротности ($Q < 10^5$) будет наблюдаться малое изменение интенсивности, которое может быть не зафиксировано детектором.

Таким образом, значение добротности определяет чувствительность ОКР к внешним воздействиям, на основе которого может быть разработан оптический гироскоп.

Эффект Саньяка в оптическом резонаторе

Измерение угловой скорости в ОКР возможно благодаря эффекту Саньяка. Данный эффект проявляется в изменении оптического пути в большую или меньшую сторону в зависимости от направления распространения оптического сигнала в кольцевом резонаторе и направления вращения резонатора. Изменение оптического пути ведет к появлению фазового смещения $\Delta\varphi$ между двумя сигналами, с противоположным распространением (по часовой стрелке и против часовой стрелки). Данное смещение описывается следующей формулой [11]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot L \cdot D}{\lambda \cdot c} \cdot \Omega, \quad (1)$$

где D – диаметр контура, Ω – угловая скорость вращения.

В случае, когда мы рассматриваем одно направление, фазовое смещение составит половину от $\Delta\varphi$. Обозначим данное смещение как φ_s . При вращении резонатора резонансное условие остается справедливым для смещенной фазы:

$$\varphi' = \varphi + \varphi_s = 2\pi \cdot m', \quad (2)$$

где m' – целое число.

Новой фазе φ' внутри кольцевого резонатора соответствует новая резонансная частота. Можно выразить смещение резонансной частоты относительно покоящегося состояния:

$$\Delta f_0 = \frac{c}{2\pi \cdot n_{\text{eff}} \cdot L} \cdot (\varphi' - \varphi) = \frac{c}{2\pi \cdot n_{\text{eff}} \cdot L} \cdot \varphi_s = \frac{R}{n_{\text{eff}} \cdot \lambda} \cdot \Omega. \quad (3)$$

Следовательно, смещение Δf_s между резонансными частотами двух противоположно распространяющихся волн определяется по формуле:

$$\Delta f_s = \frac{2 \cdot R}{n_{\text{eff}} \cdot \lambda} \cdot \Omega. \quad (4)$$

Таким образом, измерение смещения резонансных частот двух противоположно распространяющихся волн Δf_s позволяет определять угловую скорость вращения объекта, на который прикреплен кольцевой резонатор.

Применение РВО в качестве чувствительного элемента гироскопа рассматривается в работах [17 – 23]. Например, в работе [18] применяется резонатор диаметром 0,15 м, длиной контура 15,7 м и шириной резонансного пика 437 кГц, соответствующая добротность равна $4 \cdot 10^8$. Точность экспериментального образца гироскопа на волоконно-оптическом резонаторе составила 1,1 °/ч.

Исследование волоконно-оптического резонатора в качестве чувствительного элемента

На ПАО «ПНППК» изготовлен кольцевой волоконно-оптический резонатор сваркой двух оптических разветвителей. Добротность волоконно-оптических резонаторов находится в пределах от 10^6 до 10^8 . Фото изготовленного резонатора изображено на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид изготовленного РВО

Измерение рабочих характеристик РВО проводится методом сканирующего узкополосного лазера, который линейно меняет рабочую частоту излучения с течением времени. Также данный метод может быть улучшен с помощью применения дополнительного интерферометра в оптической схеме для учета нелинейности перестройки лазера [24, 25]. Метод был применен в исследованиях наведенного двулучепреломления в волоконно-оптических резонаторах [26, 27].

В результате на выходе оптического резонатора наблюдается изменение мощности во временном диапазоне. Осциллограммы измерения резонансной кривой приведены на рис. 4.

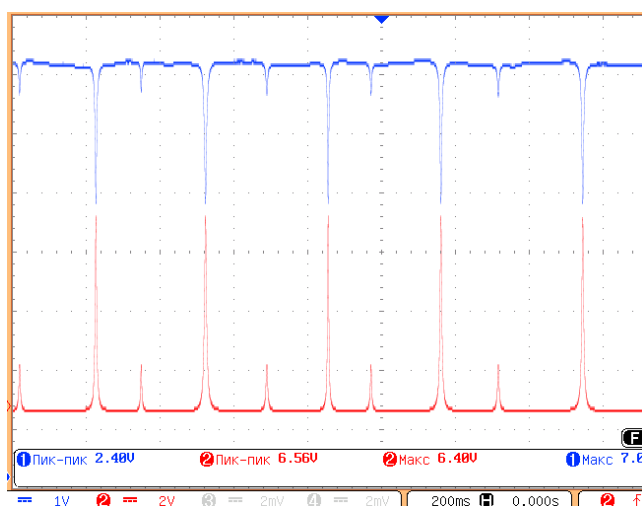


Рис. 4. Спектральное распределение РВО, получаемое с осциллографа

По полученным спектральным распределениям были получены рабочие характеристики РВО, которые приведены в таблице.

Рабочие характеристики РВО

Наименование параметра	Значение параметра
Длина контура, L , м	1,69 м
FSR, МГц	147
FWHM, МГц	6,65
Добротность, Q	$2,9 \cdot 10^7$
Тип волокна	SM-15-PS-U25D
Материал компаунда (заливки)	ЭЛК-5

Для данного резонатора было проведено исследование чувствительности к угловой скорости в диапазоне от 1000 до минус 1000 °/с (рис. 5).

В данном диапазоне угловых скоростей наблюдается линейная зависимость разницы резонансных частот от угловой скорости вращения, что подтверждает полученную теоретическую зависимость (1). Минимальная чувствительность к угловой скорости находится в зоне от 10 до минус 10 °/с.

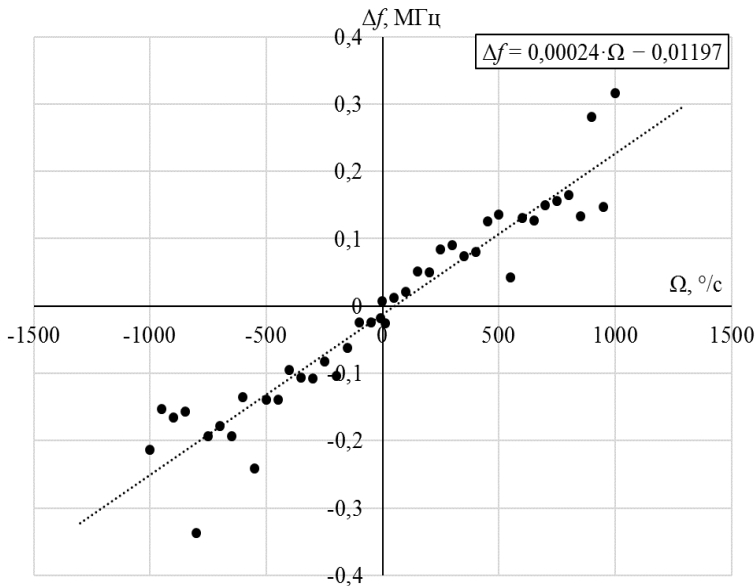


Рис. 5. Линейная зависимость разницы резонансных частот от угловой скорости вращения

С помощью полученной зависимости можно провести оценку максимально измеряемой угловой скорости. В данном случае мы сможем зафиксировать смещение до следующего резонансного пика, т.е. на величину, равную FSR резонатора. Подставим значение FSR в полученное значение линейной зависимости смещения резонансной частоты от угловой скорости:

$$\begin{aligned} \Omega &= \pm \frac{\Delta f}{0,00024 \text{ МГц}/^\circ/\text{с}} \approx \pm \frac{\text{FSR}}{0,00024 \text{ МГц}/^\circ/\text{с}} \approx \\ &\approx \pm \frac{147 \text{ МГц}}{0,00024 \text{ МГц}/^\circ/\text{с}} \approx \pm 600000^\circ/\text{с}. \end{aligned}$$

Таким образом, диапазон измерения угловой скорости для данного волоконно-оптического резонатора составляет от минус 600 000 до минус 10 °/с и от 10 до 600 000 °/с.

