

На правах рукописи



Хегай Александр Михайлович

**ИМПУЛЬСНЫЕ ВИСМУТОВЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ,
ГЕНЕРИРУЮЩИЕ В ДИАПАЗОНЕ 1.25 - 1.75 МКМ**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ

Мелькумов Михаил Александрович: кандидат физико-математических наук, Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

Наний Олег Евгеньевич: доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Дворецкий Дмитрий Алексеевич: кандидат физико-математических наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана


ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «29» марта 2021 г на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при ИОФ РАН по адресу г. Москва 119991, ул. Вавилова, 38, корп. 1.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <http://diss.gpi.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук
тел. +7 (499) 503-87-77 доб. 4-13

 А.А. Ушаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Первая удачная попытка создания волоконного лазера была предпринята Элиасом Снитцером в 1961, в качестве активной среды был использован световод, активированный ионами неодима. Значительного прогресса в сфере создания волоконных лазеров удалось добиться благодаря появлению ярких лазерных диодов, которые стали использоваться в качестве источников накачки активной среды лазеров и усилителей.

На данный момент наибольшее распространение получили волоконные лазеры на основе активных световодов, легированных редкоземельными элементами (Er, Yb, Tm, Ho, Nd, Pr). Использование перечисленных лазерных сред позволило создать множество разнообразных источников излучения, непрерывного и импульсного действия, мощность которых простирается от долей мВт до сотен кВт, а длительность излучения от сотен мкс до десятков фс. Однако развитие науки, техники, медицины и телекоммуникаций выдвигают новые требования к волоконным лазерам, например, получение лазерной генерации в области спектра, не охваченной устройствами на редкоземельных элементах.

Волокна на основе кварцевого стекла, легированные висмутом, позволяют получать усиление и лазерную генерацию в ближней части ИК спектра, причем точные оптические свойства висмутовой среды существенным образом зависят от состава матрицы сердцевины световода. Таким образом, использование алюмосиликатных, фосфоросиликатных и германосиликатных волокон с висмутом позволяет получить оптическое усиление и лазерную генерацию в широком спектральном диапазоне от 1,1 до 1,8 мкм. Тем не менее, висмутовые волокна не лишены недостатков. Одной из основных проблем таких световодов является низкая рабочая концентрация висмута в активной среде (<0.02 ат. %), повышение которой приводит к резкому падению эффективности за счет быстрого роста уровня ненасыщаемых потерь в образцах. В связи с этим средняя длина активного световода в висмутовых устройствах, как правило, составляет

десятки или даже сотни метров. Вероятно, именно этот факт стал основной причиной того, что в отличие от непрерывных висмутовых лазеров, его импульсные аналоги не были исследованы в должной мере, несмотря на большую научную и практическую ценность таких устройств.

Цель диссертационной работы

Исследование оптических свойств висмутовых световодов, как активной среды импульсных лазеров, и реализация на их основе волоконных лазеров с синхронизацией мод и модуляцией добротности.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование оптических свойств фосфоросиликатных световодов с висмутом. Выбор оптимального состава стекла, наиболее подходящего для разработки импульсных источников излучения. Изучение особенностей радиального распределения висмутовых активных центров (ВАЦ) в сердцевине световодов. Определение концентрации и сечений переходов ВАЦ.

2. Разработка лазера на фосфоросиликатном световоде с висмутом, с синхронизацией мод в нелинейном кольцевом зеркале, а также изучение возможности эффективного усиления и компрессии импульсов на выходе из такого лазера.

3. Реализация импульсного лазера на высокогерманатном световоде с висмутом с пассивной синхронизацией мод. Моделирование установившегося режима импульсной генерации такого лазера.

4. Исследование режима пассивной синхронизации мод с помощью насыщаемого поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок в лазере на фосфоросиликатном световоде, легированном висмутом.

5. Разработка импульсного лазера на фосфоросиликатном световоде с висмутом с модуляцией добротности с помощью акустооптического затвора. Определение предельной энергии импульса таких лазеров и механизмов, влияющих на этот предел.

Научная новизна

1. Разработаны фосфоросиликатные висмутовые световоды с параметрами, оптимизированными для использования в импульсных лазерах, в том числе активные волокна с максимальным достигнутым на данный момент усилением и сниженными ненасыщаемыми потерями.

2. Разработаны и созданы образцы висмутовых волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод с помощью нелинейного кольцевого зеркала и одностенных углеродных нанотрубок, генерирующих в области 1,3 и 1,7 мкм с выходной энергией ~20-30 нДж (после усилителя) и длительностью импульсов в диапазоне 8-18 пс.

3. Разработан и реализован лазер на основе фосфоросиликатного световода, легированного висмутом, с активной модуляцией добротности. Получена предельная энергия в импульсе для данных световодов (~ 11 мкДж) и определен механизм ограничения энергии. По полученным данным определена средняя по сечению сердцевины концентрация висмутовых активных центров в висмутовом световоде. Спектральным методом определено радиальное распределение висмутовых активных центров, ассоциированных с фосфором (ВАЦ-Р) в заготовке, и на основе этих измерений определен спектр сечения поглощения ВАЦ-Р.

Практическая значимость

Разработанные волоконные световоды, легированные висмутом, и реализованные на их основе импульсные лазеры, имеют широкий спектр потенциального применения. Данные импульсные источники могут быть использованы в медицине в многофотонной микроскопии, а также в телекоммуникационных системах, рефлектометрии и устройствах детекции газа. Рассчитанные спектры сечений поглощения могут быть использованы при моделировании лазеров и усилителей на висмутовом световоде для оптимизации используемых схем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Волоконные световоды с сердцевиной из фосфоросиликатного стекла, легированного висмутом, могут являться активной средой для волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод, достигаемой с помощью нелинейного кольцевого зеркала или одностенных углеродных нанотрубок, работающих в режиме генерации диссипативных солитонов пикосекундной длительности в диапазоне 1,29-1,36 мкм.

2. Импульсный лазер на основе высокогерманатного световода с висмутом может генерировать УКИ вблизи 1,7 мкм, работая в режиме пассивной синхронизации мод с использованием нелинейного кольцевого зеркала.

