

УДК 535.92

А.Л. Томашук, С.Л. Семенов

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова,
Москва, Российская Федерация

НАУЧНОМУ ЦЕНТРУ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ

ИМ. Е.М. ДИАНОВА РАН 30 ЛЕТ

Описываются основные достижения и вехи развития Научного центра волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН.

Ключевые слова: волоконная оптика, Научный центр.

A.L. Tomashuk, S.L. Semjonov

«M. Prokhorov General Physics Institute» of Russian
Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow, Russian Federation

DIANOV FIBER OPTICS RESEARCH CENTER

BECAME 30 YEARS

The main achievements and milestones in the development of the Dianov Fiber Optics Research Center - branch of Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

Keywords: fiber optics, Scientific Center.

Волоконная оптика – достаточно молодая, но быстро достигшая своего расцвета область знания, техники и технологии, а наш Научный центр (далее – Центр) волоконной оптики РАН (НЦВО РАН) – один из мировых лидеров по исследованию физики волоконных световодов (ВС), по решению актуальных фундаментальных и прикладных задач в области волоконной оптики и созданию новых типов ВС для волоконно-оптической связи и для специальных применений. В данной статье, посвященной 30-летию НЦВО РАН, кратко описаны основные научные достижения и вехи развития Центра.

Начало волоконной оптики было положено в статье будущего Нобелевского лауреата Ч. Као 1966 года, в которой было показано, что затухание света в стеклянном световоде может быть снижено до уровня, многократно ниже 20 дБ/км, при надлежащем выборе состава стекла

и создании необходимой световедущей структуры с сердцевинной и оболочкой с меньшим показателем преломления, чем у сердцевины, т.е. в статье было дано обоснование самой возможности существования волоконно-оптической связи!

Уже в 1970 году фирма «Corning Glass» (США) сообщила об изготовлении стеклянных волоконных световодов с затуханием ниже 17 дБ/км, при этом ни состав стекла, ни способ изготовления световодов не раскрывались.

Истоки Научного центра волоконной оптики Российской академии наук (НЦВО РАН) относятся к 1972 году, когда заведующий Лабораторией колебаний ФИАН Нобелевский лауреат А.М. Прохоров предложил младшему научному сотруднику кандидату физико-математических наук Е.М. Дианову заняться волоконной оптикой – новым, только зарождающимся в мире научным направлением. Александр Михайлович отлично понимал, что это не просто «фундаментальная» задача по распространению света по протяженному диэлектрику на стыке оптики и физики твердого тела. Как потом оказалось, всего через несколько десятилетий волоконная оптика и идущая за ней «цифровизация» революционно изменили сами основы жизни людей!

А.М. Прохоров познакомил Е.М. Дианова с Ж.И. Алферовым, занимавшимся разработкой полупроводниковых гетеролазеров в ФТИ им. А.Ф. Иоффе – источников излучения для гипотетических волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) – и ставшему впоследствии Нобелевским лауреатом за создание полупроводниковых гетероструктур для оптоэлектроники.

А.М. Прохоров понял, что не стоит отвлекаться и развивать в ФИАНе технологию изготовления полупроводниковых лазеров для ВОЛС (в ФТИ это направление и так отлично развивалось), а целесообразно сконцентрироваться на волоконных световодах (ВС) как таковых.

Технологии получения высокочистых веществ, необходимых для создания ВС, имелись в СССР в Институте химии АН СССР (город Горький, теперь Нижний Новгород), и А.М. Прохоров обратился к члену-корреспонденту (впоследствии академику) Г.Г. Девятым (в те годы зам. директора ИХАН по научной работе) с предложением заняться созданием технологии ВС. Так начались совместные, уникальные по продолжительности (50 лет) и плодотворности (более тысячи совместных публикаций, более сотни «волоконных» диссертаций)

исследования двух академических институтов, «химиков» и «физиков», группы «Материалы волоконной оптики» под руководством кандидата химических наук А.С. Юшина ИХАН и группы волоконной оптики под руководством кандидата физико-математических Е.М. Дианова Лаборатории колебаний ФИАН (позже переросшей в сектор волоконной оптики). Соответственно в ИХАН группа «Материалы волоконной оптики» переросла в Лабораторию технологии волоконных световодов.



Группа волоконной оптики Отдела колебаний ФИАН, 1973 год



Е.М. Дианов, А.М. Прохоров, А.Н. Гурьянов, Г.Г. Девятых и С.П. Еллиева обсуждают MCVD-технологию преформ для волоконных световодов в ИХАН

В те годы в ИХАН с использованием высокочистых реагентов изготавливались преформы ВС на основе кварцевого стекла (с нелегированной и легированной германием сердцевиной) по технологии MCVD (осаждение стекла из газовой фазы на внутреннюю поверхность опорной кварцевой трубки) и VAD (внешнее осаждение на затравку). Преформы вытягивались на установках в ФИАНе, одна из которых была размещена в бывшей пожарной башне юго-запада Москвы по соседству с территорией ФИАНа. Там же, в ФИАНе, проводились исследования физических свойств ВС и вырабатывались рекомендации по оптимизации параметров технологического процесса изготовления преформ. Из двух технологий, реализованных в ИХАНе для изготовления преформ, технология MCVD была выбрана как наиболее перспективная.

В режиме обратной связи «технология–эксперимент» в 1975 году были получены первые отечественные ВС с малыми оптическими потерями (7 дБ/км на длине волны $\lambda = 0,85$ мкм) – это были многомодовые ступенчатые ВС с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и боросиликатной оболочкой. К 1977 году потери были снижены еще на порядок – до 0,7 дБ/км на $\lambda = 1,6$ мкм.

Уже в 1977 году из наших ВС были созданы оптический кабель связи и первая ВОЛС в Зеленограде (по заданию Министерства электронной промышленности СССР).

Результатом совместной работы с Ж.И. Алферовым явилась также демонстрация в ФИАН в 1978 году впервые в мире ВОЛС для дальней связи со спектральным уплотнением на перспективной рабочей длине волны $\lambda = 1,3$ мкм [1, 2].

В 1981 году Лабораторию технологии волоконных световодов ИХАН возглавил кандидат химических наук А.Н. Гурьянов, ставший впоследствии доктором химических наук, член-корреспондентом РАН и оставшийся на посту заведующего лабораторией вплоть до кончины в 2022 году. Отечественная волоконная оптика очень многим обязана А.Н. Гурьянову и его лаборатории!

В 1980 году ИОФАН и ИХАН получили одномодовые ВС с потерями менее 5 дБ/км.

В 1983 году на основе Лаборатории колебаний ФИАН был образован Институт общей физики АН СССР, который возглавил А.М. Прохоров, а сектор волоконной оптики Лаборатории колебаний ФИАН стал Отделом волоконной оптики ИОФАН.

ИОФАН совместно с ИХАН изготовил многомодовые градиентные ВС с шириной полосы пропускания не менее 500 ГГц·км для ВОЛС длиной ~10 км, которая была проложена в 1984 году непосредственно вблизи Останкинской телебашни к домам, к которым от самой башни не попадал телевизионный сигнал. Позже еще несколько подобных ВОЛС были запущены в Москве, Ленинграде и Горьком.

Командами ИОФАН и ИХАН к 1986 году были получены широкополосные многомодовые градиентные ВС (ширина полосы пропускания уже не менее 1 ГГц·км на $\lambda = 0,85$ и 1,3 мкм), в 1987 году – одномодовые ВС с минимальными оптическими потерями 0,35 дБ/км на $\lambda = 1,6$ мкм, а к 1990 году – одномодовые ВС с модифицированными дисперсионными свойствами (со смещенной на $\lambda = 1,55$ мкм длиной волны нулевой дисперсии и с «плоской дисперсией» в широком спектральном диапазоне), а также многомодовые градиентные ВС, оптимизированные на $\lambda = 1,55$ мкм ($B \geq 2,5$ ГГц·км).

Исследования Отдела волоконной оптики ИОФАН собственных и радиационно-индуцированных центров окраски в ВС на основе нелегированного и легированного германием кварцевого стекла, проведенные в период 1979–1993 годов, впоследствии получили широкое международное признание (ряд работ выполнен совместно с НИИЯФ МГУ) [3–8].

В Отделе были созданы технологии вытяжки ВС в металлическом защитном покрытии (алюминий, медь, олово, золото) [9–11] и в герметичном углеродном покрытии [12]. Исследования механической прочности и долговременной надежности волоконных световодов в различных защитных покрытиях позволили получить пионерские результаты. Было установлено, что герметичные покрытия (металлические и углеродные) предотвращают попадание молекул воды на поверхность ВС и значительно подавляют эффект «усталости», проявляющейся в утрате механической прочности ВС со временем.

В разработке ВС повышенной прочности было весьма заинтересовано Конструкторское бюро машиностроения, разрабатывавшее противотанковый управляемый по ВС реактивный снаряд (ПТУРС). Нами были изготовлены ВС в алюминиевом покрытии с рекордно высокой механической прочностью (в некоторых образцах до 14 ГПа).

В 1988 году для Отдела волоконной оптики ИОФАН был построен лабораторный корпус площадью 5000 м², в котором и сейчас располагается НЦВО РАН.

Тогда же в 1988 году на базе ряда лабораторий ИХАНа, включая Лабораторию технологии волоконных световодов, был образован Институт химии высокочистых веществ АН СССР (с 1991 г. – ИХВВ РАН). На протяжении всей последующей истории ИХВВ РАН продолжал вносить существенный вклад в научные достижения Отдела волоконной оптики ИОФ РАН, а потом НЦВО РАН, многие из которых были бы попросту невозможны без вклада ИХВВ РАН.

Во второй половине 1980-х в Отделе волоконной оптики ИОФАН совместно с ИХВВ АН были созданы технологии получения и исследованы свойства двулучепреломляющих ВС эллиптического сечения, а также, активных ВС, легированных ионами эрбия и других редкоземельных элементов. Изобретена и продемонстрирована динамическая оперативная память рециркуляционного типа на ВС [13].

В трудные для страны 1990-е годы научный уровень исследований и разработок Отдела волоконной оптики ИОФ РАН вопреки всему только возрастал, о чем свидетельствовало широкое международное признание наших работ.

В 1992 году академик А.М. Прохоров инициировал создание Научного центра волоконной оптики при ИОФ РАН как отдельного юридического лица под руководством члена-корреспондента РАН Е.М. Дианова, а в 1993 году Центру был присвоен такой статус.

К этому времени стало ясно, что в создании ВС для линий связи нам не стоит конкурировать с фирмами США и Японии – наша ниша именно фундаментальные исследования и разработки в традициях научной школы ФИАН-ИОФАН. Именно в этот период открытости нашей страны, невзирая на значительные затруднения в финансировании академической науки, активно развивались наши научные контакты и взаимовыгодные совместные исследования с ведущими фирмами и университетами мира, что, безусловно, способствовало росту уровня научных исследований в НЦВО РАН и укрепляло его авторитет в России и мире.

В НЦВО РАН было всесторонне исследовано нелинейное распространение лазерного излучения по ВС и проведено теоретическое и экспериментальное исследование генерации и распространения солитонов в ВС [14–30], открыт эффект ВКР-саморассеяния солитонов [28], впервые дано теоретическое описание их взаимодействия на расстоянии [24], установлено, что это взаимодействие обусловлено электрострикцией [19, 29]. Впервые в мире осуществлена генерация последовательности

солитонов с высокой частотой повторения (десятки и сотни ГГц) в ВС с плавно изменяющейся дисперсией по длине [25, 26, 30].

Наши исследования нелинейного распространения лазерного излучения в ВС получили высокую оценку у специалистов в мире, заложили физические основы для использования солитонов в протяженных линиях оптической связи и привели к созданию волоконных лазеров ультракоротких импульсов.

Исследования вынужденного комбинационного рассеяния (вынужденного рамановского рассеяния) в волоконных световодах привели к тому, что в 1994 году нами впервые в мире была продемонстрирована возможность создания непрерывных источников накачки для оптических усилителей на $\lambda = 1,3$ мкм (во втором окне прозрачности) и создан первый эффективный оптический усилитель, работающий в указанном диапазоне [31, 32].

Были созданы высоколегированные германосиликатные ВС, позволяющие существенно понизить порог нелинейных эффектов, что было необходимо для ВКР-лазеров и усилителей и для генерации так называемого «суперконтинуума» – когерентного излучения в широком спектральном диапазоне. Такие ВС позволили эффективно управлять дисперсией и сдвинуть область прозрачности в область больших длин волн. Оптимизация технологии изготовления высоколегированных германосиликатных ВС обеспечила сверхнизкие оптические потери в них (менее 1,5 дБ/км при концентрации 30 мол.% GeO_2 – это было рекордно низкое значение для технологии MCVD!) [33, 34]. Дальнейшее совершенствование технологии позволило впервые в мире получить ВС с германатной сердцевиной (концентрация GeO_2 до 98 мол.%), в которых, кроме прочего, достигнута ВКР-генерация солитонов в спектральной области до $\lambda = 2,7$ мкм [35, 36].

Разработаны ВС с большой концентрацией фосфора в сердцевины [37] и на их основе созданы высокоэффективные волоконные ВКР-усилители для линий оптической связи и волоконные ВКР-лазеры, способные генерировать излучение в широкой спектральной области [38, 39].

Исключительные возможности волоконных ВКР-лазеров по смещению длины волны излучения в широком спектральном диапазоне продемонстрированы нами на примере эффективного многокаскадного ВКР-лазера на ВС с повышенными концентрациями оксидов фосфора и германия: при накачке на $\lambda = 1,06$ мкм выходное излучение за счет

шестикаскадного ВКР-преобразования смещалось на $\lambda = 2,06$ мкм (рис. 1). В результате созданные в НЦВО РАН рамановские волоконные лазеры на основе специальных ВС из кварцевого стекла с германосиликатной и фосфоросиликатной сердцевиной перекрывали весь диапазон длин волн 1,1–2,2 мкм. Наши рамановские волоконные лазеры используются во многих лабораториях в различных странах!