Заключение

МРОГ является следующим шагом развития в области оптической гироскопии, так как он позволяет решить проблему ВОГ и КЛГ, для которых уменьшение объема ЧЭ приводит к снижению чувствительности к угловой скорости вращения. В качестве чувствительного элемента в данной работе применялся волоконно-оптический резонатор, изготовленный из оптических делителей.

В работе приведены измеренные рабочие параметры РВО и дан вывод зависимости смещения резонансной частоты от угловой скорости.

Разработанный макет позволил измерить минимальную чувствительность к угловой скорости данного резонатора и провести оценку максимального диапазона измерения. Таким образом, диапазон измерения угловой скорости составляет от минус 600 000 до минус 10 °/с и от 10 до 600 000 °/с.

Список литературы

1. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator / R.W.P. Drever [et al.] // *Applied Physics B*. – 1983. – Т. 31. – №. 2. – С. 97–105.
2. Zhou X., Yu Q. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry–Perot interferometer for subnanometer measurement // *IEEE sensors journal*. – 2010. – Т. 11. – №. 7. – С. 1602–1606.
3. Coddington Ian, Newbury Nathan, Swann William. Dual-comb spectroscopy // *Optica*. – 2016. – 3. – 414–426.
4. Fully room temperature and label free biosensing based on an ink-jet printed polymer microdisk laser / Abdul Nasir, Yuaya Mikami, Rui Yatabe, Hiroaki Yoshioka, Nilesh vasa, Yuji Oki // *Opt. Mater. Express*. – 2011. – Vol. 11. – P. 592–602.
5. On-chip photon-pair generation in a silica microtoroidal cavity / Yosuke Hashimoto, Akihisa Goban, Yuki Hirabayashi, Yuta Kobayashi, Tomohiro Araki, Takao Aoki // *Opt. Express*. – 2021. – Vol. 29. – P. 3533–3542.

6. Губайдуллин Р.Р. Радиофотонная система контроля температуры топливных ячеек электрических транспортных средств на основе адресных волоконных брэгговских структур с двумя фазовыми π -сдвигами // Прикладная фотоника. – 2019. – Т. 6. – №. 3–4. – С. 193–202.
7. Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: overall system optimization and phase noise reduction / K. Saleh [et al.] // 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. – IEEE. – 2012. – С. 1–6.
8. Li J., Suh M.G., Vahala K. Microresonator Brillouin gyroscope // Optica. – 2017. – Т. 4. – №. 3. – С. 346–348.
9. Resonant micro-optical gyro based on self-injection locking / Jingtong Geng, Liu Yang, Shuhua Zhao, Yonggang Zhang // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28. – P. 32907–32915.
10. Вьюжанина Е.А., Криштоп В.В. Дисковые резонаторы для датчиков угловой скорости // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – Т. 63. – №. 9. – С. 823–829.
11. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. – Artech house, 2014.
12. Stedman G.E. Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics // Reports on progress in physics. – 1997. – Т. 60. – №. 6. – С. 615.
13. Advances in gyroscope technologies / M.N. Armenise [et al.]. – Springer Science & Business Media, 2010.
14. Королёв М.Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости. – 2019.
15. Бонштедт А.В., Кузьмин С.В., Мачехин П.К. Восьмиточечная модель твердотельного волнового гироскопа // Вестник Удмурт. ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2007. – №. 1. – С. 135–214.
16. Menéndez R.J.P. Fiber-Optic Ring Resonator Interferometer // Interferometry-Recent Developments and Contemporary Applications. – IntechOpen, 2018.
17. Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator / H. Ma [et al.] // Optics letters. – 2015. – Т. 40. – №. 24. – С. 5862–5865.
18. Suppression of frequency locking noise in resonator fiber optic gyro by differential detection method / L. Feng [et al.] // Optics & Laser Technology. – 2014. – Т. 62. – С. 109–114.

19. Compensation of scale factor nonlinearity in resonator fiber optic gyro / Y. Zhi [et al.] // *Optical Engineering*. – 2014. – Т. 53. – №. 12. – С. 127108.

20. A Prototype for a Passive Resonant Interferometric Fiber Optic Gyroscope with a 3×3 Directional Coupler / K.A. Ovchinnikov [et al.] // *Sensors*. – 2023. – Т. 23. – №. 3. – С. 1319.

21. Experimental Investigation of an Optical Resonator Gyroscope with a Mach–Zehnder Modulator and Its Sensitive Elements / Y.V. Filatov [et al.] // *Photonics*. – MDPI. – 2022. – Т. 10. – №. 1. – С. 4.

22. Характеристики различных чувствительных элементов миниатюрного резонансного оптического гироскопа / Д.Г. Гилев, А.А. Журавлёв, Д.Н. Москалёв, А.А. Чувызгалов, В.В. Криштоп // *Оптический журнал*. – 2022. – Т. 89. – № 4. – С. 59–69.

23. Gilev D.G., Krishtop V.V. Using Methods for Processing the Resonant Peak to Increase the Sensitivity of the Angular Rate Sensor // 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE. – 2022. – С. 1–2.

24. П.М. Валюшина, К.А. Овчинников, Д.Г. Гилев. Измерение характеристик волоконно-оптического резонатора методом перестройки центральной частоты лазера // *Прикладная фотоника*. – 2021. – Т. 8 (2). – С. 19–32.

25. Fiber Optic Resonators for Angular Rate Sensors / D.G. Gilev [et al.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2022. – Т. 86. – №. 1. – С. S75–S80.

26. Determination of induced birefringence in a fiber-optic resonator from the frequency difference between main and additional resonance peaks / D.G. Gilev [et al.] // *Optics Continuum*. – 2022. – Т. 1. – №. 3. – С. 487–493.

27. Валюшина П.М., Гилев Д.Г. Модель волоконно-оптического резонатора из одномодового волокна с учетом эффекта двулучепреломления // *Фотон-экспресс*. – 2021. – №. 6. – С. 367–368.

References

1. Drever R.W.P. et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Applied Physics B*, 1983, vol. 31, no. 2, pp. 97-105.

2. Zhou X., Yu Q. Wide-range displacement sensor based on fiber-optic Fabry–Perot interferometer for subnanometer measurement. *IEEE sensors journal*, 2010, vol. 11, no. 7, pp. 1602-1606.
3. Ian Coddington, Nathan Newbury, and William Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica* 3, 414-426 (2016).
4. Abdul Nasir, Yuaya Mikami, Rui Yatabe, Hiroaki Yoshioka, Nilesh vasa, Yuji Oki Fully room temperature and label free biosensing based on an ink-jet printed polymer microdisk laser. *Opt. Mater. Express*, 2011, Vol. 11, pp. 592-602.
5. Yosuke Hashimoto, Akihisa Goban, Yuki Hirabayashi, Yuta Kobayashi, Tomohiro Araki, Takao Aoki. On-chip photon-pair generation in a silica microtoroidal cavity. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 3533-3542.
6. Gubaidullin R.R. Radiofotonnaia sistema kontrolya temperatury toplivnykh iacheek elektricheskikh transportnykh sredstv na osnove adresnykh volokonnykh breggovskikh struktur s dvumia fazovymi π -sdvigami [Radiophotonic system for temperature control of fuel cells of electric vehicles based on addressable fiber Bragg structures with two phase π -shifts]. *Applied photonics*, 2019, vol. 6, no. 3-4, pp. 193-202.
7. Saleh K. et al. Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: overall system optimization and phase noise reduction. *2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings*. IEEE, 2012, pp. 1-6.
8. Li J., Suh M.G., Vahala K. Microresonator Brillouin gyroscope. *Optica*, 2017, vol. 4, no. 3, pp. 346-348.
9. Jingtong Geng, Liu Yang, Shuhua Zhao, Yonggang Zhang. Resonant micro-optical gyro based on self-injection locking. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, pp. 32907-32915.
10. V'iuzhanina E.A., Krishtop V.V. Diskovye rezonatory dlia datchikov uglovoi skorosti [Disc resonators for angular rate sensors]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2020, vol. 63, no. 9, pp. 823-829.
11. Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. Artech house, 2014.
12. Stedman G.E. Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics. *Reports on progress in physics*, 1997, vol. 60, no. 6, 615 p.
13. Armenise M.N. et al. Advances in gyroscope technologies. Springer Science & Business Media, 2010.
14. Korolev M.N. Issledovanie tekhnicheskikh kharakteristik sovremennykh tipov datchikov uglovoi skorosti [Study of the technical charac-

teristics of modern types of angular velocity sensors]. *12-ia Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Priborostroenie - 2019"*. Tula: Tul'skii gosudarstvennyi universitet, 2019, pp. 21-23.

