

На правах рукописи

Хегай Александр Михайлович

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

01.04.21 – Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научном центре волоконной оптики Российской академии наук

**НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ**

**Мелькумов Михаил Александрович**

кандидат физико-математических наук, НЦВО РАН, г. Москва

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Первый волоконный лазер на световоде, активированном ионами неодима был разработан Снитцером в 1961 году [1]. По своей сути данный источник представлял миниатюризированную копию лазера на объемных элементах с использованием ламп вспышек в качестве накачки и серебряными зеркалами напыленными на торцы. Отсутствие соответствующих источников накачки (надлежащей яркости) и высокий уровень потерь в световодах привели к тому, что данная работа не получила должного внимания и развития. Второе рождение волоконная индустрия в целом и волоконные лазеры в частности получили благодаря грандиозному прорыву в технологии изготовления световодов, позволившему снизить оптические потери в волокнах до единиц дБ/км. Последующее появление ярких лазерных диодов, которые стали использоваться в качестве источников накачки волоконных лазеров и усилителей способствовало дальнейшему прогрессу в волоконной оптике.

Современные волоконные лазеры могут легко конкурировать с объемными лазерными системами, а по ряду параметров даже превосходят источники на объемных элементах. К неоспоримым преимуществам волоконных устройств можно отнести компактность и относительно низкую себестоимость, а минимальные требования или вовсе отсутствие необходимости в юстировке значительно повышают удобство использования и надежность таких систем.

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 единиц мВт до сотен кВт, а длительность излучения от сотен пкс до десятков фс. Однако развитие науки, техники, медицины и телекоммуникаций выдвигают все новые требования к волоконным лазерам, например, получение лазерной генерации в области спектра не охваченной устройствами на редкоземельных элементах. В частности, яркий пример такой ситуации имеется в сфере медицины. Растущий уровень жизни мирового населения привел к стремительному развитию неинвазивных систем медицинских диагностики основанных на использовании оптического излучения, среди которых наиболее распространены оптическая когерентная томография (ОКТ) и многофотонная микроскопия (ММ) [2]. Как показали многочисленные опыты, эффективность данных методик напрямую зависит от длины волны используемого излучения, так как живые ткани (например, человеческая кожа) характеризуются вполне определенным спектром поглощения, а для лучшей работы перечисленных методик требуется хорошее проникновение света вглубь ткани. В результате, так как основными

составляющими кожного покрова живых существ являются вода, оксигемоглобин и меланин имеются своего рода окна прозрачности в ближнем ИК диапазоне наиболее подходящие для ОКТ и ММ, к которым можно отнести области около 1,3 и 1,7 мкм. Однако, активные световоды, легированные редкоземельными элементами, не способны обеспечить эффективную работу в указанных диапазонах. Появление световодов с висмутом во многом позволило решить проблемы подобного рода [3,4].

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 с висмутом позволяет получить оптическое усиление в широком спектральном диапазоне от 1,1 до 1,8 мкм. Состоятельность висмутовых волокон, как полноценной активной лазерной среды неоднократно подтверждалась рядом научных работ, в которых были продемонстрированы эффективные рабочие схемы мощных непрерывных лазеров и усилителей. 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 непросветляемых 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 прикладную ценность таких устройств. По сути, на момент начала работы по теме данной диссертации практически отсутствовали работы по висмутовым импульсным лазерам, как с синхронизацией мод, так и с модуляцией добротности, за исключением устройств на алюмосиликатных световодах. Исходя из представленного состояния дел, была сформирована цель данной работы.

## **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.

2. Разработка и исследование работы висмутового волоконного лазера на фосфоросиликатном световоде с висмутом, с синхронизацией мод в нелинейном кольцевом зеркале, а также изучение возможности эффективного

усиления и компрессии импульсов на выходе их такого задающего генератора.

3. Реализация импульсного лазера на высокогерманатном световоде с висмутом с пассивной синхронизацией мод. Изучение формирования импульсной генерации данного лазера с помощью математической модели.

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

### **Научная новизна и практическая значимость**

1. Исследованы оптические свойства фосфоросиликатных световодов с висмутом, в том числе усиление, просветляемые и непросветляемые потери, в образцах с различной концентрацией висмута.

2. Разработана и подробно исследована серия рабочих схем висмутовых волоконных лазеров с пассивной синхронизацией мод с помощью нелинейного кольцевого зеркала и одностенных углеродных нанотрубок, генерирующие в области 1,3 и 1,7 мкм.

3. Исследовано усиление оптических импульсов в волоконных усилителях на основе германо- и фосфоросиликатных световодах с висмутом, а также изучено сжатие оптических импульсов висмутового лазера в волоконном и решеточном компрессорах.

4. Проведено исследование формирования импульсной генерации в висмутовом лазере на нелинейном кольцевом зеркале с помощью нелинейного уравнения Шредингера.

5. Характеристики полученных импульсных источников излучения сравнимы с параметрами коммерчески доступных устройств на основе объемных элементов и источниками на нелинейном преобразовании излучения. Длина волны генерации представленных висмутовых лазеров (1,3 и 1,7 мкм) может обеспечить эффективное применение таких устройств в медицине, телекоммуникациях, детекторах различных газов в атмосфере и т.д.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Зависимости непросветляемых потерь и усиления в фосфоросиликатных световодах с различным содержанием висмута позволяют оптимизировать висмутовую активную среду для использования в импульсных лазерах.