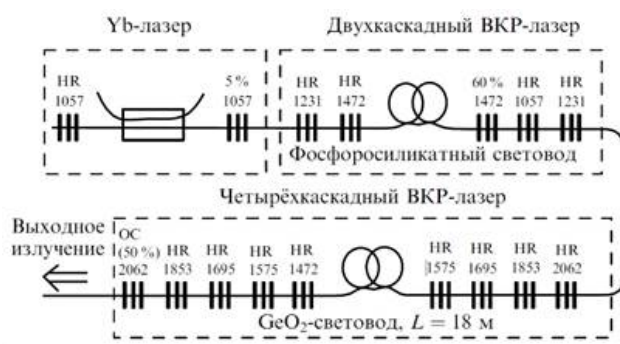


Рис. 1. Схема шестикаскадного рамановского волоконного лазера на световодах на основе кварцевого стекла, осуществляющего преобразование 1057–2062 нм; лазер состоит из последовательно включенных двухкаскадного и четырехкаскадного рамановских лазеров на различных типах световодов; около брэгговских решеток указаны их резонансные длины волн; выходная мощность ~ 1 Вт на 2062 нм [34]

В НЦВО РАН теоретически и экспериментально исследован эффект генерации второй гармоники в ВС [40]. Предложен фотогальванический механизм для объяснения этого эффекта в ВС на основе кварцевого стекла. Построенная нами теоретическая модель была полностью подтверждена экспериментально и признана международным научным сообществом. Понимание физики процесса генерации второй гармоники открыло возможности эффективного наведения нелинейности второго порядка в ВС («полинга»). Применение «полингованных» волоконных световодов как нелинейных сред позволило создавать компактные, полностью волоконные («all-fiber») генераторы второй гармоники лазерного излучения [41, 42], и источники фотонов в квантово-запутанных состояниях [43, 44].

Развиты плазмохимические технологии изготовления преформ ВС: технология осаждения стекла в плазме СВЧ-разряда при пониженном давлении внутри опорной трубки (SPCVD, surface plasma chemical vapor deposition) и технология осаждения фторсиликатного стекла на опорный стержень из кварцевого стекла (POD, plasma outside deposition).

С помощью технологии SPCVD разработаны уникальные ВС из кварцевого стекла, легированного азотом [45], которые впоследствии нашли применение как радиационно-стойкие двулучепреломляющие ВС для гироскопов на спутниках. «Азотные» ВС также позволили записывать волоконные брэгговские решетки показателя преломления (ВБР) с повышенной термостойкостью.

Разработаны ВС с рекордной стойкостью к воздействию ионизирующего излучения в видимом спектральном диапазоне, превосходящие по стойкости мировые аналоги [46] – ВС фирм «Фуджикура», «Мицубиши» (Япония), «Файбергайд» (США), «Гергаус» (Германия). ВС имеют герметичное покрытие (металлическое или углеродное) и молекулы $H_2(D_2)$, растворенные в стекле. Разработанные ВС оказались незаменимыми в системах диагностики плазмы термоядерного реактора ИТЭР, создаваемых в настоящее время в Российском агентстве ИТЭР.

За работы по созданию плазмохимических технологий преформ ВС и получению новых типов световодов с их помощью авторский коллектив сотрудников НЦВО РАН, ИРЭ РАН и ИХС РАН в 2002 году был удостоен Государственной премии РФ в области науки и техники.

Разработаны пилотные образцы инновационных волоконно-оптических датчиков физических величин (температуры, давления, звука и др.), использующих в качестве чувствительного элемента интерферометры Фабри–Перо, Майкельсона, Маха–Зандера и Саньяка или их комбинации. Исследована зависимость чувствительности датчика на интерферометре Саньяка, показано, что при оптимальной длине ВС она может превышать чувствительность волоконных датчиков на классических интерферометрах (Фабри–Перо, Майкельсона и Маха–Зандера). [47] Продемонстрированы прототипы датчиков охраны периметра объекта и гидрофона.

Вместе с волоконными световодами на основе кварцевого стекла с 1977 года в НЦВО РАН разрабатывались и исследовались световоды из материалов, область прозрачности которых простиралась в более длинноволновый – средний ИК диапазон: в первую очередь из халькогенидных, теллуридных и фторидных стекол, а также из кристаллов галогенидов щелочных металлов и серебра.

Такие световоды предназначались для многочисленных пассивных и активных применений: передачи излучения мощных СО и СО₂ лазеров, волоконных лазеров и преобразователей излучения ближнего

и среднего ИК диапазонов, для дистанционной низкотемпературной пирометрии, для аналитической спектроскопии в медицине, технологии и различного специального применения.

Научные и практические результаты в области создания и исследования ВС для среднего ИК-диапазона, полученные совместно с сотрудниками ИХВВ РАН и ГОИ, были отмечены в 1998 году Государственной премией РФ.

В XXI веке НЦВО РАН продолжил свое развитие.



Ю.С. Осипов, А.М. Прохоров и Е.М. Дианов (2001 г.)



Н.Г. Басов, А.М. Прохоров и Е.М. Дианов (2001 г.)

Разработаны различные технологии и конструкции микроструктурированных ВС, включая фотоннокристаллические и ВС с поллой сердцевиной. На основе наших микроструктурированных ВС со специальными дисперсионными свойствами созданы и широко тиражируются по лабораториям мира волоконные генераторы суперконтинуума.

Впервые в мире в НЦВО РАН обосновано теоретически и продемонстрировано экспериментально эффективное удержание света в так называемых «револьверных» ВС с поллой сердцевиной (ВС, имеющих

«отрицательную кривизну» границы сердцевина–оболочка, рис. 2). При такой структуре поперечного сечения на порядки величины меньше доля света, распространяющегося по стеклянной оболочке, по сравнению с обычными ВС с полый сердцевинной (0,007 % по сравнению с 2–3 %) и, следовательно, меньше оптические потери на поглощение. В Центре было продемонстрировано распространение света в револьверных ВС на основе кварцевого стекла с малыми оптическими потерями в диапазоне до ~ 5 мкм, т.е., потери были снижены на порядки величины по сравнению с самим кварцевым стеклом. В настоящее время именно револьверные ВС изготавливаются, исследуются и применяются всеми лабораториями мира, работающими с полыми волоконными световодами.

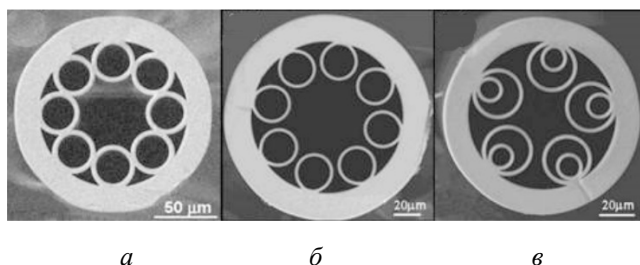


Рис. 2. Поперечные сечения револьверных световодов с полый сердцевинной: *а* – ВС, впервые предложенный и реализованный технологически в НЦВО РАН в 2011 г. [48]; *б* – ВС с разделенными капиллярами, также впервые предложенный и созданный в НЦВО РАН в 2013 г. [49]; *в* – ВС с двойными вложенными капиллярами, впервые реализованный в НЦВО РАН в 2016 г. [50]

Исследован фоторефрактивный эффект в ВС на основе кварцевого стекла, разработаны различные технологии записи решеток показателя преломления в ВС (волоконных брэгговских решеток (ВБР), длиннопериодных, чирпированных и др.) и исследованы их свойства. Продемонстрировано эффективное применение решеток в качестве зеркал волоконных лазеров, чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков физических величин и элементов по управлению длительностью импульса в различных волоконно-оптических устройствах [51–56].

Наша дочерняя компания «НЦВО-Фотоника» по заказу Международного агентства ИТЭР и под нашим научным руководством сейчас изготавливает тысячи датчиков температуры, деформации и смещения для установки внутри вакуумной камеры международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, строящегося во Франции.

Впервые в мире продемонстрированы интерферометр Маха–Зандера на отрезке световода между двумя длиннопериодными решетками показателя преломления и возможность его использования как чувствительного элемента датчиков.

Разработана технология изменения и микроструктурирования показателя преломления прямой лазерной записью, применимая к любым диэлектрикам, включая нефоточувствительные. Совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева создано и исследовано оптическое устройство нового типа – спиральная волноведущая брэгговская решётка (СВБР, рис. 3) [57]. Вихревые пучки, полученные из обычного лазерного пучка с помощью СВБР, позволяют провести пространственное уплотнение каналов в ВОЛС и тем самым многократно увеличить скорость передачи данных.

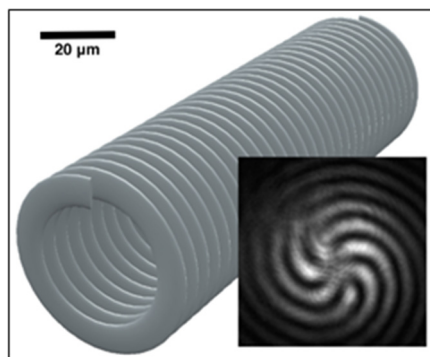


Рис. 3. Спиральная брэгговская волноведущая решётка (СВБР), созданная в объеме кристалла ИАГ с помощью профилированной перетяжки пучка фемтосекундного лазера, и структура отражённого от нее вихревого света

Сейчас в НЦВО РАН проводятся исследования по созданию долговечной оптической памяти – методов лазерной записи информации в стекле.

В Центре впервые в мире создан неодимовый волоконный лазер, генерирующий на $\lambda = 925$ нм с накачкой по оболочке и работающий при комнатной температуре [58]. Создана линейка активных ВС, легированных Nd, Yb, Er, Er-Yb [59], Ho [60], Tm и Tm-Yb [61], для лазеров и усилителей в спектральном диапазоне 0,9–2,0 мкм. Разработаны активные волоконные световоды, легированные Er и Nd, с повышенной стойкостью к ионизирующему излучению. При этом использованы два альтернативных подхода к подавлению радиационных центров окраски в сетке стекла световода [62, 63]. На основе разработанных световодов могут быть созданы радиационно-стойкие лазеры, усилители и люминесцент-

ные источники для использования в космическом пространстве. Технология изготовления эрбиевых радиационно-стойких световодов внедрена в компании ПАО ПНППК.

Также были созданы и исследованы волоконные источники ультракоротких импульсов. Среди основных достижений в этой области следует выделить создание эрбиевых [64] и тулиевых [65, 66] волоконных фемтосекундных лазеров, освоение совместно с ИОФ РАН нового метода пассивной синхронизации мод на основе углеродных наноструктур [67] (рис. 4), а также получение впервые в мире генерации пикосекундных импульсов в висмутовом волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод [68]. В последнее время благодаря успешному развитию технологии полых револьверных световодов была реализована генерация пико- и фемтосекундных импульсов в среднем ИК-диапазоне вблизи 3 мкм за счет ВКР в газонаполненных световодах с поллой сердцевиной при накачке мощными ультракороткими импульсами.

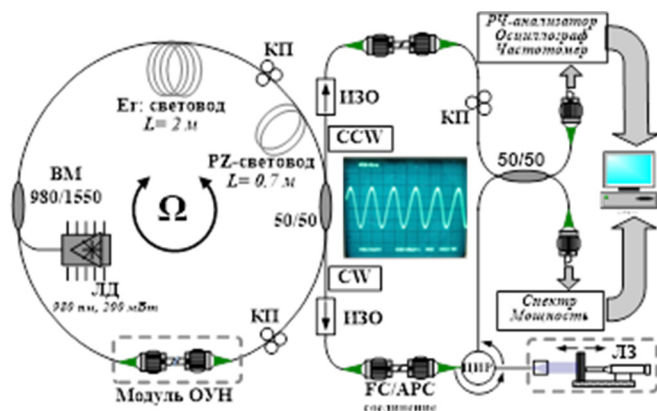


Рис. 4. Схема гироскопической установки на основе двунаправленного кольцевого эрбиевого волоконного лазера с пассивной синхронизацией мод

Активно ведутся исследования активных световодов с увеличенным диаметром поля моды для импульсных лазеров и усилителей с высокой пиковой мощностью. В частности, проведены пионерские исследования новой фосфороалюмосиликатной стеклянной матрицы для легирования редкоземельными элементами [69–71]. Благодаря нашим исследованиям такой состав стекла стал в мире «золотым стандартом» для активных световодов с увеличенным диаметром поля моды.

На основе фосфороалюмосиликатной стеклянной матрицы были созданы активные эрбиевые световоды с увеличенным диаметром

сердцевины и накачкой по оболочке, которые позволили получить целый ряд мировых рекордов по пиковой мощности и энергии генерируемых импульсов в спектральной области $\sim 1,55$ мкм [72–74] (рис. 5).