15. Bonshtedt A.V., Kuz'min S.V., Machekhin P.K. Vos'mitocheknaia model' tverdotel'nogo volnovogo giroskopa [Eight-point model of a solid-state wave gyroscope]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye nauki*, 2007, no. 1, pp. 135-214.

16. Menéndez R.J.P. Fiber-Optic Ring Resonator Interferometer. *Interferometry-Recent Developments and Contemporary Applications*. IntechOpen, 2018.

17. Ma H. et al. Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator. *Optics letters*, 2015, vol. 40, no. 24, pp. 5862-5865.

18. Feng L. et al. Suppression of frequency locking noise in resonator fiber optic gyro by differential detection method. *Optics & Laser Technology*, 2014, vol. 62, pp. 109-114.

19. Zhi Y. et al. Compensation of scale factor nonlinearity in resonator fiber optic gyro. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 12, 127108 p.

20. Ovchinnikov K.A. et al. A Prototype for a Passive Resonant Interferometric Fiber Optic Gyroscope with a 3×3 Directional Coupler. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 3, 1319 p.

21. Filatov Y.V. et al. Experimental Investigation of an Optical Resonator Gyroscope with a Mach-Zehnder Modulator and Its Sensitive Elements. *Photonics*. MDPI, 2022, vol. 10, no. 1, 4 p.

22. Gilev D.G., Zhuravlev A.A., Moskalev D.N., Chuvyrgyzalov A.A., Krishtop V.V. Kharakteristiki razlichnykh chuvstvitel'nykh elementov miniatiurnogo rezonansnogo opticheskogo giroskopa [Characteristics of various sensing elements of a miniature resonant optical gyroscope]. *Opticheskii zhurnal*, 2022, vol. 89, no. 4, pp. 59-69.

23. Gilev D.G., Krishtop V.V. Using Methods for Processing the Resonant Peak to Increase the Sensitivity of the Angular Rate Sensor. *2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2022, pp. 1-2.

24. Valiushina P.M., K.A. Ovchinnikov, D.G. Gilev. Izmerenie kharakteristik volokonno-opticheskogo rezonatora metodom perestroiki tsentral'noi chastoty lazera [Measurement of the characteristics of a fiber optic

resonator by tuning the center frequency of the laser]. *Applied photonics*, 2021, vol. 8 (2), pp. 19-32.

25. Gilev D.G. et al. Fiber Optic Resonators for Angular Rate Sensors. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. S75-S80.

26. Gilev D.G. et al. Determination of induced birefringence in a fiber-optic resonator from the frequency difference between main and additional resonance peaks. *Optics Continuum*, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 487-493.

27. Valiushina P.M., Gilev D.G. Model' volokonno-opticheskogo rezonatora iz odnomodovogo volokna s uchetom effekta dvulucheprelomleniia [Model of a fiber-optic resonator from a single-mode fiber with allowance for the effect of birefringence]. *Foton-ekspress*, 2021, no. 6, pp. 367-368.

Сведения об авторах

ГИЛЕВ Даниил Георгиевич
e-mail: GilevDG@pnppk.ru

Ведущий инженер-исследователь НИИ радиофотоники и оптоэлектроники, Пермская научно-производственная приборостроительная компания; Пермский государственный национальный исследовательский университет (г. Пермь, Россия)

About the authors

GILEV Daniil Georgievich
e-mail: GilevDG@pnppk.ru

Leading Research Engineer, Research Institute of Radiophotonics and Optoelectronics, Perm Research and Production Instrument-Making Company; Perm State National Research University (Perm, Russia)

Финансирование: данная работа выполнена в рамках Программы государственной поддержки компаний-лидеров, разрабатывающих и обеспечивающих внедрение продуктов, сервисов и платформенных решений преимущественно на основе технологий и решений для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы (договор № 2/549/2020 от 23.07.2020 г).

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора: 100 %.

Получена: 18.01.2023

Одобрена: 24.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Financing: this work was carried out within the framework of the State Support Program for Leading Companies that develop and implement products,

services and platform solutions mainly based on technologies and solutions for the digital transformation of priority sectors of the economy and the social sphere (contract No. 2/549/2020 dated July 23, 2020).

Conflict of Interest: The author declare no conflict of interest.

Author Contributions: Author have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 18/01/2023

Approved: 24/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Гилев, Д.Г. Оценка динамического диапазона датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического резонатора / Д.Г. Гилев // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 116–130.

Please cite this article in English as: Gilev D.G. Estimation of the dynamic range of the angular velocity sensor based on a fiber-optic resonator // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 116-130.

УДК 621.373.826:315.61 004.056.53

DOI: 10.15593/2411-4375/2023.1.08

И.В. Денисов, Н.В. Лисовский

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ К ИЗГИБУ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Представлены результаты системного анализа существующих рекомендаций по волоконным световодам. Проведена систематизация физических параметров и эксплуатационных характеристик стандартизированных волоконных световодов. Выделены четыре информативных параметра для оценки влияния изгибов волоконных световодов на качество ВОЛС и волоконно-оптические датчики. Цель работы – систематизация рекомендаций МСЭ-Т и МЭК, а также оценка влияния изгибов на рассмотренные типы волоконных световодов с точки зрения качества линий связи и волоконно-оптических датчиков физических величин.

Ключевые слова: стандарт МСЭ-Т, стандарт МЭК, волоконно-оптические линии связи, волоконный световод, изгибы волокна, волоконно-оптические датчики.

I.V. Denisov, N.V. Lisovsky

I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

THE SYSTEMATIZATION OF BENDING-SENSITIVE FIBER LIGHT GUIDES

The results of systematic analysis of existing recommendations on fiber light guides. The systematization of physical parameters and operational characteristics of standardized fiber light guides has been carried out. Four informative parameters have been identified to assess the effect of fiber bends on the quality of fiber optic sensors. The purpose of the work is systematization of the ITU-T and IEC recommendations, as well as to assess the influence of bends on the fiber types in terms of the quality of communication lines and fiber-optic sensors of physical quantities.

Keywords: optical fiber, fiber-optical communication lines, macrobending, bending radius, ITU-T, information capture efficiency, fiber-optic sensors.

Актуальность темы

Самой эффективной и быстроразвивающейся средой передачи данных являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Локальные вычислительные сети (ЛВС), построенные на ВОЛС, имеют неоспоримые преимущества по скорости, плотности и расстояниям передачи информации перед медными и радиоканальными линиями связи. Эти преимущества определяются физическими возможностями

волоконных световодов (ВС), которые являются их основой. Преимущества ВОЛС мотивируют разработку новых кабельных структур с улучшенными эксплуатационными характеристиками и последующим внедрением их в повседневную жизнь. В настоящий момент на телекоммуникационном рынке присутствует множество ВС с различными физическими характеристиками, определяющими их широкие эксплуатационные возможности. В связи с таким многообразием возникла необходимость стандартизации и классификации ВС, которая необходима проектировщикам, поставщикам и потребителям кабельных инфраструктур для подбора совместимого оборудования и определения рамок модернизации оборудования и разработки новых кабельных продуктов. После введения сектора стандартизации Международного союза электросвязи (МСЭ-Т) с 1984 г. начали разрабатываться рекомендации для создаваемых ВС (первый – для G.652.A, а последний введен в 2020 г. году для G.654.E).