3. Режим активной модуляции добротности, реализованный в лазерах на основе фосфоросиликатных световодов с висмутом, позволяет генерировать импульсы длительностью порядка сотни нс в диапазоне 1,31-1,35 мкм с энергией в импульсе ~ 11 мкДж. Достигнутая энергия является предельной для данных световодов и определяется соотношением между величинами ненасыщаемых потерь и активного поглощения.

4. Сечения поглощения в фосфоросиликатных световодах с висмутом могут быть вычислены с использованием радиального распределения активных центров по сердцевине и предельно достижимых значений энергии импульса в лазерах на таких световодах.

Личный вклад диссертанта

Основные результаты, представленные в диссертации, были получены автором лично или при его непосредственном участии.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечивается применением отработанных методов исследования волоконных световодов, использованием современного научного оборудования, сопоставлением данных, полученных различными методами, а также

современными методами анализа и интерпретации экспериментальных результатов.

По материалам, вошедшим в диссертацию, были сделаны доклады на научных конференциях: 25nd Annual International Laser Physics Workshop, LASPHYS (Yerevan, Armenia, 2016); 7-й Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, Россия, 2016); SPIE Photonics West 2017 (San Francisco, USA, 2017); 2nd International Conference on Phosphate Materials (Oxford, UK, 2017); Advanced Solid State Lasers, ASSL (Nagoya, Japan, 2017); Всероссийская конференция по волоконной оптике, ВКВО (Пермь, Россия, 2017); OSA Advanced Photonics Congress (Zurich, Switzerland, 2018), Advanced Solid State Lasers (Boston, USA, 2018), 28th Annual International Laser Physics Workshop, LASPHYS (Gyeongju, South Korea, 2019), Asia Communications and Photonics Conference (Chengdu, China, 2019). Также результаты работы неоднократно докладывались на внутренних семинарах и конкурсах молодых ученых ИЦВО РАН.

Публикации

Результаты работы, изложенные в данной диссертационной работе, были опубликованы в 6 статьях рецензируемых журналов из перечня ВАК и в трудах 13 российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Общий объем диссертации – 165 страниц, включая 91 рисунок, 4 таблицы и библиографию, содержащую 156 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, приведена научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, и изложена структура диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной созданию и исследованию образцов стекол и волоконных световодов, легированных висмутом, основное внимание уделено описанию спектрально-люминесцентных свойств висмутовой среды различного состава. Также рассмотрены особенности работы импульсных лазеров с синхронизацией мод и модуляцией добротности, в том числе примеры импульсных источников на основе активных световодов с висмутом.

Во второй главе изложена технология создания волоконных световодов с висмутом, подробно описан экспериментальный аппарат подходов и методов, использованных для изучения свойств активных световодов, легированных висмутом, а также характеристик импульсного лазера, его волоконно-оптических составляющих компонентов и режима генерации.

Третья глава посвящена изучению серии фосфоросиликатных световодов с различной концентрацией висмута, описанию их оптических свойств, в том числе спектров усиления и поглощения, зависимости ненасыщаемых потерь в образцах от содержания висмута. Так же приведены аналогичные характеристики для высокогерманатных световодов с висмутом. На основе приведенных результатов отобраны висмутовые волокна, наиболее подходящие для создания импульсных лазеров.

В параграфе 3.1.1 приведены спектры поглощения исследованных фосфоросиликатных световодов с висмутом.

В параграфе 3.1.2 рассмотрено влияние концентрации ВАЦ на оптическое усиление в таких волокнах. Типичный спектр усиления в фосфоросиликатном световоде при накачке на длине волны 1240 нм изображен на Рис. 1(а). На графике так же изображен спектр оптических потерь в отсутствии излучения накачки. Максимум усиления в фосфоросиликатном световоде с висмутом приходится на длину волны ~1325 нм.

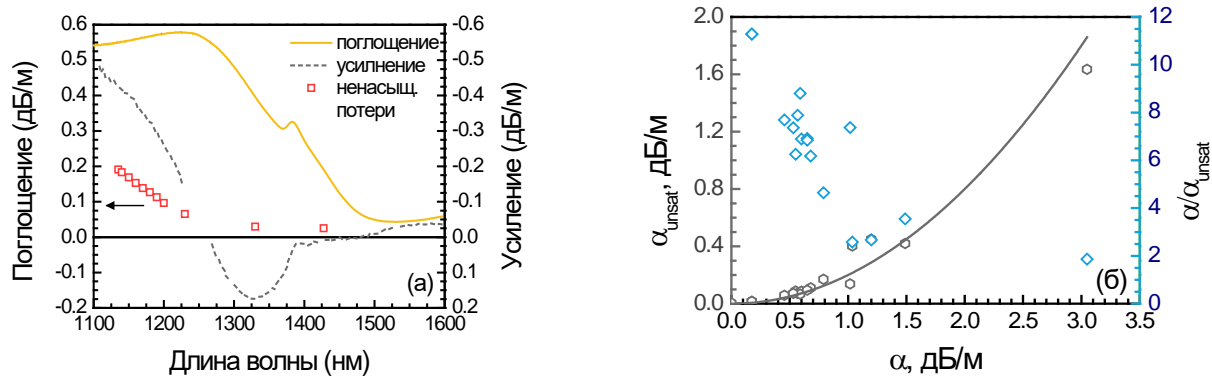


Рис. 1. Спектры поглощения, усиления и ненасыщаемых потерь в висмутовом фосфоросиликатном световоде (а). Зависимость уровня ненасыщаемых потерь (α_{unsat}) и отношения поглощения к ненасыщаемым потерям ($\alpha_{\text{unsat}}/\alpha$) от поглощения (α) на 1240 нм в фосфоросиликатных световодах с висмутом (б).

В рамках данной серии фосфоросиликатных световодов был получен образец с максимальным известным на данный момент коэффициентом усиления 0,32 дБ/м. Этот результат особенно важен в случае висмутовых волокон, так как световоды, легированные висмутом, отличаются относительно низким (в сравнении со световодами с редкоземельными элементами) погонным усилением.

В параграфе 3.1.3 описаны экспериментальные результаты зависимости насыщения поглощения от мощности сигнала для световодов с различным содержанием висмута. Исходя из данных измерений можно определить уровень так называемых фоновых или ненасыщаемых потерь, значение которых существенным образом сказывается на эффективности лазерных устройств и, в частности, на максимальной энергии, которую можно извлечь из активного световода. Из Рис. 1(б) видно, что наибольшее отношение уровня исходных потерь к уровню остаточных потерь ($\alpha_{\text{unsat}}/\alpha$) имеют световоды с поглощением слабого сигнала в диапазоне от 0,18 до 0,6 дБ/м.