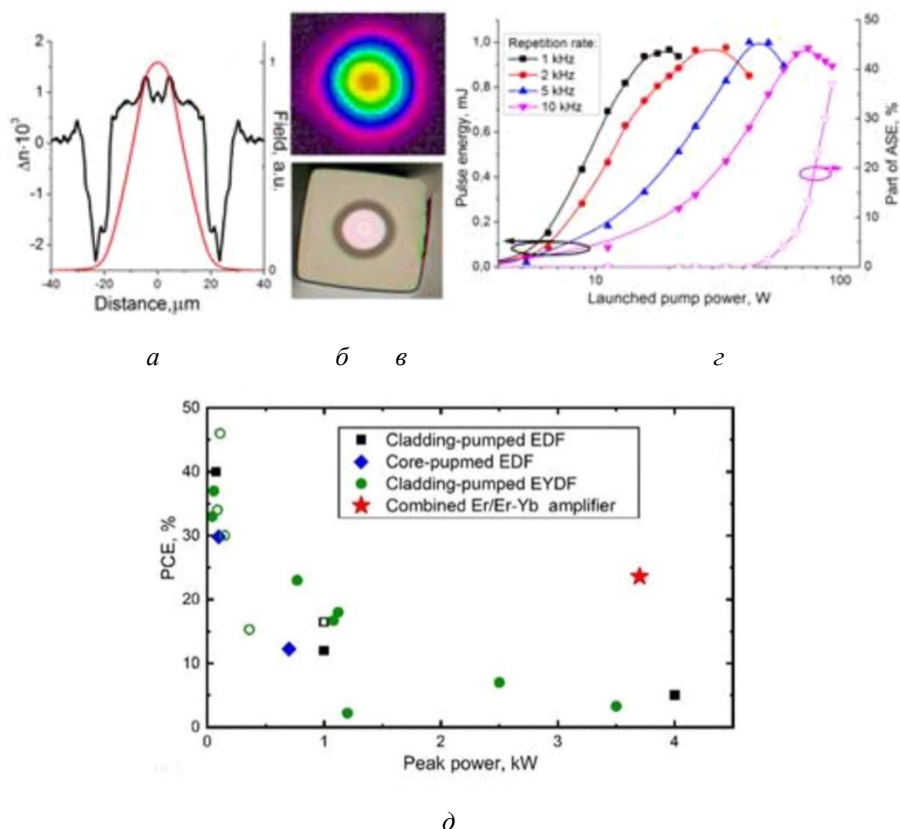


Рис. 5. Активные эрбиевые световоды с увеличенным диаметром сердцевины: *а* – профиль показателя преломления и распределение электрического поля в созданном эрбиевом световоде с накачкой по оболочке; *б* – изображение моды в ближнем поле, сделанное при максимальной выходной мощности; *в* – изображение торца эрбиевого световода с накачкой по оболочке; *г* – зависимость выходной энергии от введенной мощности накачки для разных частот повторения (продемонстрирована рекордно высокая энергия на уровне 1 мДж [72]); *д* – зависимость эффективности преобразования накачки в сигнал для предельных пиковых мощностей одночастотных импульсов, достигнутых с помощью разных технологий: черные квадраты (заполненные и пустые) – результаты, полученные с помощью разработанных в НЦВО РАН эрбиевых световодов с накачкой по оболочке (получена рекордно высокая пиковая мощность 4 кВт [73]), красная звезда – разработанный в НЦВО РАН комбинированный усилитель, содержащий эрбиевый световод с накачкой по оболочке и эрбий-иттербиевый световод (продемонстрирована рекордно высокая эффективность преобразования накачки в сигнал для предельно высокой пиковой мощности [74])

Использование фосфоалюмосиликатной матрицы позволило также существенно усовершенствовать конструкцию активных конусных ВС, в первую очередь иттербиевых. Это позволило продемонстрировать рекордно высокие пиковые мощности в полностью волоконных импульсных волоконных лазерах для спектрального диапазона ~ 1 мкм [75, 76] (рис. 6).

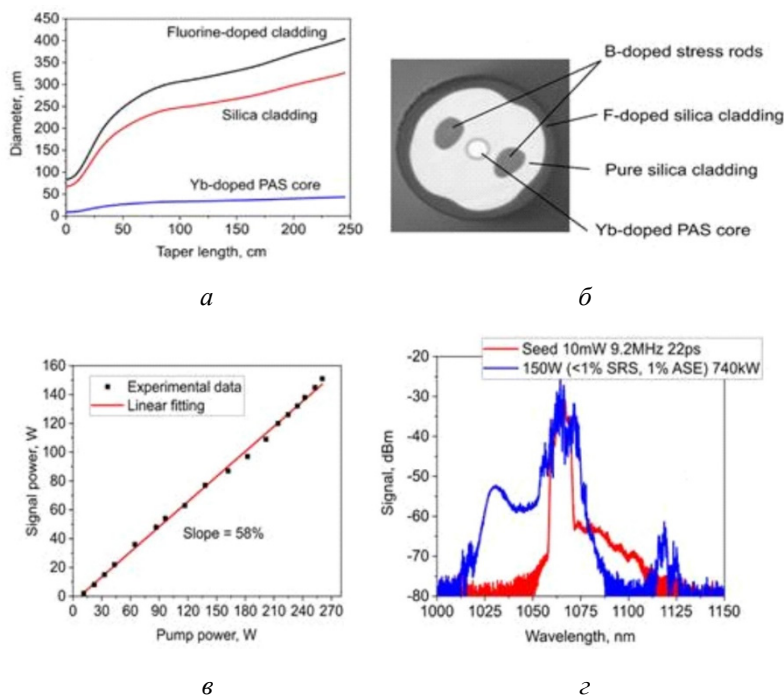


Рис. 6. Активный конусный волоконный световод: *а* – распределение диаметра внешней оболочки, первой отражающей оболочки и сердцевины по длине конусного световода; *б* – изображение торца световода; *в* – зависимость выходной мощности от мощности накачки на выходе конусного световода; *г* – спектр усиленного и усиленного импульсного сигнала на входе и на выходе конусного световода [76]

В НЦВО РАН совместно с ИХВВ РАН в 2005 году впервые в мире разработаны висмутовые ВС, на основе которых были созданы волоконные лазеры, генерирующие в области длин волн 1140–1215 нм [77]. НЦВО РАН является мировым лидером в данной области. За прошедшее время в Центре проведен ряд пионерских работ, качественно изменивших современное представление о структуре висмутовых активных центров (ВАЦ): установлены взаимосвязи ВАЦ с легирующими добавками и параметрами технологического процесса; определены

энергетические диаграммы ВАЦ; выявлены закономерности и особенности их формирования. В результате проделанной работы был создан совершенно новый тип висмутовых ВС, способных усиливать и генерировать излучение в широкой области ближнего ИК-диапазона (1260–1775 нм) [78–82]. На основе таких висмутовых световодов были разработаны эффективные волоконные усилители для O (1260–1360 нм), E (1360–1460 нм), S (1460–1530 нм) и U (1625–1675 нм) телекоммуникационных диапазонов, востребованных для активно развивающейся в мире технологии multi-wavelength-band, предполагающей увеличение пропускной способности линии связи за счёт задействования дополнительных спектральных диапазонов (рис. 7). Усилители на основе висмутовых ВС обладают широким спектром оптического усиления (с возможностью его расширения до 200 нм) при низком шум-факторе <math>< 5-7 \text{ дБ}</math> [83, 84], а также высоким быстродействием и слабой чувствительностью к температурным колебаниям. Усилители на висмутовых ВС просты в конструкции и использовании; они построены по современным стандартам с использованием широкодоступных оптических компонентов, включая одномодовые и многомодовые полупроводниковые лазерные диоды. Усилитель может быть эффективно интегрирован в существующие системы оптической связи. Все это и определяет все возрастающий интерес к усилителям на основе висмутовых ВС со стороны крупных телекоммуникационных компаний, занимающихся созданием конечного коммерческого продукта.

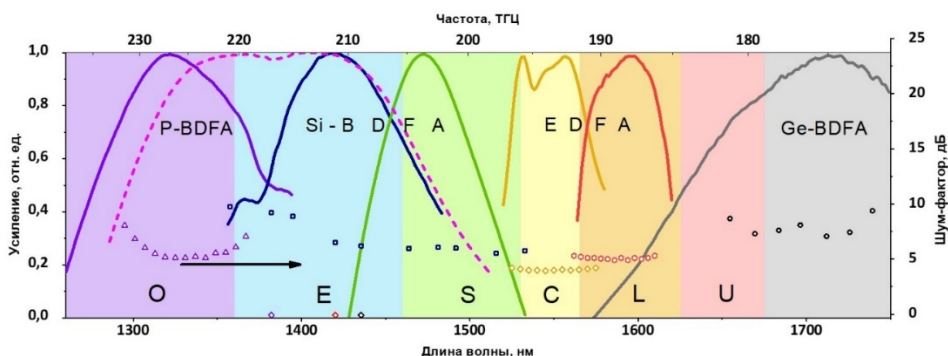


Рис. 7. Спектральные зависимости нормированного усиления и шум-фактора висмутовых (BDFA) и эрбиевых (EDFA) волоконных усилителей

Исследован эффект катастрофического разрушения ВС из-за оптического разряда (“fuse effect”) (рис. 8), который может происходить при

передаче по ВС лазерного излучения мощностью всего ~ 1 Вт, т.е. лишь в 2 раза большей, чем мощность в современных ВОЛС. Нами впервые установлен физический механизм эффекта и предложены способы его подавления. Также впервые исследован эффект разрушения под действием лазерного излучения ВС с полый сердцевинной [85, 86].

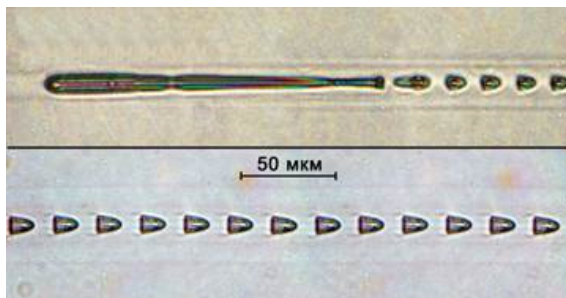


Рис. 8. Фотография структуры пустот в сердцевине стандартного коммуникационного световода на основе кварцевого стекла после распространения оптического разряда под действием лазерного ИК излучения мощностью 5 Вт; вверху – область точки остановки разряда после выключения лазера, внизу – периодическая последовательность пустот вдали от точки остановки; лазерное излучение распространялось слева направо

Проведены пионерские исследования по оптимизации технологии пассивных радиационно-стойких ВС для ближнего ИК диапазона ($\lambda = 1,31$ и $1,55$ мкм). Впервые определены радиационные центры окраски, ответственные за радиационно-индуцированное поглощение света в ближнем ИК-диапазоне, подробно описаны их свойства. Определены пути их подавления путем оптимизации технологических параметров. Разработанные радиационно-стойкие ВС проявляют стойкость одновременно и к непрерывному, и к импульсному воздействию ионизирующего излучения, а также перспективны для применения в ядерных реакторах [87–89].

Таким образом, в НЦВО РАН разработан комплекс научно-технических и технологических решений по получению ВС, стойких к воздействию водорода и ионизирующего излучения, в том числе при повышенных температурах. Работоспособность при повышенных температурах определяется материалом защитных покрытий: углеродным подслоем и термостойким покрытием из силиконовой резины (до 200 °С), полиимидным лаком (до 300 °С), алюминием (до 450 °С) или медью (до 600 °С). Разработанные ВС востребованы для разных видов

применения в системах волоконно-оптической связи и волоконно-оптических датчиках, подвергающихся воздействию высоких температур, агрессивных сред и ионизирующих излучений (в нефтегазовой промышленности, в ядерных и термоядерных реакторах, внутри объектов с ядерной опасностью, АЭС, на космических аппаратах, в вооружениях, в военной и специальной технике и др.). При участии НЦВО РАН мелкосерийное производство таких световодов организовано в ПНППК.

В последнее время средний ИК-диапазон приобрел особую актуальность из-за его востребованности в фундаментальной и прикладной спектроскопии (включая спектральные приборы для исследования космоса), в медицинских и промышленных датчиках. В Центре были получены яркие результаты по созданию лазерных источников и ВС с малыми потерями для этого диапазона (халькогенидных, поликристаллических и револьверных полых).

В 2009 году совместно с ИХВВ РАН нами получены волоконные световоды из халькогенидных стекол системы As-S с оптическими потерями 12 ± 2 дБ/км на длине волны 3 мкм и 14 ± 2 дБ/км на 4,8 мкм [90] – результат, который не достигнут до сих пор нигде в мире.

Совместно с ИПТМ РАН исследованы оптические свойства низкофононных кристаллов, легированных редкоземельными ионами. В результате в 2006 году впервые в мире была продемонстрирована лазерная генерация на электронном переходе иона трёхвалентного диспрозия ${}^6\text{H}_{9/2} + {}^6\text{F}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{11/2}$, самая длинноволновая для твердотельных лазеров при нормальных климатических условиях ($\lambda = 5,5$ мкм при комнатной температуре и в негигроскопичной среде) [91] (рис. 9).

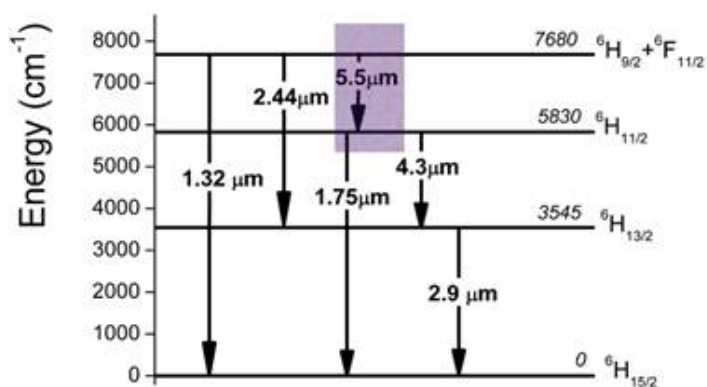


Рис. 9. Схема инфракрасных излучательных электронных переходов примесного иона Dy^{3+} ; выделен цветом реализованный нами переход на $\lambda = 5,5$ мкм

Совместно с ИОФ РАН и ИХВВ РАН впервые в мире была получена лазерная генерация в халькогенидных стеклах, активированных редкоземельными элементами (Tb, Pr, Ce, Nd), в диапазоне длин волн 4,5–6,5 мкм [92–95]. Также впервые в мире совместно с учеными ИХВВ РАН и ИОФ РАН была получена лазерная генерация в халькогенидных ВС, активированном ионами Tb и Ce, и продемонстрирован непрерывный волоконный лазер мощностью 150 мВт при комнатной температуре [96] (рис. 10). Немаловажно, что эти результаты ни у кого в мире не получились повторить.