Стандарты вводятся для основных параметров ВС, благодаря чему телекоммуникационному оборудованию гарантируется взаимная совместимость, а производителям ВС и волоконно-оптических кабелей (ВОК) на их основе определяются рамки для модернизации оборудования и разработки новых кабельных продуктов. Однако МСЭ-Т – не единственная организация, которая классифицирует ВС по их назначению и характеристикам. Есть стандарт ИЕС 60793, разработанный Международной электротехнической комиссией (МЭК), или на английском: International Electrotechnical Commission (IEC). Русский действующий аналог с подобными параметрами – ГОСТ Р МЭК 60793.

При всем таком разнообразии стандартов ВС не все параметры в них пересекаются и транслируются из одного в другой. Более того, как выяснилось в результате поиска и системного анализа информации по ВС и ВОК, они не систематизированы вместе.

С учетом того, что настоящей задачей является выделение информативных признаков, значимых для распространения оптического излучения в ВС, а также оценки потенциальных возможностей кабельной продукции по мощности оптического излучения при изгибах для его учета при разработке различных устройств фотоники, основанных на изгибных эффектах в ВС, важно понимать: каким образом необходимо нормировать параметры, используемые МСЭ-Т и МЭК, и каких значений в них недостает для понимания возможностей

ВОК. К указанным устройствам можно отнести две крайние группы. Первая – это волоконно-оптические датчики физических величин, в принципе действия которых используются модовые потери оптического излучения в ВС при его макро- или микроизгибах [1]. Вторая – ВОЛС, в которых, наоборот, стремятся минимизировать потери на изгибах ВС [2]. В обеих группах, в зависимости от задач, могут применяться как одномодовые, так и многомодовые ВС.

Таким образом видно, что анализ всех стандартов ВС и систематизация рекомендаций для них по параметрам, связанным с изгибами ВС для всех стандартов, являются актуальной задачей, решаемой в настоящей статье.

1. Нормировка стандартов ВС

При всем разнообразии стандартов ВС не все параметры в них пересекаются и транслируются из одного в другой. Более того, как выяснилось в результате поиска и анализа информации по ВС и ВОК, они не систематизированы вместе. С учетом того, что настоящей задачей является выделение информативных признаков, значимых для создания устройств фотоники на основе влияния изгибов на оптическое излучение в ВС, важно понимать, по каким параметрам необходимо их нормировать и каких значений в них недостает.

В первой рекомендации МСЭ-Т G.651.1 ВС являются многомодовыми, а все остальные ВС, представленные в табл. 1, – одномодовые.

Таблица 1

Классификация ВС в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т*

№ п/п	Наименование категории ВС	ВС с диаметром сердцевины	Применение
1	2	3	4
1	G.651.1	50 мкм с градиентным профилем показателя преломления	Для широкополосного доступа в сетях зданий
2	G.652 (A, B, C, D)	8,6 – 9,5 мкм на длину волны 1310 нм со ступенчатым профилем показателя преломления и несмещенной дисперсией	LAN и MAN, сети доступа и передача при мультиплексировании CWDM
3	G.653 (A, B)	7,8 – 8,5 мкм с длиной волны нулевой дисперсии, смещенной в область 1550 нм, и со специально заданным распределением показателя преломления	Системы передачи на большие расстояния с использованием волоконно-оптических усилителей на основе эрбия (EDFA)

Окончание табл. 1

1	2	3	4
4	G.654 (A, B, C, D, E)	9,5 – 15 мкм с длиной волны нулевой дисперсии около 1310 нм и со смещением отсечки в 1550 нм	Подводные системы с более высокой пропускной способностью
5	G.655 (A, B, C, D, E)	NZDSF 8 – 11 мкм, оптимизировано для 1530–1565 нм с поддержкой до 1652 и 1460 нм	Системы дальней связи, использующие плотную передачу данных (DWDM)
6	G.656	7,0 – 11,0 мкм с ненулевой дисперсией и положительным коэффициентом хроматической дисперсии в диапазоне длин волн 1460–1625 нм	Системы дальней связи, использующие передачу CWDM и DWDM в указанном диапазоне длин волн
7	G.657 (A1, A2, B2, B3)	8,6 – 9,2 мкм с уменьшенными потерями при малых радиусах изгиба	Волоконно-оптические сети до границы жилой площади (FTTH)

*Примечание. В табл. 1 применены следующие сокращения:

локальные сети – Local Area Network (LAN);

городская вычислительная сеть – Metropolitan Area Network (MAN);

системы с разносом более 2,5 THz – Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM);

волоконно-оптический усилитель на основе эрбия – Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA);

плотное волновое мультиплексирование – Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM);

ВС с ненулевой смещенной дисперсией – Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF);

волоконно-оптические сети – Fiber To The Home (FTTH).

Российский стандарт ГОСТ Р МЭК 60793 в связи с обширностью информации разделен на несколько частей подобно тому, как это сделано в стандарте IEC 60793. Первая часть описывает методы испытаний ВС, вторая – различные его типы. Каждая из частей, в свою очередь, тоже поделена на несколько документов. В результате вид ссылки на отдельный документ стандарта выглядит, например, как IEC 60793-2-60.

В ходе анализа классификационных признаков выявлено, что МСЭ-Т и МЭК в своих данных ссылаются на одни и те же ВС, имеющие одинаковые характеристики, но разные названия. С целью

избегания плеоназма в табл. 2 впервые системно приведено соответствие рекомендаций МСЭ-Т и стандарта IEC 60793 для всех существующих на настоящий момент 22 типов ВС. В качестве общей нормировочной характеристики для сравнительного анализа ВС удобно использовать общий у всех параметр – диаметр модового поля MFD (Mode Field Diameter). Он определяется как часть ВС в поперечном срезе, где передаётся большая часть энергии оптического излучения на определенной длине волны λ . Указанные для ВС длины волн рекомендуются как основные несущие, но не являются ограничивающими. MFD и другие параметры ВС имеют особенности, рассматриваемые ниже. Для понимания волноводных особенностей рассматриваемых ВС следует учитывать соответствующую информацию из табл. 1.

Таблица 2

Таблица соответствия рекомендаций стандартов МСЭ-Т и МЭК

№ п/п	Тип стандарта		MFD, мкм	MFD, мкм	Рекомендуемая длина волны (nm)	
	МСЭ-Т	МЭК	min	max		
1	G.651.1	A1a	47,5	52,5	850	
2	G.652.A	B1.1	8,6	9,5	1310	
3	G.652.B					
4	G.652.C	B1.3		9,2		
5	G.652.D					
6	G.653.A	B2_a	7,8	8,5	1550	
7	G.653.B	B2_b				
8	G.654.A	—	9,5	10,5		
9	G.654.B	B1.2_b		13,0		
10	G.654.C	B1.2_c		10,5		
11	G.654.D	B1.2_d	11,5	15,0		
12	G.654.E	B1.2_e		12,5		
13	G.655.A	—	8,0	11,0		
14	G.655.B	—				
15	G.655.C	B4_c				
16	G.655.D	B4_d				
17	G.655.E	B4_e				
18	G.656	B5	7,0	9,2	1310	
19	G.657.A1	B6_a1	8,6			
20	G.657.A2	B6_a2				
21	G.657.B2	B6_b2	6,3	9,5		
22	G.657.B3	B6_b3				

При сходстве этих стандартов отличие в классификации ВС всё-таки есть. Оно касается многомодового ВС с диаметром сердцевины 62,5 мкм типа A1b стандарта IEC 60793-2-60. Эквивалента ему в рекомендациях МСЭ-Т нет, и поэтому в табл. 2 он не приведен. Еще одно замечание касается того, что производители ВС на самом деле выпускают кабельную продукцию лучшего качества, чем регламентируют указанные выше рекомендации. Так, рекомендация МСЭ-Т G.652 ограничивает коэффициент затухания ВС на длине волны 1310 нм в 0,4 дБ/км, а, например, ВС SMF-28e+™ фирмы Corning, которое относится к этой группе, имеет затухание в 0,33 – 0,35 дБ/км. Это относится и к ВС, производимым российскими предприятиями, например, ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Так как при изготовлении кабельной продукции производители более часто используют маркировку МСЭ-Т, то для сравнительного анализа характеристик и параметров ВС целесообразно использовать названия ВС согласно этим рекомендациям. В настоящей работе такой анализ производится с целью выделения паспортных параметров ВС, которые определяют оценки влияния изгибов на соответствующие устройства фотоники.