Было показано, что для лазеров с модуляцией добротности наилучшим образом подходит фосфоросиликатный световод с поглощением $\sim 0,6$ дБ/м на длине волны 1,24 мкм. Также в работе исследовалась зависимость ненасыщаемых потерь в активном световоде от длины волны сигнала. Результаты измерений представлены на Рис. 1(а).

В параграфе 3.2 приведены основные оптические характеристики высокогерманатных световодов с висмутом, в зависимости от технологических параметров изготовления световода, концентрации висмута и состава сердцевины.

В четвертой главе рассмотрены генерационные свойства лазеров с пассивной синхронизацией мод, реализованной двумя различными способами: с использованием нелинейного эффекта Керра и насыщаемого поглотителя на одностенных углеродных нанотрубках. В качестве активной среды лазера были выбраны висмутовые активные световоды с сердцевиной на основе фосфоросиликатного и высокогерманатного стекла.

В параграфе 4.1 детально разобран принцип действия нелинейного кольцевого зеркала, как насыщаемого поглотителя. Рассмотрено использование световодов с двулучепреломлением внутри зеркала Саньяка, что значительно влияет на его пропускание, вне зависимости от мощности входного сигнала.

Параграф 4.2 был посвящен изучению дисперсии в световодах, использование которых предполагалось в рамках разработки лазера на керровской нелинейности.

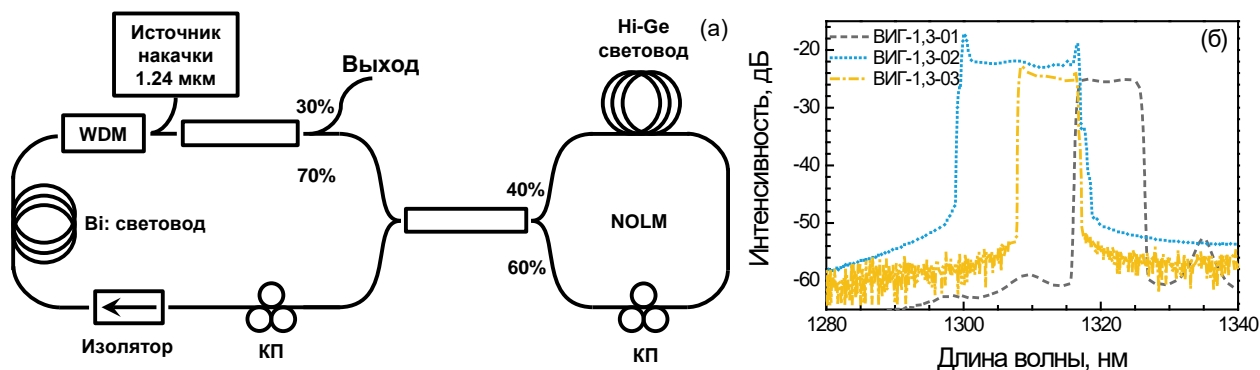


Рис. 2. Схема волоконного импульсного генератора (ВИГ) на основе нелинейного оптического кольцевого зеркала (NOLM) (а). Спектры импульсного режима работы лазеров ВИГ-1,3-01, 02 и 03 (б).

В параграфе 4.3 описана работа двух модификаций лазеров на фосфоросиликатном световоде, легированном висмутом и нелинейном кольцевом зеркале, с активной средой внутри кольцевого зеркала (NALM) и вне зеркала (NOLM). Импульсная генерация в данных лазерных схемах была во многом схожа. Проведено подробное исследование работы осцилляторов подобного рода на примере лазера на NOLM. Схема лазера показана на Рис. 2(а), 30 метровый отрезок фосфоросиликатного световода, легированного висмутом, с усилением

слабого сигнала $\sim 0,17$ дБ/м на длине волны 1320 нм, использовался в качестве активной среды лазера. В качестве нелинейного световода в схеме использовалось германосиликатное волокно с 30 и 50 мол. % GeO_2 (Ni-Ge световод), нелинейный коэффициент которого на рабочей длине волны $\gamma_{\text{NiGe}}=40 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$.

В процессе оптимизации схемы были изучены выходные характеристики трех модификаций лазера, отличающихся длиной и типом нелинейного световода. В таблице 1 представлены характеристики исследованных схем. Для удобства каждой из них был присвоен шифр. Поведение лазера с точки зрения условий запуска, порога генерации было идентичным вне зависимости от используемого нелинейного световода.

Исходя из формы спектров импульсного сигнала (Рис. 2 (б)) можно заключить, что во всех трех вариациях схемы наблюдалась генерация диссипативных солитонов. При этом спектральное положение каждой кривой определялось не типом высокогерманатного световода, а настройкой контроллеров поляризации. Различная ширина спектров, соответствующих разным схемам, обусловлена величиной энергии и пиковой мощности в импульсе.

Таблица 1 Параметры экспериментальных образцов импульсных лазеров

Шифр схемы	Нелинейный световод	Энергия в импульсе, пДж	Частота повторения, МГц	Длительность импульса, пс
ВИГ 1,3 - 01	Ni-Ge 50%, 5м	200	$\sim 3,5$	10
ВИГ 1,3 - 02	Ni-Ge 30%, 5м	1650		11,3
ВИГ 1,3 - 03	Ni-Ge 30%, 10м	310		22

В параграфе 4.3.3 приводятся результаты усиления и сжатия импульсов задающего генератора, представленного выше. В усилителе использовался тот же самый активный висмутовый световод, что и в лазере, длина волокна составляла 200 м. Меняя мощность накачки усилителя можно было варьировать уровень выходного сигнала от 0,6 до примерно 30 мВт, что соответствует коэффициенту усиления ~ 17 дБ и энергии в импульсе $\sim 8,5$ нДж.

Далее масштабированные импульсы были сжаты в компрессоре. Исходная ширина автокорреляционной функции (АКФ) по полувысоте составляла ~ 26 пс.

После сжатия ширина снижалась до минимального уровня в 1 пс, что соответствовало длительности импульса примерно 670 пс.