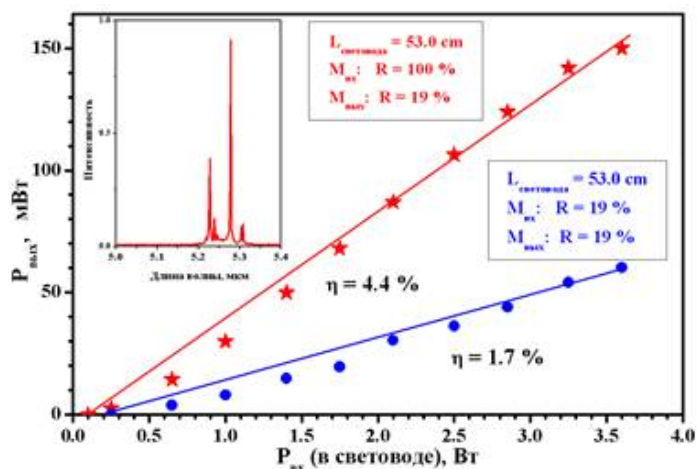


Рис. 10. Зависимость выходной мощности халькогенидного волоконного лазера от мощности накачки; на вставке – спектр лазера

Исследования по рамановскому преобразованию излучения в револьверных полых ВС с сердцевинкой, заполненной легкими молекулярными газами (H_2 , D_2 и CH_4), позволили продемонстрировать эффективные рамановские газовые волоконные лазеры, генерирующие нано- и пикосекундные импульсы на длинах волн вплоть до $\lambda = 4,4 \text{ мкм}$ [97, 98] (рис. 11).

Исследовано зажигание и поддержание газового разряда в револьверных ВС, заполненных различными благородными газами (He, Ne, Kr, Xe), под действием электрического поля СВЧ диапазона (рис. 12). В результате, впервые в мире реализован новый тип лазеров – газоразрядный волоконный лазер. В качестве первого представителя этого типа лазеров продемонстрирована генерация волоконного He-Xe лазера на длине волны 2,03 мкм [99]. Полученный результат открывает новые

перспективы для создания газоразрядных волоконных лазеров, которые сочетают в себе преимущества как волоконных, так и газоразрядных лазеров и могут найти применение в различных областях науки и техники.

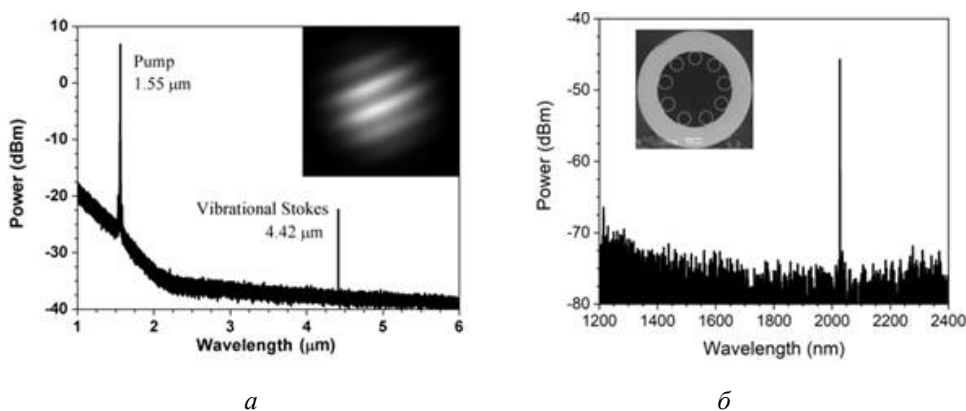


Рис. 11. Спектр генерации рамановского газового волоконного лазера (а) на основе револьверного световода, заполненного водородом; средняя мощность генерации на длине волны 4,42 мкм составила 1,4 Вт [97]; на вставке показано одномодовое распределение выходной мощности на 4,42 мкм, промодулированное интерференцией на входном окошке камеры. Спектр генерации первого в мире газоразрядного волоконного лазера (б); получена генерация на длине волны 2,03 мкм на переходах атомов ксенона, заполняющих полую сердцевину [99]; на вставке показано фото поперечного сечения револьверного световода

Впервые в мире методом экструзии получены поликристаллические ВС из кристаллов галогенидов серебра AgCl-AgBr-AgI с фундаментальными оптическими потерями менее 50 дБ/км в диапазоне длин волн 9–14 мкм. Разработаны технологии изготовления микро- и наноструктурированных экструзионных световодов для среднего ИК диапазона 3–16 мкм с невозрастающими оптическими потерями за время свыше 3 лет.

Совместной экструзией получены микро- и наноструктурированные световоды из составных заготовок различного состава галогенидов серебра, меди, калия, натрия, лития, таллия и вставок различной природы (металлы, полупроводники) и формы, в том числе фотоннокристаллические ВС для среднего ИК [100, 101].

Всего за историю группы, сектора, лаборатории волоконной оптики ФИАН и ИОФАН и самого НЦВО РАН сотрудниками было защищено 15 докторских и 104 кандидатские диссертации, получены две государственные премии. Сотрудники ИХВВ РАН защитили за это время 17 диссертаций по волоконной тематике, из них 4 – докторские.

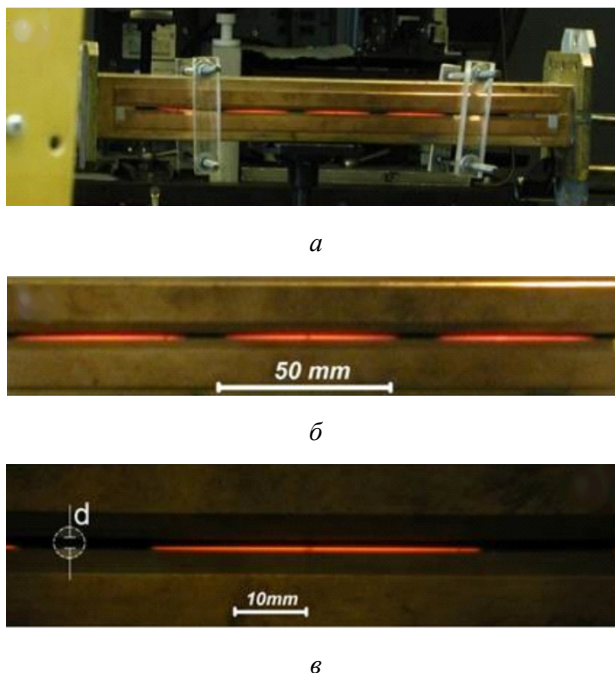


Рис. 12. Зажигание и поддержание газового разряда в револьверных ВС, заполненных различными благородными газами (He, Ne, Kr, Xe), под действием электрического поля СВЧ диапазона: внешний вид (а) первого в мире волоконного газоразрядного лазера на световоде с поллой сердцевинной диаметром 130 мкм [99]; обзорное фото свечения газового разряда (б) в световоде с поллой сердцевинной под действием стоячей волны СВЧ излучения; световод с поллой сердцевинной (в) расположен на нижнем крае щели в боковой стенке СВЧ волновода; в левой части показана ширина щели в данном эксперименте, $d = 1,5$ мм

В НЦВО РАН всегда было много молодых ученых даже не столько из Москвы, сколько из регионов – лучших выпускников университетов Саранска, Волгограда, Хабаровска и других городов России.

Ученые Центра неизменно, даже в самые трудные 1990-е годы, представляли доклады и участвовали в ведущих международных научных конференциях, таких как Optical Fiber Communication (OFC), European Conference on Optical Communication (ECOC), Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), International Congress on Glass (ICG) и др.

По публикационной активности в области волоконной оптики НЦВО РАН является лидером в России. При этом качество и, следовательно, востребованность наших публикаций достаточно высоки – в среднем каждая статья или доклад на конференции цитируется более

10 раз. Приведем данные по основным наукометрическим источникам за период с 1993 по 2019 год.

Наименование	Scopus	Web of Science	РИНЦ
Число публикаций	1537	1285	1770
Число цитирований	16028	14946	16006
Индекс Хирша	55	51	56

НЦВО РАН всегда имел внебюджетное финансирование и выполнял НИР и НИОКР по заказу министерств, агентств, промышленных и инновационных предприятий, таких как Минобороны, Минобрнауки, Минромторг, ФАПСИ, Росатом, НИЦ «Курчатовский институт», ПНППК, НЦВО-Фотоника, РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, ВНИИА им. Н.Л. Духова, ЛАССАРД, ВНИИКП, КБМ, «ИРЭ-Полус». В числе зарубежных заказчиков НЦВО РАН были такие компании, как Huawei, IPG-Photonics, Corning, Samsung Electronics, Fianium, MPB-Photonics, AT&T Bell Labs, Alcatel, Pirelli, Nortel, SCK•CEN Belgian Nuclear Research Center, NKT Photonics и другие.

НЦВО РАН осуществляет научное сопровождение российских инновационных предприятий ПНППК и «НЦВО-Фотоника» и внедряет в них свои технологии и ноу-хау.

Начиная с 2007 года, раз в два года в Перми проводится Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО), организуемая Институтом общей физики им. А.М. Прохорова, Научным центром волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН и Пермской научно-производственной приборостроительной компанией (ПНППК) при поддержке Пермского научно-исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ) и Центра НТИ "Фотоника". Основатель конференции – академик Е.М. Дианов. ВКВО является ключевым научно-техническим мероприятием в области фотоники, стимулирующим развитие волоконной оптики и смежных дисциплин в России.

В 2014 году при поддержке НЦВО РАН в Пермском национальном исследовательском политехническом университете был основан научный журнал «Прикладная фотоника», в котором среди других авторов публикуют результаты своих исследований и ученые Центра [.....]. Журнал постепенно становится основным научным изданием России в области волоконной оптики.

В 2017 году Е.М. Дианов был удостоен премии Тиндаля, вручаемой совместно Обществом «IEEE Photonics Society» и Американским оптическим обществом (OSA) ежегодно одному ученому, внесшему наибольший вклад в развитие волоконно-оптической технологии.

В январе 2019 года Е.М. Дианов ушел из жизни. С 2020 года НЦВО РАН «вернулся в родную гавань», получив статус обособленного подразделения ИОФ РАН.

Оглядываясь назад, понимаешь, что Е.М. Дианову при поддержке А.М. Прохорова удалось создать уникальный научный коллектив-семью – НЦВО РАН, который по показателям результативности всегда занимал одно из первых мест среди институтов Отделения физических наук РАН. У нас не задерживались случайные люди, не возникали конфликты интересов между лабораториями, между учеными и вспомогательными подразделениями, которые, в свою очередь, никогда ничего не пытались диктовать ученым. Научные сотрудники, аспиранты, инженеры, механическая и оптическая мастерские и все вспомогательные службы были объединены духом совместного труда и творчества для достижения одной общей цели. Только в таком коллективе, в такой атмосфере и могут, наверное, достигаться высокие научные результаты!

НЦВО РАН продемонстрировал оптимальную структуру научного центра в современных условиях – самостоятельный сплоченный коллектив из 70–80 человек во главе с харизматичным ученым-организатором науки, беззаветно ей преданным.

На май 2023 года в НЦВО РАН – обособленном подразделении ИОФ РАН – работают 67 штатных сотрудников, включая 42 научных работника, из которых 25 – кандидаты наук, 5 – доктора наук, 2 ученых – члены-корреспонденты РАН. В Центре сейчас 6 аспирантов.

Благодаря школе академика Е.М. Дианова, высокой квалификации сотрудников и сложившемуся в коллективе духу НЦВО РАН и сейчас остается одним из ведущих научных центров в области волоконной оптики в мире.

Авторы выражают признательность сотрудникам НЦВО РАН, внесшим вклад в создание этой статьи: М.И. Беловолову, М.М. Бубнову, Л.Н. Бутвине, И.А. Буфетову, С.А. Васильеву, А.В. Гладышеву, Л.Д. Исхаковой, В.В. Колташеву, М.Е. Лихачеву, В.М. Машинскому, М.А. Мелькумову, А.Г. Охримчуку, В.Г. Плотниченко, К.Е. Рюмкину, А.К. и С.В. Фирстову.



Список литературы

1. Исследование волоконно-оптических систем для связи блоков ЭВМ / М.И. Беловолов, М.М. Бубнов, А.Н. Гурьянов, Г.Г. Девярых, Е.М. Дианов, В.И. Пелипенко, А.М. Прохоров, И.Н. Сисакян // Квантовая электроника. – 1977. – Т. 4, № 11. – С. 2456–2459.

2. Волоконно-оптическая линия передачи сигналов для систем дальней связи на длине волны 1,3 мкм / Ж.И. Алферов, М.И. Беловолов, А.Т. Гореленок, А.Н. Гурьянов, Г.Г. Девярых, Е.М. Дианов, А.Я. Карасик, В.И. Колышкин, П.С. Копьев, А.М. Прохоров, А.С. Юшин // Квантовая электроника. – 1978. – Т. 5, № 11. – С. 2486–2488.

3. Ultraviolet radiation- and γ - radiation-induced color centers in germanium-doped silica glass and fibers / V.B. Neustruev, E.M. Dianov, V.M. Kim, V.M. Mashinsky, M.V. Romanov, A.N. Guryanov, V.F. Khopin, V.A. Tikhomirov // Fiber and Integrated Optics. – 1989. – Vol. 8, № 2. – P. 143–156.