2. Группы ВС по различиям ВОЛС

Все назначения и сферы применения ВС по приведенным стандартам относительно ВОЛС можно разделить на две основные группы:

- ВОЛС для протяженных участков ЛВС;
- объектовые ЛВС на основе ВОЛС.

Для оценки влияния изгибов на уровень мощности оптического излучения в ВОЛС первой группы следует учитывать то, что в большинстве своём они оснащены системами мониторинга. Современные системы мониторинга ЛВС на основе ВОЛС позволяют обнаружить малейшие изменения состояния канала связи в линиях на любых расстояниях. Однако все импульсные рефлектометры OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), которые лежат в основе систем мониторинга широкого пользования, имеют несколько «слабых» мест в своей работе, большинство из которых решается частотными

(когерентными) рефлектометрами OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometer).

В любом случае система мониторинга позволяет сделать оценки изменений, происходящих в ВС контролируемых ВОЛС. Несложно догадаться, что эти изменения лежат в области погрешностей измерения затухания и длины для каждого параметра рефлектограммы.

В системе мониторинга для этого задаются допускаемые значения абсолютных величин этих погрешностей либо для изменения по сравнению с базовой рефлектограммой – пороговые значения (обычно три уровня) [3]. Анализ этих параметров и их погрешностей привел к выводу, что две из этих погрешностей определяют искомые критерии влияния изгибов на ВС:

1) максимальная погрешность измерения расстояния L , м, с дискретностью отсчетов d , определяемая по формуле:

$$\Delta L = \pm(0,5 + d + 3 \cdot 10^{(-5)} \cdot L), \quad (1)$$

2) максимальная погрешность измерения затухания α , дБ, которая определяется выражением:

$$\Delta \alpha = \pm(0,04 \cdot \alpha + 0,05). \quad (2)$$

Численные коэффициенты выражений (1) и (2) определены стандартом [3], который устанавливает типовые технические решения по организации систем мониторинга состояния ВОЛС и методики измерений параметров.

Из формулы (1) для регламентированных $d = 0,16 \dots 15$ м на длине волны 1550 нм следует, что первый параметр оценки влияния изгибов на мощность оптического излучения в ВС лежит в следующем диапазоне:

$$0,66 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot L < \Delta L < 15,5 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot L. \quad (3)$$

Таким образом, формула (2) определяет границу изменения затухания на ВС, а формула (3) дает границы искажения расстояния в его рефлектограмме.

Для объектовых ЛВС на основе ВОЛС ситуация по изгибам обстоит иначе. В большинстве своём объектовые сети ВОЛС 2-, 3- и 4-й категорий не имеют аппаратных средств мониторинга. Это связано с особенностью расположения пользователей сети в соответствии с

топологиями «звезда», «дерево» или гибридными сложными топологиями.

Отсюда следует, что круг рассматриваемых задач по влиянию изгибов на излучение в ВОЛС фокусируется главным образом на ВС, эксплуатируемых в системах связи с протяженными участками ЛВС.

3. Анализ ВС по эксплуатационным особенностям

Для более детального определения назначения ВС необходимо провести анализ их эксплуатационных характеристик. В связи большим распространением стандарта МСЭ-Т используется его терминология.

На рис. 1 и 2 пунктирные линии показывают рабочие диапазоны скоростей (см. рис. 1) и дальности (см. рис. 2) передачи информации для различных категорий ВС, а штриховые и сплошные линии ограничивают их верхние и нижние границы соответственно. Анализ рис. 1 и 2 позволяет сделать следующие выводы.

а) ВС стандартов G.652.D и G.654.E имеют скорость передачи до 100 Гбит/с, поэтому их нецелесообразно использовать для объектовых ЛВС, и все телекоммуникационные организации применяют их на дальние расстояния до 3000 км с оптическими усилителями;

б) ВС стандарта G.651.1 являются универсальными по скорости, а значит, такие ВС будут работать практически с любым оконечным оборудованием, но на короткие ВОЛС (до 600 м) объектовых ЛВС;

в) из одномодовых ВС стандарт G.657.B3 имеет самый узкий диапазон дистанций передачи информации (до 40 км), что с учетом скорости передачи от 10 до 40 Гбит/с определяет область построения ЛВС на его основе ВОЛС без ретрансляторов;

г) ВС остальных стандартов имеют одинаковые возможности по скорости передачи информации, но различные расстояния, что позволяет их разделить на две условные группы: шесть стандартов ВС с ограничениями по дальности (G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.655.A, B) и 14 остальных, имеющих максимально регламентированное расстояние в 3000 км;

д) с учетом формулы (3) и того факта, что длина трасс без усилителей не превышает 50 км, следуют граничные значения для искажений расстояния в рефлектограмме вследствие изгибов ВС от 0,68 до 17 м.

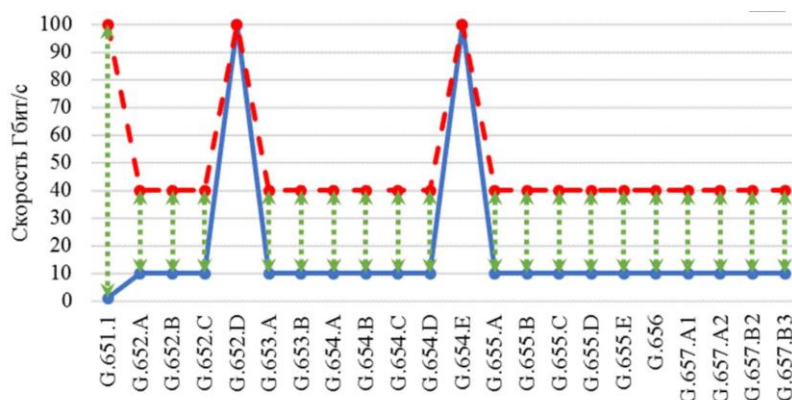


Рис. 1. Скорости передачи информации по категориям ВС:

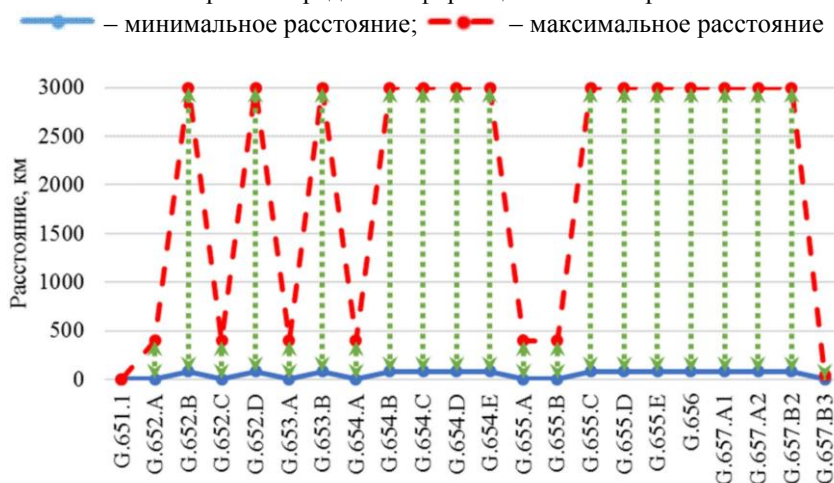


Рис. 2. Дальности передачи информации по ВОЛС для категорий ВС:

— минимальное расстояние; — максимальное расстояние

Выводы последних двух пунктов выделяют ВС стандарта G.651.1 в наиболее уязвимые для изгибов на объектовых ЛВС. ВС стандартов G.652.A, C; G.653.A; G.654.A; G.655.A, B и G.657.B3 имеют ограничения по дальности и могут быть как на объектовых ЛВС, так и на ВОЛС для протяженных участков ЛВС до 400 км. ВС остальных 16 стандартов применяются Ростелекомом на особо протяженных ВОЛС.