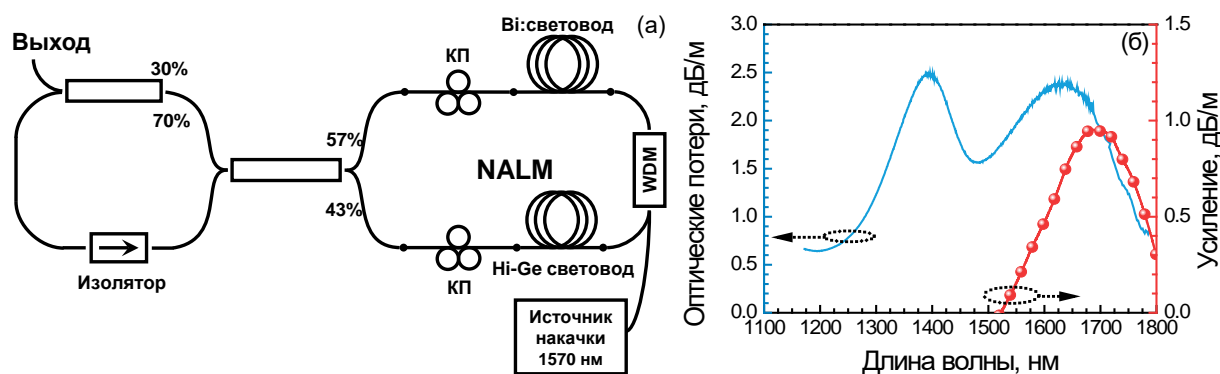


Рис. 3. Спектр оптических потерь и усиления в высокогерманатном световоде с висмутом (а). Схема восьмерка с NALM на высокогерманатном световоде с висмутом (б).

Параграф 4.4 посвящен волоконному лазеру на высокогерманатном световоде, легированном висмутом, работающему в диапазоне 1,7 мкм. Схема лазера представлена на Рис. 3(а). При разработке лазера использовался образец высокогерманатного висмутового световода с поглощением на 1650 нм равным 2,4 дБ/м. Спектр потерь “слабого” сигнала и усиления при накачке на 1460 нм представлен на Рис. 3(б). Дисперсия групповых скоростей в высокогерманатном волокне равнялась ~ 120 пс²/км на рабочей длине волны 1,7 мкм. В кольцо зеркала в качестве нелинейного был включен отрезок германосиликатного волокна с содержанием GeO₂ ~ 30 мол. %. Длина такого световода составила 25 метров.

В представленной лазерной схеме была реализована одноимпульсная генерация в диапазоне 1,69-1,70 мкм. Порог импульсной генерации составлял ~ 150 мВт. Измеренная частота повторения импульсов 3,57 МГц точно соответствовала времени обхода резонатора. Спектр импульсного сигнала представлен на Рис. 4(а). Если сравнивать спектр импульсов с параболой, очевидно, имеется сходство кривых, в особенности их левых частей. Из литературы известно, что в резонаторах импульсных лазеров с суммарной положительной дисперсией существует возможность генерации симиляритонов. Отличительной особенностью данного импульсного режима является параболическая форма спектра и временной огибающей.

На Рис. 4(б) представлена АКФ импульсной генерации, аппроксимированная различными функциями, в том числе, sech^2 профилем, АКФ параболы, гауссианом. В качестве наиболее близкой к форме огибающей можно выделить гауссовую кривую. Предполагая это можно пересчитать ширину АКФ в длительность импульса, которая в этом случае равна 17,7 пс. Средняя мощность сигнала составляла $\sim 0,3$ мВт. С учетом измеренных длительности и частоты повторения импульсов данная средняя мощность соответствует $\sim 4,7$ Вт в пике и энергии 84 пДж. Произведение длительности импульса на ширину спектральной линии (4,5 нм на полувысоте) равно 6,9, что говорит о наличии частотной модуляции.

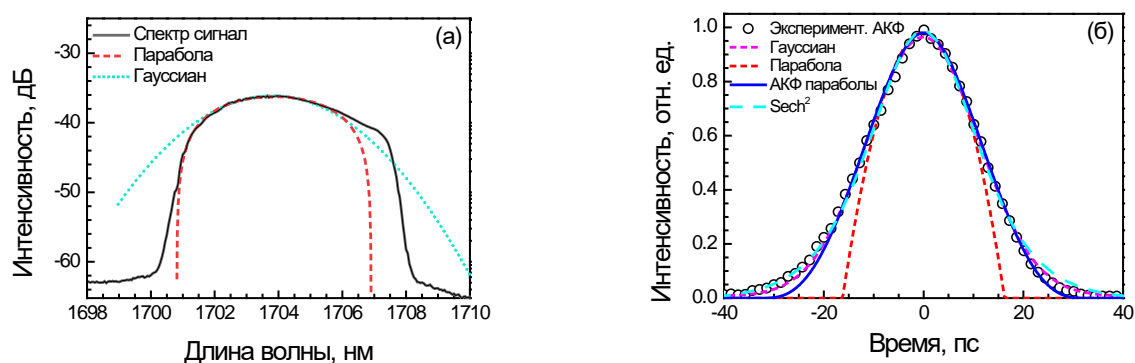


Рис. 4. Спектр импульсной генерации (а). АКФ импульсного сигнала, аппроксимированная гауссовой кривой, sech^2 профилем и АКФ параболы (б).

В рамках данной работы было изучено масштабирование импульсов в усилителе. В качестве активной среды усилителя использовался ~ 100 м отрезок высокогерманатного световода с висмутом. Средняя мощность сигнала на выходе усилителя увеличилась до 20,4 мВт (усиление 18,3 дБ). При этом, так как фактически импульс распространялся в 100 м высокогерманатного световода с большой нормальной дисперсией групповых скоростей импульс уширялся до $\sim 28,1$ пс.

Для более глубокого понимания процессов, происходящих внутри резонатора, было произведено математическое моделирование процесса развития импульсной генерации. Описание результатов численных расчетов изложено в параграфе 4.4.1. Распространение импульса в световоде удобно описывать с помощью нелинейного уравнения Шредингера (НУШ):

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i}{2}\alpha A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{6}\beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} - \gamma|A|^2 A. \quad (1)$$

Здесь $A=A(z,t)$ – огибающая импульса (амплитуда высокочастотного заполнения), первый член справа отвечает за поглощение в пассивных волокнах и усиление в активных средах. Члены с коэффициентами β_2 и β_3 учитывали действие дисперсии групповых скоростей. Последний член учитывал влияние ФСМ. Нелинейный коэффициент $\gamma = n_2\omega_0 / cA_{\text{eff}}$ определяется нелинейным показателем преломления n_2 , и эффективным полем моды A_{eff} световода.