4. Neustruev, V.B. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres / V.B. Neustruev // *J. Phys.: Condens Matter.* – 1994. – Vol. 6. – P. 6901–6936.

5. Spectroscopic manifestations of self-trapped holes in silica: theory and experiment / P.V. Chernov, E.M. Dianov, V.N. Karpechev, L.S. Kornienko, I.O. Morozova, A.O. Rybaltovskii, V.O. Sokolov, V.B. Sulimov // *Phys. Stat. Sol. (b).* – 1989. – Vol. 155. – P. 663–675.

6. Effects of exposure to photons of various energies on transmission of germanosilicate optical fiber in the visible to near IR spectral range / E.A. Anoikin, V.M. Mashinsky, V.B. Neustruev, Y.S. Sidorenko // *J. Non-Crystalline Solids.* – 1994. – Vol. 179. – P. 243–253.

7. Dianov, E.M. Semiempirical calculations of point-defects in silica. Oxygen vacancy and twofold coordinated silicon atom / E.M. Dianov, V.O. Sokolov, V.B. Sulimov // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 1992. – Vol. 149. – P. 5–18.

8. UV-irradiation-induced structural transformation of germanosilicate glass fiber / E.M. Dianov, V.G. Plotnichenko, V.V. Koltashev, Y.N. Pyrkov, N.H. Ky, H.G. Limberger, R.P. Salathé // *Optics Letters.* – 1997. – Vol. 22. – P. 1754–1756.

9. Bogatyryov, V.A. The effect of temperature on transmission properties of super-high strength aluminum-coated optical fibres / V.A. Bogatyryov, S.D. Rumyantsev, C.R. Kurkjian // *Soviet Lightwave Communications.* – 1992. – Vol. 2. – P. 339–345.

10. Super-high-strength metal-coated optical fibres / V.A. Bogatyryov, E.M. Dianov, S.D. Rumyantsev, A.Y. Makarenko, S.L. Semjonov, A.A. Sysolyatin // *Soviet Lightwave Communications.* – 1991. – Vol. 1. – P. 227–234.

11. Copper-coated optical fibers / V.A. Bogatyryov, E.M. Dianov, S.D. Rumyantsev, A.A. Sysolyatin // *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication (OFC'93).* – P. WA4. – 1993.

12. Dual hermetically coated optical fibers with strength of 9 GPa / M.M. Bubnov, E.M. Dianov, A.M. Prokhorov, S.L. Semjonov, C.R. Kurkjian // *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication (OFC'92).* – P. PD22. – 1992.

13. Динамическая оперативная память на волоконных световодах / М.И. Беловолов, Н.И. Головин, Т.Н. Головина, Е.М. Дианов, В.И. Карпов, А.П. Крюков, А.А. Кузнецов, А.М. Прохоров // *Квантовая электроника.* – 1985. – Т. 12, № 1. – С. 214–216.

14. Mamyshev, P.V. Generation of fundamental soliton trains for high-bit-rate optical fiber communication lines / P.V. Mamyshev, S.V. Chernikov, E.M. Dianov // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1991. – Vol. 27. – P. 2347–2355.

15. Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers / E.M. Dianov, P.V. Mamyshev, A.M. Prokhorov, S.V. Chernikov // *Optics Letters*. – 1989. – Vol. 14. – P. 1008–1010.

16. Soliton pulse-compression in dispersion-decreasing fiber / S.V. Chernikov, E.M. Dianov, D.J. Richardson, D.N. Payne // *Optics Letters*. – 1993. – Vol. 18. – P. 476–478.

17. Mutual influence of the parametric effects and stimulated Raman-scattering in optical fibers / E.A. Golovchenko, P.V. Mamyshev, A.N. Pilipetskii, E.M. Dianov // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1990. – Vol. 26. – P. 1815–1820.

18. Stimulated-Raman conversion of multisoliton pulses in quartz optical fibers / E.M. Dianov, A.Y. Karasik, P.V. Mamyshev, M. Prokhorov, V.N. Serkin, M.F. Stelmakh // *JETP Letters*. – 1985. – Vol. 41. – P. 294–297.

19. Decay of optical solitons / E.A. Golovchenko, E.M. Dianov, A.M. Prokhorov, V.N. Serkin // *JETP Letters*. – 1985. – Vol. 42. – P. 87–91.

20. Electrostriction mechanism of soliton interaction in optical fibers / E.M. Dianov, A.V. Luchnikov, A.N. Pilipetskii, A.N. Starodumov // *Optics Letters*. – 1990. – Vol. 15. – P. 314–316.

21. Generation of soliton pulse train in optical fiber using 2 cw single-mode diode-lasers / S.V. Chernikov, P.V. Mamyshev, E.M. Dianov [et al.] // *Electronics Letters*. – 1992. – Vol. 28. – P. 931–932.

22. Afanasjev, V.V. Nonlinear pairing of short bright and dark soliton pulses by phase cross modulation / V.V. Afanasjev, E.M. Dianov, V.N. Serkin // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1989. – Vol. 25. – P. 2656–2664.

23. Picosecond soliton pulse compressor based on dispersion decreasing fiber / S.V. Chernikov, D.J. Richardson, E.M. Dianov, D.N. Payne // *Electronics Letters*. – 1992. – Vol. 28. – P. 1842–1844.

24. Long-range interaction of picosecond solitons through excitation of acoustic-waves in optical fibers / E.M. Dianov, A.V. Luchnikov, A.N. Pilipetskii, A.M. Prokhorov // *Applied Physics B*. – 1992. – Vol. 54. – P. 175–180.

25. Adiabatic-compression of Schrodinger solitons due to the combined perturbations of higher-order dispersion and delayed nonlinear response / P.V. Mamyshev, P.G.J. Wigley, J. Wilson, G.I. Stegeman, V.A. Semenov,

E. Dianov, S.I. Miroshnichenko // *Physical Review Letters*. – 1993. – Vol. 71. – P. 73–76.

26. Bulushev, A.G. Self-starting mode-locked laser with a nonlinear ring resonator / A.G. Bulushev, E.M. Dianov, O.G. Okhotnikov // *Optics Letters*. – 1991. – Vol. 16. – P. 88–90.

27. 70 Gbit/s fiber based source of fundamental solitons at 1550 nm / S.V. Chernikov, E.M. Dianov, D.J. Richardson, R.I. Laming, D.N. Payne // *Electronics Letters*. – 1992. – Vol. 28. – P. 1210–1212.

28. Нелинейное переключение оптических импульсов за счет ВКР-саморассеяния солитонов в световодах / А.Н. Стародумов // *Квантовая электроника*. – 1993. – Т. 20, № 5. – С. 500–502.

29. Возбуждение звуковых волн при распространении лазерных импульсов в волоконных световодах / А.С. Бирюков, М.Е. Сухарев, Е.М. Дианов // *Квантовая электроника*. – 2002. – Т. 32, № 9. – С. 765.

30. A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length / V.A. Bogatyrev, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, A.S. Kurkov, P.V. Mamyshv, A.M. Prokhorov, S.D. Romyantsev, V.A. Semenov, S.L. Semenov, A.A. Sysoliatin // *Journal of Lightwave Technology*. – 1991. – Vol. 9. – P. 561–566.

31. Волоконно-оптический ВКР-усилитель сигналов на длине волны 1,3 мкм / Е.М. Дианов, Д.Г. Фурса, А.А. Абрамов, М.И. Беловолов, М.М. Бубнов, А.В. Шипулин, А.М. Прохоров, Г.Г. Девятых, А.Н. Гурьянов, В.Ф. Хопин // *Квантовая электроника*. – 1994. – Т. 21, № 9. – С. 807–809.

32. Low-loss high germania-doped fiber: A promising gain medium for 1.3 μm Raman amplifier / E.M. Dianov, D.G. Fursa, A.A. Abramov, M.I. Belovolov, M.M. Bubnov, A.V. Shipulin, A.M. Prokhorov, G.G. Devyatykh, A.N. Gur'yanov, V.F. Khopin // *Proceedings of the 20th European Conference on Optical Communication (ECOC)*. – 1994. – Vol. 1. – P. 427.

33. On the origin of excess loss in highly GeO₂-doped single-mode MCVD fibers / M.M. Bubnov, S.L. Semjonov, M.E. Likhachev, E.M. Dianov, V.F. Khopin, M.Yu. Salganskii, A.N. Guryanov, J.C. Fajardo, D.V. Kuksenkov, J. Koh, P. Mazumder // *IEEE Photon. Technol. Letters*. – 2004. – Vol. 16. – P. 1870.

34. Волоконные ВКР-лазеры на световоде с высоким содержанием оксида германия в сердцевине / Е.М. Дианов, И.А. Буфетов, В.М. Машинский, А.В. Шубин, О.И. Медведков, А.Е. Ракитин, М.А. Мелькумов,

В.Ф. Хопин, А.Н. Гурьянов // *Квантовая электроника*. – 2005. – Т. 35, № 5. – С. 435–441.

35. Dianov, E.M. Germania-based core optical fibers / E.M. Dianov, V.M. Mashinsky // *J. Lightwave Technology*. – 2005. – Vol. 23, № 11. – P. 3500–3508.

36. Камынин, V.A. Supercontinuum generation up to 2.7 micrometer in the germanate-glass-core and silica-glass-cladding fiber / V.A. Kamynin, A.S. Kurkov, V.M. Mashinsky // *Laser Physics Letters*. – 2012. – Vol. 9, № 3. – P. 219–222.

37. Fabrication and investigation of single-mode highly phosphorus-doped fibers for Raman lasers / M.M. Bubnov, E.M. Dianov, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.N. Guryanov, V.F. Khopin, E.M. DeLiso // *Proc. SPIE*. – 2000. – Vol. 4083. – P. 12–22.

38. CW high power 1.24 μm and 1.48 μm Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre / E.M. Dianov, M.V. Grekov, I.A. Bufetov, S.A. Vasiliev, O.I. Medvedkov, V.G. Plotnichenko, V.V. Koltashev, A.V. Belov, M.M. Bubnov, S.L. Semjonov, A.M. Prokhorov // *Electronics Letters*. – 1997. – Vol. 33, № 18. – P. 1542–1544.

39. Three-cascaded 1407-nm Raman laser based on phosphorus-doped silica fiber / E.M. Dianov, I.A. Bufetov, M.M. Bubnov, M.V. Grekov, S.A. Vasiliev, O.I. Medvedkov // *Optics Letters*. – 2000. – Vol. 25. – P. 402–404.

40. К вопросу о фотоиндуцированной ГВГ в оптических волокнах / Е.М. Дианов, П.Г. Казанский, Д.Ю. Степанов // *Квантовая электроника*. – 1989. – Т. 16. – С. 887–888.

41. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers / A. Canagasabey, C. Corbari, A.V. Gladyshev, F. Liegeois, S. Guillemet, Y. Hernandez, M.V. Yashkov, A. Kosolapov, E.M. Dianov, M. Ibsen, P.G. Kazansky // *Optics Letters*. – Vol. 34. – P. 2483–2485.

42. All-fiber frequency-doubled visible laser / C. Corbari, A.V. Gladyshev, L. Lago, M. Ibsen, Y. Hernandez, P.G. Kazansky // *Optics Letters*. – 2014. – Vol. 39, № 22. – P. 6505–6508.

43. Turn-key diode-pumped all-fiber broadband polarization-entangled photon source / C. Chen, A. Riazzi, E.Y. Zhu, M. Ng, A.V. Gladyshev, P.G. Kazansky, L. Qian // *OSA Continuum*. – 2018. – Vol. 1, № 3. – P. 981–986.

44. Biphoton shaping with cascaded entangled-photon sources / A. Riazzi, C. Chen, E.Y. Zhu, A.V. Gladyshev, P.G. Kazansky, J.E. Sipe, Li Qian // *npj Quantum Information*. – 2019. – Vol. 5, P. 77.

45. Low-hydrogen silicon oxynitride optical fibers prepared by SPCVD / E.M. Dianov, K.M. Golant, A.S. Kurkov, R.R. Khrapko, A.L. Tomashuk // *Journal of Lightwave Technology*. – 1995. – Vol. 13. – P. 1471–1474.

46. Radiation-induced absorption and luminescence in specially hardened large-core silica optical fibers / A.L. Tomashuk, K.M. Golant, E.M. Dianov, O.I. Medvedkov, O.A. Plaksin, V.A. Stepanov, P.A. Stepanov, P.V. Demenkov, V.M. Chernov, S.N. Klyamkin // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. – 2000. – Vol. 47, № 3. – P. 693–698.

47. Беловолов, М.И. Теорема сравнительной чувствительности волоконных датчиков / М.И. Беловолов, В.М. Парамонов, М.М. Беловолов // *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47, № 12. – С. 1128–1134.

48. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region > 3.5 μm / A.D. Pryamikov, A.S. Biriukov, A.F. Kosolapov, V.G. Plotnichenko, S.L. Semjonov, E.M. Dianov // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – P. 1441–1448.

49 Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region / A.N. Kolyadin, A.F. Kosolapov, A.D. Pryamikov, A.S. Biriukov, V.G. Plotnichenko, E.M. Dianov // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 9514–9519.

50. Револьверный световод с полой сердцевинной и отражающей оболочкой из двойных капилляров / А.Ф. Косолапов, Г.К. Алагашев, А.Н. Колядин, А.Д. Прямиков, А.С. Бирюков, И.А. Буфетов, Е.М. Дианов // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46. – С. 267–270.

51. Post-fabrication resonance peak positioning of long-period cladding-mode-coupled gratings / S.A. Vasiliev, E.M. Dianov, D. Varelas, H. Limberger, R.P. Salathe // *Optics Letters*. – 1996. – Vol. 21, № 22. – P. 1830–1832.