4. Анализ ВС по погонному затуханию

Вторым параметром ВС, важным для оценки влияния изгибов на оптическое излучение в них, является их собственное погонное

затухание. Оно определяется величиной затухания мощности оптического сигнала на одном километре ВС, дБ/км. Все ВС имеют различные значения погонного затухания в зависимости от длин волн, которые стандартизированы в диапазоне $\lambda = 850 \dots 1625$ нм. Причем нет ни одной длины волны, для которой бы во всех стандартах были бы приведены затухания, а также нет ни одного стандарта, для которого были бы приведены затухания на всех регламентированных длинах волн (850, 1310, 1550 и 1625 нм). Более того, в современных ВС и в первых стандартах ВС используются разные материалы и эффекты.

Этот хаос приводит к неадекватной оценке и сложности сравнения всех стандартов между собой.

Для того чтобы привести все стандарты под некоторый общий знаменатель была выбрана наиболее широко представленная длина волны 1550 нм (для восьми стандартов), ниже которой не работают современные системы мониторинга. Для остальных стандартов ВС, которые не имеют регламентированных затуханий, были проведены дополнительные расчеты с помощью моделирования спектрального затухания [4]. В соответствии с ним коэффициент затухания в ВС, распределенный по спектру длин волн, можно рассчитать с помощью характеристической матрицы $\mathbf{M}$ и вектору $\mathbf{v}$ по формуле:

$$\mathbf{w} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{v}. \quad (4)$$

Вектор $\mathbf{v}$ содержит измеренные коэффициенты затухания для одной из длин волн (например, 1310 нм), а матрица $\mathbf{M}$ определяется на статистической основе [4]. Если оценка получена с использованием конкретной матрицы производителя $\mathbf{M}$, то никакой корректирующий вектор $\mathbf{e}$ не требуется. Если она не известна, то производитель ВС предоставляет вектор поправочных коэффициентов, так что прогнозируемое значение затухания принимает поправку: $\mathbf{W} = \mathbf{w} + \mathbf{e}$.

По этому методу были рассчитаны коэффициенты затуханий для остальных 14 стандартов ВС, сведенных с остальными стандартами на гистограмме, представленной на рис. 3. Из нее наглядно видно, что ВС пяти стандартов G.654 имеют самое низкое погонное затухание (0,22–0,23 дБ/км). При таком низком затухании в ВС системы мониторинга работают в более чувствительном диапазоне измерения ВОЛС, следовательно, любая вносимая потеря, характерная при изгибах, будет более ярко выражена. Погрешность определения затухания в ВС

стандартов G.654 по формуле (2) на 50 км ВОЛС (без усилителей) составляет около 2,8 дБ, что делает короткие трассы из таких ВС не критичными к изгибам.

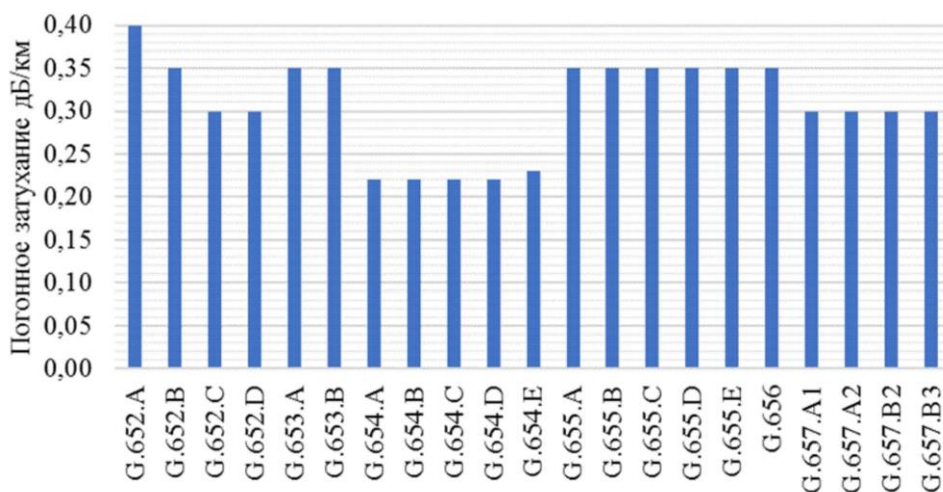


Рис. 3. Естественное затухание в ВС на один километр при длине волны 1550 нм

С другой стороны, из представленной гистограммы видно, что ВС стандартов G.652.A,B; G.653.A,B; G.655.A,B,C,D,E и G.656 имеют регламентированное затухание 0,35 дБ/км и выше. Это означает, что телекоммуникационная аппаратура для этих стандартов ВС, включая системы мониторинга состояний ВОЛС, будет настроена на высокие потери в линиях. Такое ограничение касается и устанавливаемых в соответствующих ВОЛС погрешностей, которые по формуле (2) на 50 км составляют более 3,3 дБ. Отсюда следует, что для этих ВС запас потерь ограничивает потенциально возможные вольности по изгибам при прокладке ВОЛС. Многомодовые ВС относятся сюда априори. Остальные шесть стандартов ВС по затуханию находятся на грани детектирования системами мониторинга и зависят от дальности передачи информации по ВОЛС.

Из результатов анализа по погонному затуханию видно, что ВС стандартов G.654 менее уязвимы для изгибов к ВОЛС протяженных участков ЛВС, а ВС остальных стандартов определяют внешние границы научно-технических исследований по условиям организации ВОЛС.

5. Анализ ВС по потерям при макроизгибах

Макроизгибный эффект потери оптической мощности является основным способом для разработки амплитудных волоконно-оптических датчиков, так как он наиболее простой в технической реализации. Такой способ известен благодаря ряду работ, включая [1, 5], где представлены математические модели и описания сопутствующих процессов. Однако в этих и других работах ВС рассматриваются только для примеров, оценочных расчетов или вообще не указано, на каких ВС проводились исследования. Обобщить многие выводы таких работ на выделенные выше стандарты ВС сложно или не представляется возможным. Это связано как с тем, что формирование вытекающих мод на разных ВС протекает по-разному, так и с тем, что круг стандартов предметной области исследования был не определен.

С целью объективной сравнительной оценки ВС всех стандартов на предмет макроизгибного детектирования необходимо провести анализ потенциальных потерь для предусмотренной длины волны (в настоящей работе – для обоснованной выше $\lambda = 1550$ нм). В связи с тем, что в разных стандартах приводятся результаты по испытаниям на разных радиусах изгиба (от 5 до 30 мм) и количествах витков (от 1 до 100), то были проведены дополнительные аппроксимации и нормировки указанных потерь на один оборот для одинакового максимального радиуса изгиба в 30 мм.