Численное решение уравнения (1) производилось с помощью SSF-метода (Split-step Fourier method – фурье-метод с разделением по физическим факторам), в основе которого лежит использование быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Результаты моделирования представлены на Рис. 5. Отчетливо видно, что рассчитанный спектр достаточно хорошо совпадает с измеренными зависимостями, в особенности в коротковолновой области. Более того, контур смоделированного спектра очень близок к параболической функции, что косвенно указывает на генерацию симиляритонов. На Рис. 5(б) представлена эволюция длительности импульса за один обход внутри резонатора.

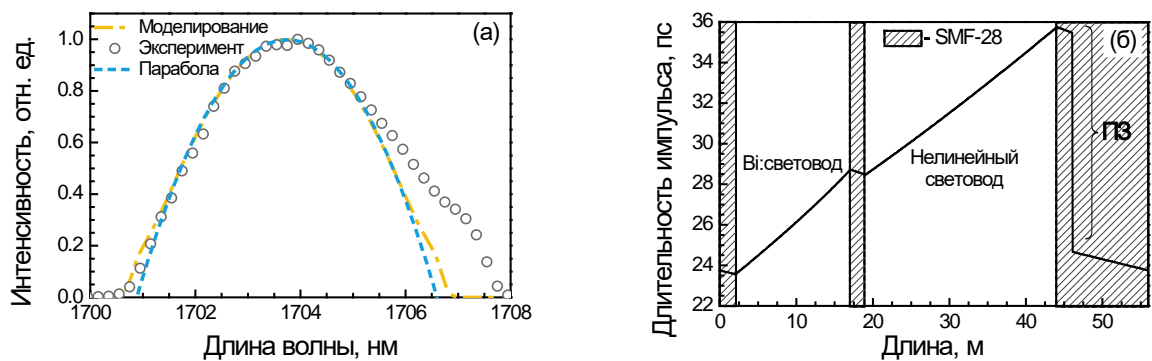


Рис. 5. Сравнение экспериментально измеренных спектров (а) с результатами моделирования. Эволюция длительности импульса (FWHM) в процессе распространения внутри резонатора (б).

В параграфе 4.5 описывается лазер на фосфоросиликатном висмутовом световоде с синхронизацией мод в насыщаемом поглотителе на одностенных углеродных нанотрубках (ОУНТ). Схема кольцевого лазера представлена на Рис. 6(а). В экспериментальной установке использовался образец висмутового световода с максимальным погонным коэффициентом усиления, достигнутым для

данной матрицы $\sim 0,32$ дБ/м на длине волны 1,32 мкм при накачке на 1,23 мкм. Длина активного волокна составила 15 м, что соответствовало минимальному требованию по усилению, необходимому для достижения порога импульсной генерации. В качестве насыщаемого поглотителя использовался модуль, состоящий из тонкого слоя (десятки нанометров) ОУНТ, помещенного между керамическими феррулами FC/APC коннекторов.

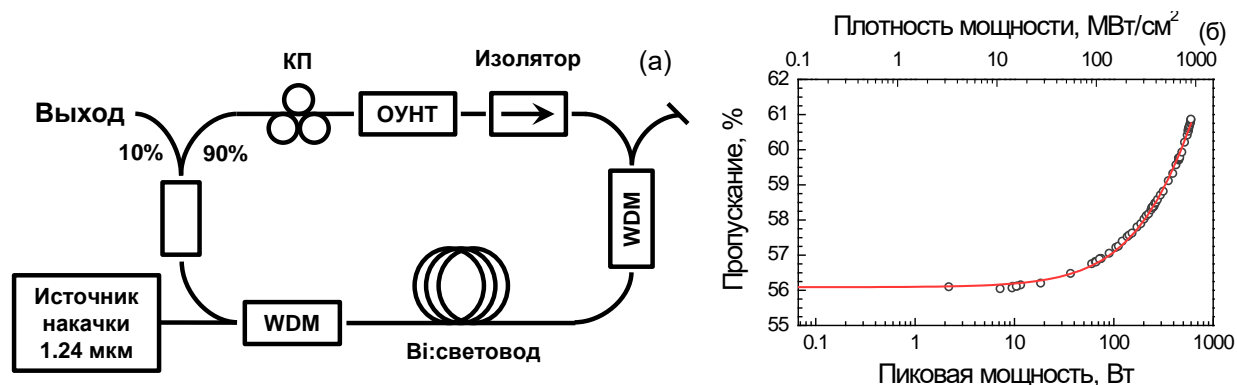


Рис. 6. Схема кольцевого лазера на висмутовом световоде и синхронизацией мод с помощью ОУНТ (а). Насыщение оптических потерь в слое ОУНТ (б).

Образец с нанотрубками, используемый в работе был синтезирован с помощью аэрозольного химического осаждения из газовой фазы. Средний диаметр ОУНТ составлял $\sim 2,4$ нм, что обеспечивало спектральное положение второго оптического перехода Вант-Гоффа на 1,37 мкм. На длине волны 1,32 мкм потери составили 3,2 дБ. В работе было измерено нелинейное пропускание слоя нанотрубок, которое составило $\sim 5\%$ (Рис. 6(б)).

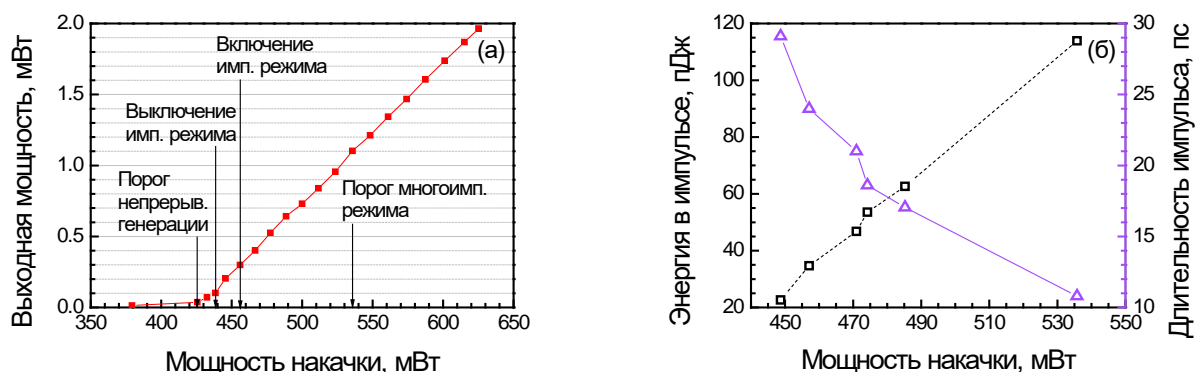


Рис. 7. Выходная мощность лазерной схемы (а), и зависимость энергии в импульсе и его длительности (б) от мощности накачки.