52. Refractive-index gratings written by near-ultraviolet radiation / E.M. Dianov, D.S. Starodubov, S.A. Vasiliev, A.A. Frolov, O.I. Medvedkov // *Optics Letters*. – 1997. – Vol. 22. – P. 221–223.

53. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings / E.M. Dianov, S.A. Vasiliev, A.S. Kurkov, O.I. Medvedkov, V.N. Protopopov // *Proceedings of the 22nd European Conference on Optical Communication (ECOC)*. – 1996. – Vol. 1. – P. 65–68.

54. Refractive index gratings written by near-UV radiation / E.M. Dianov, D.S. Starodubov, S.A. Vasiliev, A.A. Frolov, O.I. Medvedkov // *Optics Letters*. – 1997. – Vol. 22, № 4. – P. 221–223.

55. Волоконные решетки показателя преломления и их применения / С.А. Васильев, О.И. Медведков, И.Г. Королев, А.С. Божков, А.С. Курков, Е.М. Дианов // *Квантовая Электроника*. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085–1103.

56. Measurement of high-birefringent spun fiber parameters using short-length fiber Bragg gratings / S.A. Vasiliev, Ya.V. Przhiyalkovsky, P.I. Gnusin, O.I. Medvedkov, E.M. Dianov // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, № 11. – P. 11290–11298.

57. Helical Bragg gratings: experimental verification of light orbital angular momentum conversion / A.G. Okhrimchuk, V.V. Likhov, S.A. Vasiliev, A.D. Pryamikov // *Journal of Lightwave Technology*. – 2022. – Vol. 40, № 8. – P. 2481–2488.

58. Эффективный неодимовый одномодовый волоконный лазер, работающий в области 0.9 мкм / И.А. Буфетов, В.В. Дудин, А.В. Шубин, А.К. Сенаторов, Е.М. Дианов, А.Б. Грудинин, С.Е. Гончаров, И.Д. Залевский, А.Н. Гурьянов, М.В. Яшков, А.А. Умников, Н.Н. Вечканов // *Квантовая электроника*. – 2003. – Т. 33, № 12. – С. 1035–1037.

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

60. Efficient silica-based Ho³⁺ fibre laser for 2 μm spectral region pumped at 1.15 μm / A.S. Kurkov, E.M. Dianov, O.I. Medvedkov [et al.] // *Electronics Letters*. – 2000. – Vol. 36. – P. 1015–1016.

61. Laser-induced fluorescence of helium ions in ITER divertor / A.V. Gorbunov, E.E. Mukhin, E.B. Berik, M.A. Melkumov, N.A. Babinov, G.S. Kurskiev, S.Yu. Tolstyakov, K.Yu. Vukolov, V.S. Lisitsa, M.G. Levashova, P. Andrew, M. Kempenaars, G. Vayakis, M.J. Walsh // *Fusion Engineering and Design*. – 2019. – Vol. 146. – P. 2703–2706.

62. Эрбиевые световоды с повышенной стойкостью к ионизирующему излучению для суперлюминесцентных волоконных источников / А.А. Поносова, И.С. Азанова, Н.К. Миронов, М.В. Яшков, К.Е. Рюмкин, О.Л. Кель, Ю.О. Шаронова, М.А. Мелькумов // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49, № 7. – С. 693.

63. Radiation-resistant Er-doped fibers: optimization of pump wavelength / K.V. Zotov, M.E. Likhachev, A.L. Tomashuk, A.F. Kosolapov, M.M. Bubnov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2008. – Vol. 20, № 17. – P. 1476–1478.

64. Krylov, A.A. Gyroscopic effect detection in the colliding-pulse hybridly mode-locked erbium-doped all-fiber ring soliton laser / A.A. Krylov, D.S. Chernykh, E.D. Obraztsova // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42, № 13. – P. 2439–2442.

65. Thulium-doped mode-locked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber / M.A. Chernysheva, A.A. Krylov, P.G. Kryukov, N.R. Arutyunyan, A.S. Pozharov, E. D. Obraztsova, E.M. Dianov // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, № 26. – P. B124–B130.

66. Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber / M.A. Solodyankin, E.D. Obraztsova, A.S. Lobach, A.V. Chernov, A.V. Tausenev, V.I. Konov, E.M. Dianov // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33. – P. 1336–1338.

67. Performance peculiarities of carbon-nanotube based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser mode-locking / A.A. Krylov, S.G. Sazonkin, N.R. Arutyunyan, V.V. Grebenyukov, A.S. Pozharov, D.A. Dvoretzkiy, E.D. Obraztsova, E.M. Dianov // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2016. – Vol. 33, № 2. – P. 134–142.

68. Mode-locked Bi-doped fiber laser / E.M. Dianov, A.A. Krylov, V.V. Dvoyrin, P.G. Kryukov, V.M. Mashinsky, O.G. Okhotnikov, M. Guina // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2007. – Vol. 24, № 8. – P. 1807–1808.

69. Effect of the AlPO_4 join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers / M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, K.V. Zotov, D.S. Lipatov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34. – P. 3355–3357.

70. Large-mode-area highly Yb-doped photodarkening-free $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ -based fiber / M. Likhachev, S. Aleshkina, A. Shubin, M. Bubnov, E. Dianov, D. Lipatov, A. Guryanov // *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC)*. – 2011. – P. 1.

71. Properties of silica based optical fibers doped with an ultra-high Ytterbium concentration / K.K. Bobkov, E.K. Mikhailov, T.S. Zaushitsyna, A.A. Rybaltovsky, S.S. Aleshkina, M.A. Melkumov, M.M. Bubnov, D.S. Lipatov, M.V. Yashkov, A.N. Abramov, A.A. Umnikov, A.N. Guryanov, M.E. Likhachev // *Journal of Lightwave Technology*. – 2022. – Vol. 40, № 18. – P. 6230–6239.

72. Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser / L. Kotov, M. Likhachev, M. Bubnov, O. Medvedkov, D. Lipatov, A. Guryanov, K. Zaytsev, M. Jossent, S. Février // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40, № 7. – P. 1189–1192.

73. Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser / L.V. Kotov, M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, V.M. Paramonov, M.I. Belovolov, D.S. Lipatov, A.N. Guryanov // *Laser Physics Letters*. – 2014. – Vol. 11, № 9. – P. 095102.

74. Highly efficient 3.7 kW peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier / M.M. Khudyakov, D.S. Lipatov, A.N. Gur'yanov, M.M. Bubnov, M.E. Likhachev // *Optics Letters*. – 2020. – Vol. 45, № 7. – P. 1782–1785.

75. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped-pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier / K. Bobkov, A. Andrianov, M. Koptev, S. Muravyev, A. Levchenko, V. Velmiskin, S. Aleshkina, S. Semjonov, D. Lipatov, A. Guryanov, A. Kim, M. Likhachev // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25. – P. 26958–26972.

76. Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers / K. Bobkov, A. Levchenko, T. Kashaykina, S. Aleshkina, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Laptev, A. Guryanov, Y. Leventoux, G. Granger, V. Couderc, S. Février, M. Likhachev // *Optics Express*. – 2021. – Vol. 29. – P. 1722–1735.

77. Непрерывный висмутовый волоконный лазер / Е.М. Дианов, В.В. Двойрин, В.М. Машинский, А.А. Умников, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов // *Квантовая электроника*. – 2005. – Т. 35 – С. 1083–1084.

78. Dianov, E.M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers / E.M. Dianov // *Light: Science & Applications*. – 2012. – Vol. 1, № 5. – P. e12.

79. Bi-doped optical fibers and fiber lasers / I.A. Bufetov, M.A. Melkumov, S.V. Firstov, K.E. Riumkin, A.V. Shubin, V.F. Khopin, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 20. – P. 111.

80. Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8 μm / S.V. Firstov, S.V. Alyshev, K.E. Riumkin, A.M. Khagai, A.V. Kharakhordin, M.A. Melkumov, E.M. Dianov // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 24, № 5. – P. 1–15.

81. Recent advances in Bi-doped silica-based optical fibers: A short review / A.M. Khagai, S.V. Alyshev, A.S. Vakhrushev, K.E. Riumkin,

A.A. Umnikov, S.V. Firstov // *Journal of Non-Crystalline Solids: X.* – 2022. – Vol. 16. – P. 100126.

82. Impact of doping profiles on the formation of laser-active centers in bismuth-doped GeO₂–SiO₂ glass fibers / S. Alyshev, A. Vakhrushev, A. Khegai, E. Firstova, K. Riumkin, M. Melkumov, L. Iskhakova, A. Umnikov, S. Firstov // *Photonics Research.* – 2024. – Vol. 12, № 2. – P. 260–270.

83. Pump-efficient flattop O+E-bands bismuth-doped fiber amplifier with 116 nm –3 dB gain bandwidth / Y. Ososkov, A. Khegai, S. Firstov, K. Riumkin, S. Alyshev, A. Kharakhordin, A. Lobanov, A. Guryanov, M. Melkumov // *Opt. Express.* – 2021. – Vol. 29, № 26. – P. 44138–44145.

84. Wideband bismuth-and erbium-codoped optical fiber amplifier for C+ L+ U-telecommunication band / S.V. Firstov, K.E. Riumkin, A.M. Khegai, S.V. Alyshev, M.A. Melkumov, V.F. Khopin, F.V. Afanasiev, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Laser Physics Letters.* – 2017. – Vol. 14, № 11. – P. 110001.

85. Буфетов, И.А. Оптический разряд в волоконных световодах / И.А. Буфетов, Е.М. Дианов // *Успехи физических наук.* – 2005. – Т. 175, № 1. – С. 100–103.

86. Catastrophic damage in hollow core optical fibers under high power laser radiation / I.A. Bufetov, A.N. Kolyadin, A.F. Kosolapov, V.P. Efremov, V.E. Fortov // *Optics Express.* – Vol. 27, № 13. – P. 18296.

87. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica optical fibers at different temperatures / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, M.Yu. Salgansky, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *J. Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 121. – P. 213104.

88. Radiation resistance of single-mode optical fibres with view to in-reactor applications / P.F. Kashaykin, A.L. Tomashuk, S.A. Vasiliev, A.D. Ignatyev, A.A. Shaimerdenov, Yu.V. Ponkratov, T.V. Kulsartov, Y.A. Kenzhin, Sh. Kh. Gizatulin, T.K. Zholdybayev, Y.V. Chikhray, S.L. Semjonov // *Nuclear Materials and Energy.* – 2021. – Vol. 27. – P. 100981.

89. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica-core optical fibers / A.L. Tomashuk, A.V. Filippov, P.F. Kashaykin, E.A. Bychkova, S.V. Galanova, O.M. Tatsenko, N.S. Kuzyakina, O.V. Zverev, M.Yu. Salgansky, A.N. Abramov, A.N. Guryanov, E.M. Dianov // *Journal of Lightwave Technology.* – 2019. – Vol. 37, № 3. – P. 956–963.

90. High purity arsenic sulfide glasses and fibers with minimum attenuation of 12 dB/km / G.E. Snopatin, M.F. Churbanov, A.A. Pushkin, V.V. Gerasimenko, E.M. Dianov, V.G. Plotnichenko // *Optoelectron. Adv. Mat.* – 2009. – Vol. 3, № 7. – P. 669–671.

91. Optical spectroscopy of the RbPb₂Cl₅:Dy³⁺ laser crystal and oscillation at 5.5 μm at room temperature / A.G. Okhrimchuk, L.N. Butvina, E.M. Dianov, I.A. Shestakova, N.V. Lichkova, V.N. Zagorodnev, A.V. Shestakov // *Journal of Optical Society of America B.* – 2007. – Vol. 24, № 10. – P. 2690–2695.

92. First demonstration of similar to 5 μm laser action in terbium-doped selenide glass / M.F. Churbanov, B.I. Denker, B.I. Galagan, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov, S.E. Sverchkov, A.P. Velmuzhov // *Appl. Phys. B (Lasers and Optics)*. – 2020. – Vol. 126, № 7. – P. 117.

93. Laser potential of Pr³⁺ doped chalcogenide glass in 5-6 μm spectral range / M.F. Churbanov, B.I. Denker, B.I. Galagan, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, G.E. Snopatin, M.V. Sukhanov, S.E. Sverchkov, A.P. Velmuzhov // *Journal of Non-Crystalline Solids.* – 2021. – Vol. 559. – P. 120592.

94. Passively Q-switched 5-μm Ce³⁺-doped selenide glass laser using Fe: CdTe and Fe: CdSe as saturable absorbers / P. Fjodorow, M.P. Frolov, Y.V. Korostelin, V.I. Kozlovsky, S.O. Leonov, Y.K. Skasyrsky, B.I. Denker, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov, A.P. Velmuzhov // *Optics Letters.* – 2022. – Vol. 15. – P. 309–312.

95. Application of non-radiative energy transfer from Tb³⁺ to Nd³⁺ for pumping a 6 μm solid-state laser / B.I. Denker, M.P. Frolov, B.I. Galagan, V.V. Koltashev, V.G. Plotnichenko, M.V. Sukhanov, S.E. Sverchkov, A.P. Velmuzhov // *Journal of Luminescence.* – 2024. – Vol. 266. – P. 120288.

96. 150 mW Tb³⁺ doped chalcogenide glass fiber laser emitting at λ>5 μm / V.V. Koltashev, B.I. Denker, B.I. Galagan, G.E. Snopatin, M.V. Sukhanov, S.E. Sverchkov, A.P. Velmuzhov, V.G. Plotnichenko // *Optics & Laser Technology.* – 2023. – Vol. 161. – P. 109233.