Правомерность этого определяется тем, что для одномодовых ВС с увеличением числа витков затухание возрастает по линейному закону, а при уменьшении радиуса изгиба оно увеличивается экспоненциально. Однако четыре стандарта G.657 для современных ВС с уменьшенными потерями на изгибах определяют эти затухания только для малых и разных радиусов изгибов в диапазоне 5 – 15 мм. Поэтому для приведения значений их затуханий к изгибу 30 мм потребовалось провести аппроксимацию зависимостей, приведенных на рис. 4. Полученные результаты ($\alpha_{G.657.A1} = 1 \cdot 10^{-6}$ дБ/об., $\alpha_{G.657.A2,B2} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ дБ/об. и $\alpha_{G.657.B3} = 45 \cdot 10^{-6}$ дБ/об.) были использованы для построения общей картины по потерям на макроизгибах для ВС всех стандартов (рис. 5). Кроме того, из рис. 4 можно сделать дополнительные выводы по составу ВС стандартов G.657. Первое – это одинаково высокая чувствительность к макроизгибу у ВС стандартов G.657.A1, G.657.A2

и G.657.B2, отличающаяся от чувствительности ВС стандарта G.657.B3 в два раза, причем эта закономерность обратна к закономерности изменения значений затухания этих ВС при макроизгибе на 30 мм. Второе – это возрастающая возможность согнуть ВС на меньший радиус изгиба от ВС старых стандартов (G.657.A1) к новым (G.657.B3).

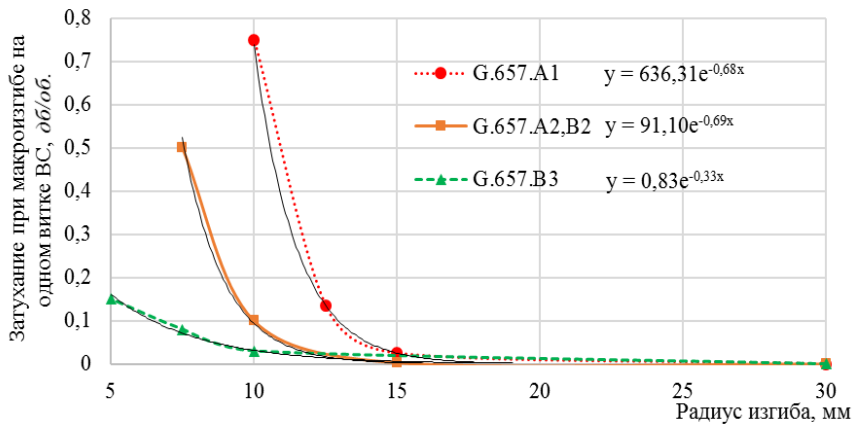


Рис. 4. Нормированное затухание на макроизгибе в ВС на длине волны 1550 нм

Представленные на рис. 5 результаты дают понимание того, что для ВС стандартов G.657 изгибы практически не влияют на потери в них, хотя при более крутых изгибах (менее 10 мм) они будут уже существенно терять мощность своего оптического излучения. Однако справедливо заметить, что эти ВС имеют очень высокую стоимость и эксплуатируются в основном в тех ВОЛС, где предполагается много вставок и изгибы уже не играют роли.

Наряду с этим из рис. 5 следует, что ВС стандартов: G.653.A; G.654.A,B,C; G.655.A,B,C; G.656 и в существенно большей степени – G.654.D (и G.651.1) наиболее уязвимы. Это обусловлено тем, что если они имеют высокие потери при макроизгибе 30 мм на одном витке, то при уменьшении радиуса и увеличении количества витков потери еще увеличатся. Следовательно, для этих ВС увеличится мощность светового потока на изгибе. При этом стоит отметить, что ВС стандартов G.654.A, B, C предназначены для создания подводных систем связи (см. табл. 1), и в связи с этим и их конструктивными особенностями (специальные материалы и броня) осуществить в них изгибы довольно

проблематично. Кроме того, этот вывод подтверждает учет того, что эти ВС имеют самое низкое погонное затухание (см. рис. 3). Отсюда следует, что круг ВС, для которых существенны изгибы, сужается до ВС стандартов G.653.A; G.654.D; G.655.A,B,C и G.656.

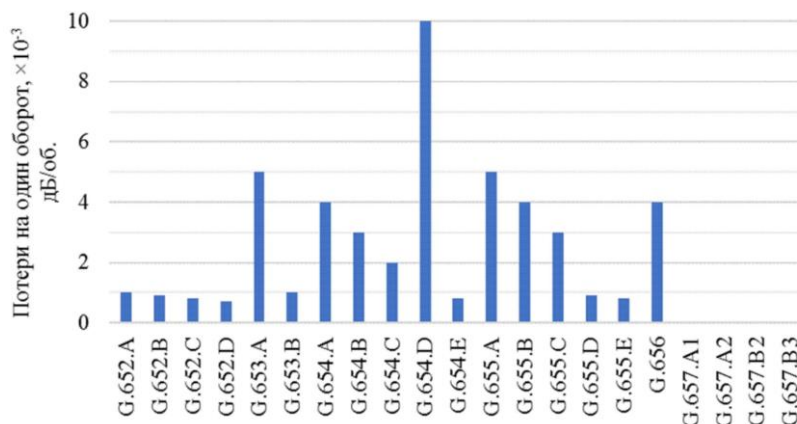


Рис. 5. Потери на макроизгибе ВС

6. Анализ ВС по диаметру модового поля

Параметр модового поля MFD характеризует физические размеры той части ВС, где передаётся большая часть энергии света: сердцевины и некоторой части оболочки. ВС с большими MFD менее чувствительны к боковым отклонениям на соединениях, но более чувствительны к потерям на изгибах волокна в кабельных муфтах и кроссах. Это связано с тем, что при большем MFD к внешней стороне изгиба смещается существенная его часть и излучение выходит через образующиеся оболочечные моды (в которые «перекачивается» энергия при таком изгибе).

Проведенный анализ параметра MFD по стандартам ВС для минимальных и максимальных значений представлен на гистограммах рис. 6, а среднее его значение показано соединяющей линией. Из этого рисунка видно, что минимальный MFD имеют ВС стандартов G.653.A,B и G.657.B2,B3, а максимальные значения, помимо G.651.1 – стандарты G.654 и G.655. Остальные принимают промежуточные значения.

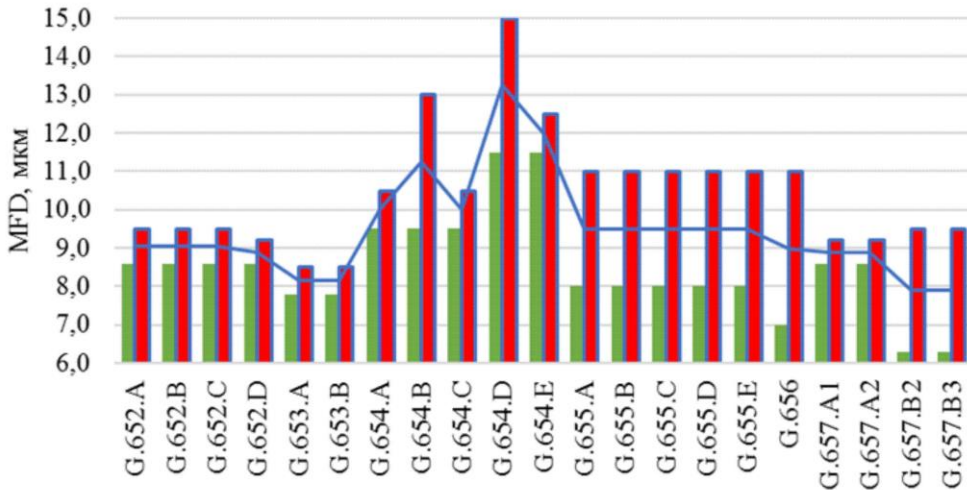


Рис. 6. MFD по стандартам BC

С учетом изложенного выше из анализа этого параметра следует, что с точки зрения ВОЛС изгиб влияет на все BC, кроме стандартов G.653.A,B и G.657.B2,B3. С точки зрения волоконно-оптических датчиков все в точности наоборот, так как любые внешние физические воздействия на указанные BC будут приводить к существенной потере мощности оптического излучения, распространяющегося по ним.