В представленной схеме была получена стабильная самозапускающаяся импульсная генерация. Режиму синхронизации мод предшествовала непрерывная

генерация. Зависимость выходной средней мощности лазера от мощности накачки, а также соответствующие пороги генерации представлены на Рис. 7(а).

Помимо линейного роста выходного сигнала, с мощностью накачки также изменялась длительность импульсов и ширина спектра импульсной генерации. В частности, при больших уровнях накачки наблюдалось отчетливое сокращение длительности импульса с 20,5 пс, наблюдаемой при значении мощности накачки близком к порогу включения импульсной генерации, до 7,8 пс на границе многоимпульсного режима Рис. 7(б).

В главе 5 проведено исследование работы импульсного лазера на фосфоросиликатном световоде, легированном висмутом, с активной модуляцией добротности, а также описано определение концентрации ВАЦ, которое совместно с измерением распределения активных центров по поперечному сечению световода позволило определить спектры сечения поглощения для фосфоросиликатных световодов с висмутом.

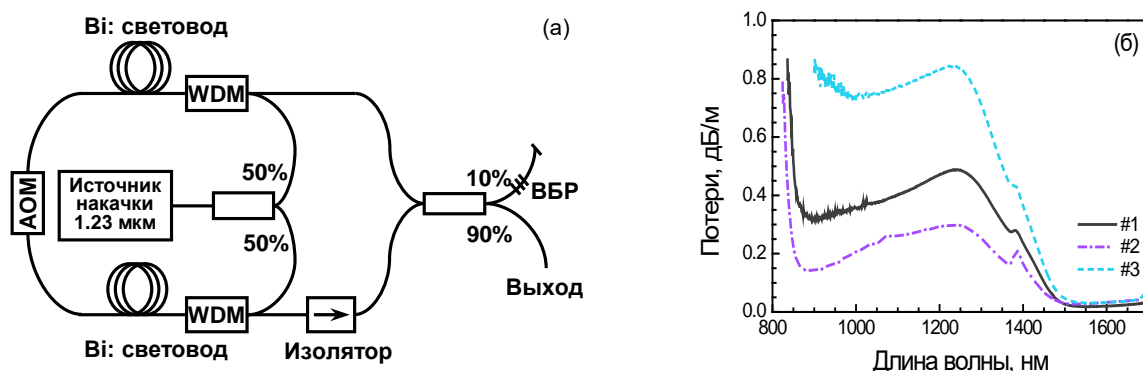


Рис. 8. Схема лазера с модуляцией добротности (а). Спектры поглощения исследуемых висмутовых активных световодов (б).

Параграф 5.1 посвящен описанию кольцевого лазера с модуляцией добротности. Экспериментальная схема лазера представлена на Рис. 8(а). В качестве оптического затвора использовался акустооптический модулятор (АОМ), работавший в режиме ключа. Для обеспечения обратной связи в лазерной схеме на конце 10% канала помещалась волоконная брэгговская решетка (ВБР) с шириной полосы ~1-2 нм и коэффициентом отражения ~99%. Путем выбора рабочей длины волны ВБР контролировалось спектральное положение пика лазерной генерации.

В представленной схеме была исследована зависимость оптических и энергетических характеристик сигнала от свойств используемого висмутового световода. В качестве активной среды было отобрано три образца световодов (#1-#3). Спектры оптических потерь исследуемых волокон представлены на Рис. 8(б).

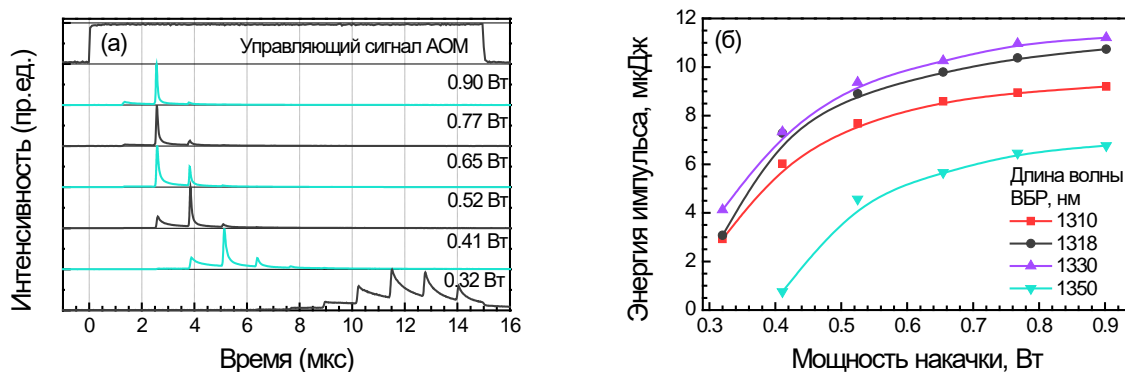


Рис. 9. Осциллограммы импульсного сигнала при различной величине мощности накачки (а). Зависимость энергии в импульсе от мощности накачки активной среды для различных длин волн лазерной генерации (б).