97. Watt-level nanosecond 4.42-μm raman laser based on silica fiber / M.S. Astapovich, A.V. Gladyshev, M.M. Khudyakov, A.F. Kosolapov, M.E. Likhachev, I.A. Bufetov // *IEEE Photonics Technology Letters.* – 2019. – Vol. 31, № 1. – P. 78–81.

98. Mid-infrared 10-J-level sub-picosecond pulse generation via stimulated Raman scattering in a gas-filled revolver fiber / A. Gladyshev,

Yu. Yatsenko, A. Kolyadin, V. Kompanets, I. Bufetov // Opt. Mater. Express. – 2020. – Vol. 10. – P. 3081–3089.

99. Газоразрядный волоконный лазер с СВЧ накачкой / А.В. Гладышев, Д.Г. Комиссаров, С.М. Нефедов, А.Ф. Косолапов, В.В. Вельмискин, А.П. Минеев, И.А. Буфетов // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2023. – № 9. – С. 62–71.

100. Butvina L. Polycrystalline fibers // Infrared Fiber Optics / ed. J.S. Sanghera, I.D. Aggarwal. – CRC Press. – 1998. – P. 209–249.

101. Crystalline silver halide fibers with optical losses lower than 50 dB/km in broad IR region and their applications / L.N. Butvina, E.M. Dianov, N. Lichkova, V. Zavgorodnev, L. Kuepper // Proc. SPIE. – 2000. – Vol. 4083. – P. 238–253.

References

1. Belovolov M.I., Bubnov M.M., Gur'ianov A.N., Deviatykh G.G., Dianov E.M., Pelipenko V.I., Prokhorov A.M., Sisakian I.N. Issledovanie volokonno-opticheskikh sistem dlia sviazi blokov EVM [Investigation of optical-fiber systems for communication between computer units]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1977, vol. 7, no. 11, pp. 1404-1406.

2. Alferov Zh.I., Belovolov M.I., Gorelenok A.T., Gur'ianov A.N., Deviatykh G.G., Dianov E.M., Karasik A.Ia., Kolyshkin V.I., Kop'ev P.S., Prokhorov A.M., Iushin A.S. Volokonno-opticheskaia liniia peredachi signalov dlia sistem dal'nei sviazi na dline volny 1,3 mkm [Fiber-optical long-distance telecommunication line operating at the wavelength of 1.3 μ]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1978, vol. 8, no. 11, pp. 1403-1404.

3. Neustruev V.B., Dianov E.M., Kim V.M., Mashinsky V.M., Romanov M.V., Guryanov A.N., Khopin V.F., Tikhomirov V.A. Ultraviolet radiation- and γ - radiation-induced color centers in germanium-doped silica glass and fibers. *Fiber and Integrated Optics*, 1989, vol. 8, no. 2, pp. 143-156.

4. Neustruev V.B. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres. *J. Phys.: Condens Matter*, 1994, vol. 6, pp. 6901-6936.

5. Chernov P.V., Dianov E.M., Karpechev V.N., Kornienko L.S., Morozova I.O., Rybaltovskii A.O., Sokolov V.O., Sulimov V.B. Spectroscopic manifestations of self-trapped holes in silica: theory and experiment. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 1989, vol. 155, pp. 663-675.

6. Anoikin E.A., Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Sidorin Y.S. Effects of exposure to photons of various energies on transmission of

germanosilicate optical fiber in the visible to near IR spectral range. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1994, vol. 179, pp. 243-253.

7. Dianov E.M., Sokolov V.O., Sulimov V.B. Semiempirical calculations of point-defects in silica. Oxygen vacancy and twofold coordinated silicon atom. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1992, vol. 149, pp. 5-18.

8. Dianov E.M., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Pyrkov Y.N., Ky N.H., Limberger H.G., Salathé R.P. UV-irradiation-induced structural transformation of germanosilicate glass fiber. *Optics Letters*, 1997, vol. 22, pp. 1754-1756.

9. Bogatyryov V.A., Rumyantsev S.D., Kurkjian C.R. The effect of temperature on transmission properties of super-high strength aluminum-coated optical fibres. *Soviet Lightwave Communications*, 1992, vol. 2, pp. 339-345.

10. Bogatyryov V.A., Dianov E.M., Rumyantsev S.D., Makarenko A.Y., Semjonov S.L., Sysolyatin A.A. Super-high-strength metal-coated optical fibres. *Soviet Lightwave Communications*, 1991, vol. 1, pp. 227-234.

11. Bogatyryov V.A., Dianov E.M., Rumyantsev S.D., Sysolyatin A.A. Copper-coated optical fibers. *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication (OFC'93)*, 1993, p. WA4.

12. Bubnov M.M., Dianov E.M., Prokhorov A.M., Semjonov S.L., Kurkjian C.R. Dual hermetically coated optical fibers with strength of 9 GPa. *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication (OFC'92)*, 1992, p. PD22.

13. Belovolov M.I., Golovin N.I., Golovina T.N., Dianov E.M., Karpov V.I., Kriukov A.P., Kuznetsov A.A., Prokhorov A.M. Dinamicheskaja operativnaia pamiat' na volokonnykh svetovodakh [Dynamic direct-access memory utilizing fiber waveguides]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1985, vol. 15, no. 1, pp. 137-139.

14. Mamyshev P.V., Chernikov S.V., Dianov E.M. Generation of fundamental soliton trains for high-bit-rate optical fiber communication lines. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, vol. 27, pp. 2347-2355.

15. Dianov E.M., Mamyshev P.V., Prokhorov A.M., Chernikov S.V. Generation of a train of fundamental solitons at a high repetition rate in optical fibers. *Optics Letters*, 1989, vol. 14, pp. 1008-1010.

16. Chernikov S.V., Dianov E.M., Richardson D.J., Payne D.N. Soliton pulse-compression in dispersion-decreasing fiber. *Optics Letters*, 1993, vol. 18, pp. 476-478.

17. Golovchenko E.A., Mamyshev P.V., Pilipetskii A.N., Dianov E.M. Mutual influence of the parametric effects and stimulated Raman-scattering in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, vol. 26, pp. 1815-1820.

18. Dianov E.M., Karasik A.Y., Mamyshev P.V., Prokhorov M., Serkin V.N., Stelmakh M.F. Stimulated-Raman conversion of multisoliton pulses in quartz optical fibers. *JETP Letters*, 1985, vol. 41, pp. 294-297.
19. Golovchenko E.A., Dianov E.M., Prokhorov A.M., Serkin V.N. Decay of optical solitons. *JETP Letters*, 1985, vol. 42, pp. 87-91.
20. Dianov E.M., Luchnikov A.V., Pilipetskii A.N., Starodumov A.N. Electrostriction mechanism of soliton interaction in optical fibers. *Optics Letters*, 1990, vol. 15, pp. 314-316.
21. Chernikov S.V., Mamyshev P.V., Dianov E.M. et al. Generation of soliton pulse train in optical fiber using 2 cw singlemode diode-lasers. *Electronics Letters*, 1992, vol. 28, pp. 931-932.
22. Afanasjev V.V., Dianov E.M., Serkin V.N. Nonlinear pairing of short bright and dark soliton pulses by phase cross modulation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, vol. 25, pp. 2656-2664.
23. Chernikov S.V., Richardson D.J., Dianov E.M., Payne D.N. Picosecond soliton pulse compressor based on dispersion decreasing fiber. *Electronics Letters*, 1992, vol. 28, pp. 1842-1844.
24. Dianov E.M., Luchnikov A.V., Pilipetskii A.N., Prokhorov A.M. Long-range interaction of picosecond solitons through excitation of acoustic waves in optical fibers. *Applied Physics B*, 1992, vol. 54, pp. 175-180.
25. Mamyshev P.V., Wigley P.G.J., Wilson J., Stegeman G.I., Semenov V.A., Dianov E., Miroschnichenko S.I. Adiabatic-compression of Schrodinger solitons due to the combined perturbations of higher-order dispersion and delayed nonlinear response. *Physical Review Letters*, 1993, vol. 71, pp. 73-76.
26. Bulushev A.G., Dianov E.M., Okhotnikov O.G. Self-starting mode-locked laser with a nonlinear ring resonator. *Optics Letters*, 1991, vol. 16, pp. 88-90.
27. Chernikov S.V., Dianov E.M., Richardson D.J., Laming R.I., Payne D.N. 70 Gbit/s fiber based source of fundamental solitons at 1550 nm. *Electronics Letters*, 1992, vol. 28, pp. 1210-1212.
28. Starodumov A.N. Nelineinoe perekliuchenie opticheskikh impul'sov za schet VKR-samorasseianiia solitonov v svetovodakh [Nonlinear switching of optical pulses through stimulated Raman scattering: self-scattering of solitons in optical fibers]. *Quantum Electronics*, 1993, vol. 23, no. 5, pp. 432-434.
29. Biryukov A.S., Sukharev M.E., Dianov E.M. Vozbuzhdenie zvukovykh voln pri rasprostranении lazernykh impul'sov v volokonnykh svetovodakh [Excitation of sound waves upon propagation of laser pulses in optical fibres]. *Quantum Electronics*, 2002, vol. 32, no. 9, pp. 765-775.

30. Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Kurkov A.S., Mamyshv P.V., Prokhorov A.M., Romyantsev S.D., Semenov V.A., Semenov S.L., Sysoliatin A.A. A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length. *Journal of Lightwave Technology*, 1991, vol. 9, pp. 561-566.

31. Dianov E.M. et al. Volokonno-opticheskii VKR-usilitel' signalov na dline volny 1,3 mkm [Raman fibre-optic amplifier of signals at the wavelength of 1.3 μm]. *Quantum Electronics*, 1994, vol. 24, no. 9, pp. 749-751.

32. Dianov E.M., Fursa D.G., Abramov A.A., Belovolov M.I., Bubnov M.M., Shipulin A.V., Prokhorov A.M., Devyatykh G.G., Gur'yanov A.N., Khopin V.F. Low-loss high germania-doped fiber: A promising gain medium for 1.3 μm Raman amplifier. *Proceedings of the 20th European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 1994, vol. 1, p. 427.

33. Bubnov M.M., Semjonov S.L., Likhachev M.E., Dianov E.M., Khopin V.F., Salganskii M.Yu., Guryanov A.N., Fajardo J.C., Kuksenkov D.V., Koh J., Mazumder P. On the origin of excess loss in highly GeO_2 -doped single-mode MCVD fibers. *IEEE Photon. Technol. Letters*, 2004, vol. 16, p. 1870.

34. Dianov E.M. et al. Volokonnye VKR-lazery na svetovode s vysokim sodержaniem oksida germaniia v serdtsevine [Raman fibre lasers based on heavily GeO_2 -doped fibres]. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 5, pp. 435-441.

35. Dianov E.M., Mashinsky V.M. Germania-based core optical fibers. *J. Lightwave Technology*, 2005, vol. 23, no. 11, pp. 3500-3508.

36. Kamynin V.A., Kurkov A.S., Mashinsky V.M. Supercontinuum generation up to 2.7 micrometer in the germanate-glass-core and silica-glass-cladding fiber. *Laser Physics Letters*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 219-222.

37. Bubnov M.M., Dianov E.M., Egorova O.N., Semjonov S.L., Guryanov A.N., Khopin V.F., DeLiso E.M. Fabrication and investigation of single-mode highly phosphorus-doped fibers for Raman lasers. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4083, pp. 12-22.

38. Dianov E.M. et al. CW high power 1.24 μm and 1.48 μm Raman lasers based on low loss phosphosilicate fibre. *Electronics Letters*, 1997, vol. 33, no. 18, pp. 1542-1544.

39. Dianov E.M., Bufetov I.A., Bubnov M.M., Grekov M.V., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I. Three-cascaded 1407-nm Raman laser based on phosphorus-doped silica fiber. *Optics Letters*, 2000, vol. 25, pp. 402-404.

40. Dianov E.M., Kazanskii P.G., Stepanov D.Y. K voprosu o fotoindutsirovannoi GVG v opticheskikh voloknakh [Problem of the photoinduced second harmonic generation in optical fibers]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1989, vol. 19, pp. 575-576.

41. Canagasabey A., Corbari C., Gladyshev A.V., Liegeois F., Guillemet S., Hernandez Y., Yashkov M.V., Kosolapov A., Dianov E.M., Ibsen M., Kazansky P.G. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers. *Optics Letters*, vol. 34, pp. 2483-2485.

42. Corbari C., Gladyshev A.V., Lago L., Ibsen M., Hernandez Y., Kazansky P.G. All-fiber frequency-doubled visible laser. *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 22, pp. 6505-6508.

43. Chen C., Riazi A., Zhu E.Y., Ng M., Gladyshev A.V., Kazansky P.G., Qian L. Turn-key diode-pumped all-fiber broadband polarization-entangled photon source. *OSA Continuum*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 981-986.

44. Riazi A., Chen C., Zhu E.Y., Gladyshev A.V., Kazansky P.G., Sipe J.E., Qian Li Biphoton shaping with cascaded entangled-photon sources. *npj Quantum Information*, 2019, vol. 5, p. 77.

45. Dianov E.M. et al. Low-hydrogen silicon oxynitride optical fibers prepared by SPCVD. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, vol. 13, pp. 1471-1474.

46. Tomashuk A.L. et al. Radiation-induced absorption and luminescence in specially hardened large-core silica optical fibers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, vol. 47, no. 3, pp. 693-698.

47. Belovolov M.I., Paramonov V.M., Belovolov M.M. Teorema sravnitel'noi chuvstvitel'nosti volokonnykh datchikov [Theorem of comparative sensitivity of fibre sensors]. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 12, pp. 1128-1134.

48. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region > 3.5 μm . *Optics Express*, 2011, vol. 19, pp. 1441-1448.

49. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region. *Optics Express*, 2013, vol. 21, pp. 9514-9519.