Выводы

Проведенный многосторонний анализ уязвимости современных BC на предмет формирования у них вытекающих мод при изгибах показал, что в большей степени этому подвержены ВОЛС протяженных участков ЛВС, чем объектов ЛВС. При этом наилучшей устойчивостью к изгибам обладают BC следующих стандартов по проанализированным параметрам:

- по погонному затуханию: G.654.A,B,C,D;
- по потерям на макроизгибах: G.657.A2,B2,B3;
- по диаметру модового поля: G.653.A,B и G.657.B2,B3.

С другой стороны, к BC, параметры которых наиболее критичны к изгибам на линиях, относятся следующие стандарты:

- по погонному затуханию: G.651.1; G.652.A,B,C,D; G.653.A,B; G.655.A,B,C,D,E; G.656; G.657.A1,A2,B2,B3;
- по потерям на макроизгибах: G.651.1; G.652.A,B,C; G.653.A,B; G.654.A,B,C,D,E; G.655.A,B,C,D,E; G.656;

– по диаметру модового поля: G.651.1; G.652.A,B,C,D; G.654.A,B,C,D,E; G.655.A,B,C,D,E; G.656; G.657.A1,A2.

Пересечение множеств этих стандартов с учетом верхнего включающего множества окончательно определяет следующие 12 стандартов, которые требуется прокладывать без изгибов или использовать для волоконно-оптических изгибных датчиков: G.651.1; G.652.A,B,C; G.654.E; G.655.A,B,C,D,E; G.656; G.657.A1.

Полученные выводы по стандартам ВС могут быть распространены на кабельную продукцию многих производителей, особенно тех, кто следует рекомендациям рассмотренных выше организаций МСЭ-Т и МЭК, например, указанных выше Corning и ПАО «ПНППК». Кроме того, следует учитывать, что одна из основных телекоммуникационных организаций – Ростелеком в настоящее время широко эксплуатируют ВС стандартов G.651.1, G.652.D, G.655, G.657.A1,A2. Сравнение их с выделенными выше стандартами дает понимание того, что все они, кроме последнего, подвержены изгибам.

Список литературы

1. Кульчин Ю.Н. Распределённые волоконно-оптические измерительные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
2. Рекомендации МСЭ-Т G.657.A2. – 2016.
3. СТО 56947007-33.180.10.211-2016. Технологическая связь. Типовые технические решения по организации системы мониторинга состояния оптических волокон ВОЛС-ВЛ / ПАО «ФСК-ЕЭС». – 17.02.2016 № 50. – 43 с.
4. ITU-T G.650.1. Series G – Transmission systems and media, digital systems and networks, 10/2020. – Printed in Switzerland, Geneva, 2021.
5. Расчет параметров макроизгибного отвода оптического излучения из волоконных световодов / И.В. Денисов, Н.В. Лисовский [и др.] // Радиотехника. – 2021. – Т. 85. – № 2. – С. 18–26.

References

1. Kul'chin Iu.N. Raspredelennye volokonno-opticheskie izmeritel'nye seti [Distributed fiber optic measurement networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001, 272 p.
2. Rekomendatsii MSE-T G.657.A2 [Recommendations MSE-T G.657.A2], 2016.

3. STO 56947007-33.180.10.211-2016. Tekhnologicheskaja sviaz'. Tipovye tekhnicheskie resheniia po organizatsii sistemy monitoringa sostoianiia opticheskikh volokon VOLS-VL [STO 56947007-33.180.10.211-2016. Technological connection. Typical technical solutions for organizing a system for monitoring the condition of optical fibers of FOCL-VL]. Publichnoe aktsionernoe obshchestvo "Federal'naja setevaia kompaniia Edinoi energeticheskoi sistemy", 17.02.2016 no. 50, 43 p.

4. ITU-T G.650.1. Series G - Transmission systems and media, digital systems and networks, 10/2020. Printed in Switzerland, Geneva, 2021.

5. Denisov I.V., Lisovskii N.V. et al. Raschet parametrov makroizgibnogo otvoda opticheskogo izlucheniia iz volokonnykh svetovodov [Calculation of parameters of macrobending extraction of optical radiation from optical fibers]. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 2, pp. 18-26.

Сведения об авторах

ДЕНИСОВ Игорь Викторович

e-mail: igordenisov@inbox.ru

Профессор, доктор технических наук, доцент, Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (пос. Переславское, Россия)

ЛИСОВСКИЙ Никита Викторович

e-mail: pro100fox@list.ru

Аспирант, Институт физико-математических наук и информационных технологий Балтийского федерального университета им. И. Канта (пос. Переславское, Россия)

About the authors

DENISOV Igor Viktorovich

e-mail: igordenisov@inbox.ru

Professor, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies of the Baltic Federal University named after I.I. I. Kant, (settlement Pereslavskoe, Russia)

LISOVSKY Nikita Viktorovich

e-mail: pro100fox@list.ru

Postgraduate student Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies of the Baltic Federal University named after I.I. I. Kant, (settlement Pereslavskoe, Russia)

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 20.01.2023

Одобрена: 26.01.2023

Принята к публикации: 01.02.2023

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 20/01/2023

Approved: 26/01/2023

Accepted for publication: 01/02/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Денисов, И.В. Систематизация чувствительных к изгибу волоконных световодов / И.В. Денисов, Н.В. Лисовский // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 131–148.

Please cite this article in English as: Denisov I.V., Lisovsky N.V. The systematization of bending-sensitive fiber light guides // Applied photonics, 2023, no. 1, pp. 131-148.

ВСЕРОССИЙСКАЯ ДИАНОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

10–13 ОКТЯБРЯ 2023 ГОДА, Г. ПЕРМЬ,
УЛ. ЧЕРНЫШЕВСКОГО, 28, КДЦ КЛАСТЕРА «ФОТОНИКА»

СРОКИ ПОДГОТОВКИ

- До 15.06.2023 года – прием тезисов докладов.
- 21.07.2023 года – рассылка уведомлений о принятии докладов.
- До 12.09.2023 года – прием заявок на участие в конференции.

ТЕМАТИКА

- Волоконные световоды.
- Волоконно-оптические кабели.
- Волоконно-оптические системы связи и передачи информации.
- Компоненты и устройства волоконной оптики.
- Волоконные лазеры и усилители.
- Волоконно-оптические датчики и системы измерения физических величин.
- Наноматериалы и нанотехнологии в волоконной оптике.
- Гидроакустика.
- Нанофотоника и агробифотоника.
- Фотонные интегральные схемы и радиофотоника.
- Другие актуальные вопросы современной волоконной оптики и смежных областей.

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Научный центр волоконной оптики (НЦВО) РАН.
- Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».
- Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПАО «ПНППК»).
- Центр компетенций НТИ «Фотоника» при ПГНИУ.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Семёнов
Сергей Львович
+7 499 503 87 50
vkvo@ntiphotonics.ru

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Цаплин
Юрий Алексеевич
+7 919 490 73 02
y.tsaplin@ntiphotonics.ru

Миляева
Диана Дмитриевна
+7 902 475 85 08
d.milyaeva@ntiphotonics.ru

ОФИЦИАЛЬНЫЙ САЙТ
ntiphotonics.ru/vkvo-2023



ЦЕНТР НТИ
ФОТОНИКА



Научное издание

ПРИКЛАДНАЯ ФОТОНИКА

APPLIED PHOTONICS

Т. 10, № 1

Редактор и корректор *И.Н. Жеганина*

Выход в свет 17.03.2023. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 12,0. Тираж 130 экз. Заказ № 040/2023.
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.