На Рис. 9(а) представлены осциллограммы импульсного сигнала при разных значениях мощности накачки. Длина волны ВБР составляла ~ 1330 нм, при этом частота модуляции АОМ была равна 500 Гц. Черной линией на данном рисунке показан управляющий сигнал АОМ. В качестве активной среды использовался световод #1. Рис. 9(б) представляет семейство кривых зависимости энергии в импульсе на выходе из лазера от мощности накачки в случае генерации на различных длинах волн, при тех же параметрах АОМ и для той же активной среды. Для всех представленных зависимостей свойственно насыщение энергии импульса с увеличением мощности накачки. Абсолютное значение энергии импульса на выходе из лазера зависит от величины ненасыщаемых потерь. Импульс перестает усиливаться тогда, когда прирост энергии импульса за счет распространения в активной среде становится равным потерям в той же самой среде из-за ненасыщаемых потерь. Аналогичное поведение наблюдалось и при использовании световодов #2 длиной 190 метров и #3 длиной 80 метров (длина активного световода выбиралась исходя из величины активного поглощения и ненасыщаемых потерь на 1230 нм).

На основе эффекта ограничения энергии в лазере с модуляцией добротности в параграфе 5.2 была проведена оценка средней концентрации ВАЦ в

фосфоросиликатных световодах, определено распределение ВАЦ по сечению и спектры сечений поглощения. Сложность измерения концентрации ВАЦ обусловлена тем, что, с одной стороны, в рабочих образцах висмутовых волокон концентрация висмута составляет $\sim 10^{-2}$ ат. %, что крайне мало для точного измерения концентрации методами рентгеноструктурного анализа и, с другой стороны, как известно, не весь висмут, введенный в матрицу сердцевины, образует ВАЦ. Вычисление количества ВАЦ в световоде основывалось на знании максимальной энергии импульса E_{\max} , которой можно достигнуть в конкретном световоде с помощью формулы:

$$n_{\text{ave}} = \frac{\varepsilon_{\text{ext}}}{(N_{\lambda_p} - N_{\lambda_s}) A_c h\nu} = \frac{4E_{\text{pul}}^{\max} \cdot \alpha_{\text{uns}}}{(N_{\lambda_p} - N_{\lambda_s}) \pi d_c^2 h\nu}. \quad (2)$$

где ε_{ext} – экстрагируемая энергия, α_{uns} – ненасыщаемые потери на длине волны сигнала, N_{λ_p} и N_{λ_s} – значения максимальной доли ионов в возбужденном состоянии для возбуждающего излучения на длинах волн накачки и сигнала соответственно, $A_c = \pi d_c^2 / 4$ – площадь сердцевины, а $h\nu$ – энергия кванта на длине волны сигнала. Таким образом, учитывая, что в световодах #1-#3 максимальная достигнутая энергия равнялась 13,8, 13,8 и 9,6 мкДж соответственно, а разность между максимальными долями ионов в возбужденном состоянии составляет $N_{\lambda_p} - N_{\lambda_s} \approx 0,31$, средняя концентрация ВАЦ в волокне #1 составила $\sim 6,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, #2 – $2,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, #3 – $\sim 8,9 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Радиальное распределение ВАЦ в световоде, $n(r)$, можно определить, измерив интенсивность люминесценции в образце висмутовой заготовки $I(r)$ на длинах волн характерных для того или иного ВАЦ. При этом следует принять, что распределения ВАЦ в заготовке и в световоде идентичны, или, по крайней мере, что вытяжка световода не меняет относительного распределения ВАЦ по радиусу. Также будем предполагать, что радиальное распределение ВАЦ пропорционально аналогичной зависимости интенсивности люминесценции активных центров, т.е. $n(r) \sim I(r)$. На Рис. 10(а) представлен измеренный описанным методом профиль распределения ВАЦ для световода #1. Из представленной зависимости видно, что

края распределения ВАЦ и сердцевинны световода достаточно хорошо совпадают. Незначительная часть ВАЦ, за границей сердцевинны может быть обусловлена с одной стороны диффузией висмута в оболочку световода, или же пределом точности измерений, выбранным методом. Стоит отметить, что для всех исследованных волокон был характерен минимум концентрации ВАЦ в центре световода и максимум ближе к границе между сердцевинной и оболочкой.

На основе данных по распределению активных центров по сечению световода, полям мод и спектрам поглощения ВАЦ ($\alpha_{\text{ВАЦ}}(\lambda)$) была определена зависимость сечения поглощения от длины волны ($\sigma_a(\lambda)$), с помощью выражения:

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{\alpha_{\text{ВАЦ}}(\lambda)}{n_{\text{eff}}(\lambda)}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{ВАЦ}}(\lambda)$ – поглощение ВАЦ на длине волны λ , $n_{\text{eff}}(\lambda) = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty E^2(r, \lambda) n(r) r dr / \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty E^2(r, \lambda) r dr$ – эффективная концентрация активных центров в световоде, учитывающая степень перекрытия поля моды и распределения активных центров, $E(r, \lambda)$ – амплитуда поля основной моды световода.

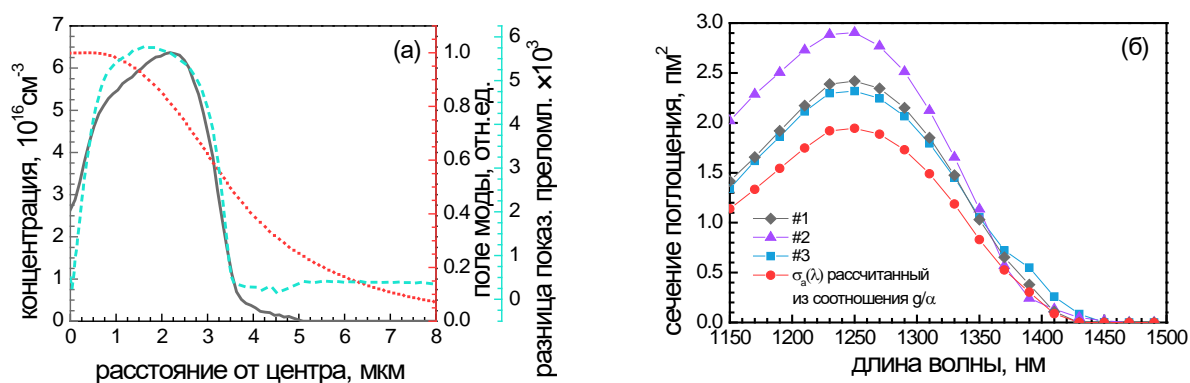


Рис. 10. Радиальное распределение ВАЦ (сплошная линия), поле фундаментальной моды на длине волны 1330 нм (точки) и профиль разницы показателей преломления (пунктир) для фосфоросиликатного световода с висмутом #1 (а). Спектры сечений поглощения ВАЦ-Р в фосфоросиликатных световодах с висмутом (б).