50. Kosolapov A.F. et al. Revol'vernyi svetovod s poloi serdtsevinoi i otrazhaiushchei obolochkoi iz dvoynykh kapillarov [Hollow-core revolver fibre with a reflecting cladding consisting of double capillaries]. *Quantum Electronics*, 2016, vol. 46, pp. 267-270.

51. Vasiliev S.A., Dianov E.M., Varelas D., Limberger H., Salathe R.P. Post-fabrication resonance peak positioning of long-period cladding-mode-coupled gratings. *Optics Letters*, 1996, vol. 21, no. 22, pp. 1830-1832.

52. Dianov E.M. et al. Refractive-index gratings written by near-ultraviolet radiation. *Optics Letters*, 1997, vol. 22, pp. 221-223.

53. Dianov E.M., Vasiliev S.A., Kurkov A.S., Medvedkov O.I., Protopopov V.N. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings. *Proceedings of the 22nd European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 1996, vol. 1, pp. 65-68.

54. Dianov E.M., Starodubov D.S., Vasiliev S.A., Frolov A.A., Medvedkov O.I. Refractive index gratings written by near-UV radiation. *Optics Letters*, 1997, vol. 22, no. 4, pp. 221-223.

55. Vasil'ev S.A. et al. Volokonnye reshetki pokazatelia prelomleniia i ikh primeneniia [Fibre gratings and their applications]. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103.

56. Vasiliev S.A. et al. Measurement of high-birefringent spun fiber parameters using short-length fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 11, pp. 11290-11298.

57. Okhrimchuk A.G., Likhov V.V., Vasiliev S.A., Pryamikov A.D. Helical Bragg gratings: experimental verification of light orbital angular momentum conversion. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, vol. 40, no. 8, pp. 2481-2488.

58. Bufetov I.A. et al. Effektivnyi neodimovyi odnomodovyi volokonnyi lazer, rabotaiushchii v oblasti 0.9 mkm [Efficient 0.9- μm neodymium-doped single-mode fibre laser]. *Quantum Electronics*, 2003, vol. 33, no. 12, pp. 1035-1037.

59. Bufetov I.A. et al. Volokonnye Yb-, Er-Yb- i Nd-lazery na svetovodakh s mnogoelementnoi pervoi obolochkoi [Yb-, Er—Yb-, and Nd-doped fibre lasers based on multi-element first cladding fibres]. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 4, p. 328.

60. Kurkov A.S., Dianov E.M., Medvedkov O.I. et al. Efficient silica-based Ho^{3+} fibre laser for 2 μm spectral region pumped at 1.15 μm . *Electronics Letters*, 2000, vol. 36, pp. 1015-1016.

61. Gorbunov A.V., Mukhin E.E., Berik E.B., Melkumov M.A., Babinov N.A., Kurskiev G.S., Tolstyakov S.Yu., Vukolov K.Yu., Lisitsa V.S., Levashova M.G., Andrew P., Kempenaars M., Vayakis G., Walsh M.J. Laser-induced fluorescence of helium ions in ITER divertor. *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 146, pp. 2703-2706.

62. Ponosova A.A. et al. Erbievye svetovody s povyshennoi stoikost'iu k ioniziruiushchemu iz-lucheniiu dlia superliuminescentnykh volokonnykh istochnikov [Erbium-doped optical fibre with enhanced radiation resistance

for superluminescent fibre sources]. *Quantum Electronics*, 2019, vol. 49, no. 7, p. 693.

63. Zotov K.V., Likhachev M.E., Tomashuk A.L., Kosolapov A.F., Bubnov M.M., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. Radiation-resistant Er-doped fibers: optimization of pump wavelength. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, no. 17, pp. 1476-1478.

64. Krylov A.A., Chernykh D.S., Obraztsova E.D. Gyroscopic effect detection in the colliding-pulse hybridly mode-locked erbium-doped all-fiber ring soliton laser. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 13, pp. 2439-2442.

65. Chernysheva M.A. et al. Thulium-doped mode-locked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 26, pp. B124-B130.

66. Solodyankin M.A. et al. Mode-locked 1.93 μm thulium fiber laser with a carbon nanotube absorber. *Optics Letters*, 2008, vol. 33, pp. 1336-1338.

67. Krylov A.A., Sazonkin S.G., Arutyunyan N.R., Grebenyukov V.V., Pozharov A.S., Dvoretzkiy D.A., Obraztsova E.D., Dianov E.M. Performance peculiarities of carbon-nanotube based thin-film saturable absorbers for erbium fiber laser mode-locking. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, vol. 33, no. 2, pp. 134-142.

68. Dianov E.M. et al. Mode-locked Bi-doped fiber laser. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, vol. 24, no. 8, pp. 1807-1808.

69. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. Effect of the AlPO_4 join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers. *Optics Letters*, 2009, vol. 34, pp. 3355-3357.

70. Likhachev M., Aleshkina S., Shubin A., Bubnov M., Dianov E., Lipatov D., Guryanov A. Large-mode-area highly Yb-doped photodarkening-free $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ -based fiber. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC)*, 2011, p. 1.

71. Bobkov K.K. et al. Properties of silica based optical fibers doped with an ultra-high Ytterbium concentration. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, vol. 40, no. 18, pp. 6230-6239.

72. Kotov L. et al. Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser. *Optics Letters*, 2015, vol. 40, no. 7, pp. 1189-1192.

73. Kotov L.V. et al. Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser. *Laser Physics Letters*, 2014, vol. 11, no. 9, p. 095102.

74. Khudyakov M.M., Lipatov D.S., Gur'yanov A.N., Bubnov M.M., Likhachev M.E. Highly efficient 3.7 kW peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier. *Optics Letters*, 2020, vol. 45, no. 7, pp. 1782-1785.

75. K. Bobkov et al. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped-pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier. *Optics Express*, 2017, vol. 25, pp. 26958-26972.

76. Bobkov K. et al. Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers. *Optics Express*, 2021, vol. 29, pp. 1722-1735.

77. Dianov E.M., Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Umnikov A.A., Yashkov M.V., Guryanov A.N. Nepreryvnyi vismutovyi volokonnyi lazer [CW bismuth fiber laser]. *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, pp. 1083-1084.

78. Dianov E.M. Bismuth-doped optical fibers: a challenging active medium for near-IR lasers and optical amplifiers. *Light: Science & Applications*, 2012, vol. 1, no. 5, p. e12.

79. Bufetov I.A. et al. Bi-doped optical fibers and fiber lasers. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, vol. 20, p. 111.

80. Firstov S.V. et al. Laser-active fibers doped with bismuth for a wavelength region of 1.6–1.8 μm . *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, vol. 24, no. 5, pp. 1-15.

81. Khagai A.M., Alyshev S.V., Vakhrushev A.S., Riumkin K.E., Umnikov A.A., Firstov S.V. Recent advances in Bi-doped silica-based optical fibers: a short review. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, 2022, vol. 16, p. 100126.

82. Alyshev S., Vakhrushev A., Khagai A., Firstova E., Riumkin K., Melkumov M., Iskhakova L., Umnikov A., Firstov S. Impact of doping profiles on the formation of laser-active centers in bismuth-doped $\text{GeO}_2\text{-SiO}_2$ glass fibers. *Photonics Research*, 2024, vol. 12, no. 2, pp. 260-270.

83. Ososkov Y., Khagai A., Firstov S., Riumkin K., Alyshev S., Kharkordin A., Lobanov A., Guryanov A., Melkumov M. Pump-efficient flat-top O+E-bands bismuth-doped fiber amplifier with 116 nm –3 dB gain bandwidth. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, no. 26, pp. 44138-44145.

84. Firstov S.V., Riumkin K.E., Khagai A.M., Alyshev S.V., Melkumov M.A., Khopin V.F., Afanasiev F.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. Wideband bismuth-and erbium-codoped optical fiber amplifier for C+ L+ U-telecommunication band. *Laser Physics Letters*, 2017, vol. 14, no. 11, p. 110001.

85. Bufetov I.A., Dianov E.M. Opticheskiy razriad v volokonnykh svetovodakh [Optical discharge in optical fibers]. *Physics-USpekhi*, 2005, vol. 48, no. 1, p. 91.

86. Bufetov I.A., Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Efremov V.P., Fortov V.E. Catastrophic damage in hollow core optical fibers under high power laser radiation. *Optics Express*, vol. 27, no. 13, p. 18296.

87. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Salgansky M.Yu., Guryanov A.N., Dianov E.M. Anomalies and peculiarities of radiation-induced light absorption in pure silica optical fibers at different temperatures. *J. Appl. Phys.*, 2017, vol. 121, p. 213104.

88. Kashaykin P.F., Tomashuk A.L., Vasiliev S.A., Ignatyev A.D., Shaimerdenov A.A., Ponkratov Yu.V., Kulsartov T.V., Kenzhin Y.A., Gizatulin Sh. Kh., Zholdybayev T.K., Chikhray Y.V., Semjonov S.L. Radiation resistance of single-mode optical fibres with view to in-reactor applications. *Nuclear Materials and Energy*, 2021, vol. 27, p. 100981.

89. Tomashuk A.L. et al. Role of inherent radiation-induced self-trapped holes in pulsed-radiation effect on pure-silica-core optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, vol. 37, no. 3, pp. 956-963.

90. Snopatin G.E., Churbanov M.F., Pushkin A.A., Gerasimenko V.V., Dianov E.M., Plotnichenko V.G. High purity arsenic sulfide glasses and fibers with minimum attenuation of 12 dB/km. *Optoelectron. Adv. Mat.*, 2009, vol. 3, no. 7, pp. 669-671.

91. Okhrimchuk A.G., Butvina L.N., Dianov E.M., Shestakova I.A., Lichkova N.V., Zagorodnev V.N., Shestakov A.V. Optical spectroscopy of the $\text{RbPb}_2\text{Cl}_5:\text{Dy}^{3+}$ laser crystal and oscillation at 5.5 μm at room temperature. *Journal of Optical Society of America B*, 2007, vol. 24, no. 10, pp. 2690-2695.

92. Churbanov M.F., Denker B.I., Galagan B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P. First demonstration of similar to 5 μm laser action in terbium-doped selenide glass. *Appl. Phys. B*, 2020, vol. 126, no. 7, p. 117.

93. Churbanov M.F., Denker B.I., Galagan B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Snopatin G.E., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P. Laser potential of Pr^{3+} doped chalcogenide glass in 5-6 μm spectral range. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, vol. 559, p. 120592.

94. Fjodorow P. et al. Passively Q-switched 5- μm Ce^{3+} -doped selenide glass laser using Fe: CdTe and Fe:CdSe as saturable absorbers. *Optics Letters*, 2022, vol. 15, pp. 309-312.

95. Denker B.I., Frolov M.P., Galagan B.I., Koltashev V.V., Plotnichenko V.G., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P. Applica-

tion of non-radiative energy transfer from Tb^{3+} to Nd^{3+} for pumping a 6 μm solid-state laser. *Journal of Luminescence*, 2024, vol. 266, p. 120288.

96. Koltashev V.V., Denker B.I., Galagan B.I., Snopatin G.E., Sukhanov M.V., Sverchkov S.E., Velmuzhov A.P., Plotnichenko V.G. 150 mW Tb^{3+} doped chalcogenide glass fiber laser emitting at $\lambda > 5 \mu m$. *Optics & Laser Technology*, 2023, vol. 161, p. 109233.

97. Astapovich M.S., Gladyshev A.V., Khudyakov M.M., Kosolapov A.F., Likhachev M.E., Bufetov I.A. Watt-level nanosecond 4.42- μm Raman laser based on silica fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, vol. 31, no. 1, pp. 78-81.

98. Gladyshev A., Yatsenko Yu., Kolyadin A., Kompanets V., Bufetov I. Mid-infrared 10-J-level sub-picosecond pulse generation via stimulated Raman scattering in a gas-filled revolver fiber. *Opt. Mater. Express*, 2020, vol. 10, pp. 3081-3089.

99. Gladyshev A.V., Komissarov D.G., Nefedov S.M., Kosolapov A.F., Vel'miskin V.V., Mineev A.P., Bufetov I.A. Gazorazriadnyi volokonnyi lazer s SVCh nakachkoi [Gas-discharge fiber laser with microwave pumping]. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 2023, vol. 50, no. 9, pp. 403-408.

100. Butvina L. Polycrystalline fibers. Infrared Fiber Optics. Ed. J.S. Sanghera, I.D. Aggarwal. CRC Press, 1998, pp. 209-249.

101. Butvina L.N., Dianov E.M., Lichkova N., Zavgorodnev V., Kuepper L. Crystalline silver halide fibers with optical losses lower than 50 dB/km in broad IR region and their applications. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4083, pp. 238-253.

Сведения об авторах

ТОМАШУК А.Л.

e-mail: tomashuk@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» (г. Москва, Российская Федерация).

About the authors

A.L. TOMASHUK

e-mail: tomashuk@fo.gpi.ru

Senior Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Dianov Fiber Optics Research Center - branch of Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

СЕМЕНОВ С.Л.
e-mail: *sls@fo.gpi.ru*

S.L. SEMENOV
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» (г. Москва, Российская Федерация).

Doctor of Sciences, Director of Dianov Fiber Optics Research Center - branch of Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation.

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Получена: 11.01.2024

Одобрена: 15.01.2024

Принята к публикации: 16.01.2024

Financing. The work was not sponsored.

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

The authors' contribution is equal.

Received: 11/01/2024

Approved: 15/01/2024

Accepted for publication: 16/01/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Томашук, А.Л. Научному центру волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН 30 лет / А.Л. Томашук, С.Л. Семенов // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 1. – С. 5–49.

Please cite this article in English as: Tomashuk A.L., Semenov S.L. Dianov Fiber Optics Research Center became 30 years. *Applied Photonics*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 5–49.