Полученные зависимости сечений поглощения в световодах #1-3 от длины волны показаны на Рис. 10(б). Как можно видеть, рассчитанные значения сечений имеют схожую форму, а их абсолютные значения отличаются не более чем на 25%. Так как в целом оптические свойства ВАЦ-Р для всех представленных световодов имеют схожий характер, логично ожидать, что абсолютные значения

сечений также должны быть одинаковы или близки друг к другу; как видно, для световодов #1 и #3 это условие выполняется, значения сечений для световода #2 имеют большее значение для тех же длин волн. Данное различие можно объяснить неточностью определения предельной энергии в импульсе, для световода #2 с невысокой величиной активных потерь. В силу того, что для точного измерения указанной энергии вероятнее всего требовалась длина активного световода больше, чем та, что использовалась в эксперименте (190 метров).

В заключении приведены основные выводы данной научной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Проведена оптимизация концентрации висмута в фосфоросиликатных световодах, для дальнейшего применения в качестве активной среды импульсных лазеров с синхронизацией мод и модуляцией добротности. Получены световоды с максимальным, известным на данный момент, коэффициентом усиления 0,32 дБ/м.

2 Разработаны лазеры на основе фосфоросиликатного висмутового световода с использованием активного и пассивного нелинейного кольцевого зеркала (NALM, NOLM). Проведенный анализ и оптимизация схем позволили получить импульсную генерацию в области 1,3 мкм со средней мощностью до 6 мВт, выходной энергией в импульсе $\sim 1,7$ нДж и длительностью ~ 11 пс. С помощью висмутового волоконного усилителя средняя мощность излучения была увеличена до ~ 30 мВт, а энергия в импульсе до $\sim 8,5$ нДж. Использование решеточного компрессора позволило сжать усиленные импульсы до длительности ~ 670 фс.

3 Разработан лазер на высокогерманатном световоде с висмутом с пассивной синхронизацией мод на нелинейном усиливающем кольцевом зеркале, генерирующий в области 1,7 мкм. Оптимизация параметров лазерной схемы позволила получить стабильную генерацию УКИ длительностью 17,7 пс с

энергией в импульсе 84 пДж. С помощью усилителя на подобном световоде энергия в импульсе была увеличена до 5,7 нДж.

4 Проведено моделирование висмутового лазера на 1,7 мкм на нелинейном кольцевом зеркале с использованием нелинейного уравнения Шредингера и фурье-метода с разделением по физическим факторам (SSF-метод). В рамках моделирования были проведены расчеты, позволяющие изучить формирование и распространение импульсов в резонаторе. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошее совпадение полученных результатов.

5 Разработана и исследована схема кольцевого лазера на фосфоросиликатном световоде с висмутом и пассивной синхронизацией мод с помощью насыщаемого поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок. В представленной лазерной схеме получена стабильная самозапускающаяся импульсная генерация диссипативных солитонов длительностью 7,8 пс и энергией 110 пДж.

6 Разработан кольцевой лазер на фосфоросиликатном висмутовом световоде с активной модуляцией добротности с помощью акустооптического модулятора (АОМ). С помощью набора волоконных брегговских решеток, была последовательно реализована генерация на нескольких длинах волн в диапазоне 1310-1350 нм. Энергия импульсов на выходе достигала ~11 мкДж, а длительность ~80 нс. Проведено исследование влияния ненасыщаемых потерь в активном световоде на параметры импульсного сигнала на выходе из лазера. Показано, что ограничение энергии импульса достигается из-за баланса уровня экстрагируемой на единицу длины энергии и уровня ненасыщаемых потерь. На основании этого факта были определены абсолютные значения средней концентрации ВАЦ-Р в сердцевине световодов. Используя данные о средней концентрации и относительное радиальное распределение ВАЦ-Р, измеренное спектральным методом, определен спектр сечения поглощения ВАЦ-Р. Абсолютное значение сечения поглощения в пике линии на 1250 нм составило ~2,35 пм^2 .

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Хегай А. М.**, Афанасьев Ф. В., Рюмкин К. Е., Фирстов С. В., Хопин В. Ф., Мясников Д. В., Мелькумов М. А., Дианов Е. М. Висмутовый волоконный пикосекундный лазер с длиной волны 1.3 мкм и синхронизацией мод на нелинейном кольцевом зеркале // Квант. электрон. – 2016. – Т. 46. – №. 12. – С. 1077-1081.
2. **Khegai A.**, Melkumov M., Riumkin K., Khopin V., Firstov S., and Dianov E. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm // Opt. Lett. – 2018. – Vol. 43. – Issue. 5. – P. 1127-1130.
3. **Khegai A.**, Melkumov M., Firstov S., Riumkin K., Gladush Y., Alyshev S., Lobanov A., Khopin V., Afanasiev F., Nasibulin A. G., and Dianov E. Bismuth-doped fiber laser at 1.32 μm mode-locked by single-walled carbon nanotubes // Opt. Express. – 2018. – Vol. 26. – Issue 18. – P. 23911-23917.
4. **Khegai A.**, Firstov S., Riumkin K., Afanasiev F., and Melkumov M. Q-switched bismuth-doped fiber laser at 1330 nm // IEEE Photonics Technol. Lett. – 2019. – Vol. 31. – Issue 12. – P. 963 – 966.
5. Мелькумов М. А., Михайлов В., **Хегай А. М.**, Рюмкин К. Е., Фирстов С. В., Афанасьев Ф. В., Гурьянов А. Н., Ян М. Ф., Сан Я., Луо Дж., Пак Дж. С., Шенк С. Д., Винделер Р. С., Вестбрук П. С., Лингл Р. Л., ДиДжиованни Д. Дж., Дианов Е. М.. Передача сигнала со скоростью 25 Гб/с с использованием висмутового волоконного усилителя со сдвинутым на длину волны 1300 нм максимумом усиления // Квант. электрон. – 2018. – Т. 48. – №. 11. – С. 989-992.
6. **Khegai A.**, Firstov S., Riumkin K., Alyshev S., Afanasiev F., Lobanov A., Guryanov A. and Melkumov M. Radial distribution and absorption cross section of active centers in bismuth-doped phosphosilicate fibers // Opt. Express. – 2020. – Vol. 28. – Issue 20. – P. 29335-29344.