2. Волоконный лазер на фосфоросиликатном висмутовом световоде с пассивной синхронизацией мод с помощью нелинейного кольцевого зеркала генерирует импульсы пикосекундной длительности в области 1,3 мкм с энергией ~нДж.

3. Импульсный лазер с синхронизацией мод инициированной с помощью нелинейного зеркала Саньяка на высокогерманатном световоде с висмутом генерирует УКИ в диапазоне  $\sim 1,7$  мкм.

4. Режим пассивной синхронизации мод в лазере на фосфоросиликатном световоде с висмутом реализованный с помощью насыщаемого поглотителя на одностенных углеродных нанотрубках позволяет получить стабильную самостартующую генерацию диссипативных солитонов пикосекундной длительности.

### **Личный вклад диссертанта**

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

### **Апробация работы**

По материалам, вошедшим в диссертацию были сделаны доклады на научных конференциях: 25<sup>nd</sup> 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); 2<sup>nd</sup> 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). Так же результаты работы неоднократно докладывались на внутренних семинарах и конкурсах молодых ученых ИЦВО РАН.

### **Публикации**

Результаты работы, изложенные в данной диссертационной работе, были опубликованы в 2 статьях рецензируемых журналах из перечня ВАК и в трудах шести российских и международных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем диссертации – 136 страниц, включая 78 рисунков, 3 таблицы и библиографию, содержащую 127 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** аргументирована актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертации, приведена научная новизна и практическая значимость работы, 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. Так же 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.

**В третьей главе** рассмотрены оптические свойства фосфоросиликатных световодов с висмутом различного состава с точки зрения их последующего применения в качестве активной среды импульсных лазеров с модуляцией добротности и синхронизацией мод.

В пункте 3.2 рассмотрено влияние концентрации висмутовых активных центров (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, а сам спектр имеет относительно симметричную форму, слегка искаженную полосой поглощения ОН- групп на 1380 нм. Следует также отметить, что ненулевое усиление в районе 1400 нм обусловлено присутствием в активном световоде так называемых ВАЦ-Si.

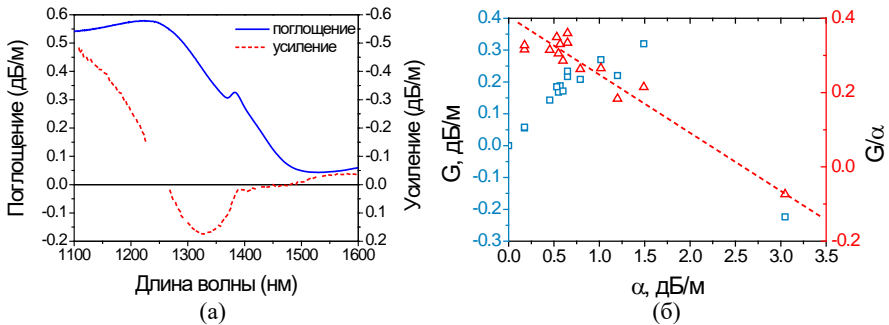


Рис. 1. Спектры поглощения и усиления в висмутовом фосфоросиликатном световоде (а). Экспериментальные зависимости усиления –  $G$  (левая шкала) и отношения усиления к поглощению –  $G/\alpha$  (правая шкала) в висмутовых световодах от поглощения  $\alpha$  на 1240 нм. Пунктирная прямая - линейная аппроксимация (б).

На Рис. 1(б) представлены экспериментально измеренные зависимости усиления  $G$  в фосфоросиликатных световодах с различной концентрацией ВАЦ от поглощения на 1240 нм. Видно, что максимальное усиление на уровне  $G=0.3$  дБ/м достигается в диапазоне поглощений ВАЦ от 1 до 1.5 дБ/м. Дальнейший рост концентрации активного висмута приводит к снижению усиления вплоть до отрицательных значений усиления (т.е.

поглощения). При разработке лазеров с синхронизацией мод, как правило, требуется обеспечить достаточно короткую длину резонатора для уменьшения дисперсионных и нелинейных эффектов. В этом случае удобно использовать активный световод с большим коэффициентом погонного усиления. В рамках данной серии фосфоросиликатных световодов был получен образец с максимальным известным на данный момент коэффициентом усиления 0.32 дБ/м. Значение данного результата особенно важно, в случае висмутовых волокон, так как световоды, легированные висмутом отличаются относительно низким (в сравнении со световодами с редкоземельными элементами) погонным усилением.

В пункте 3.3 описаны экспериментальные результаты зависимости насыщения поглощения от мощности сигнала для световодов с различным содержанием висмута. Исходя из данных измерений можно определить уровень так называемых остаточных или непросветляемых потерь, значение которых существенным образом сказывается на эффективности лазерных устройств и, в частности, на максимальной энергии, которую можно извлечь из активного световода. Ответ на последний вопрос важен при разработке лазеров с модуляцией добротности. Из Рис. 2(а) видно, что наибольшее отношение уровня исходных потерь к уровню остаточных потерь ( $\alpha_{\text{unsat}}/\alpha$ ) имеют световоды с начальным поглощением в диапазоне от 0.18 до 0.6 дБ/м. Световоды с затуханием, не попадающим в указанный диапазон, имеют меньший уровень просветления.

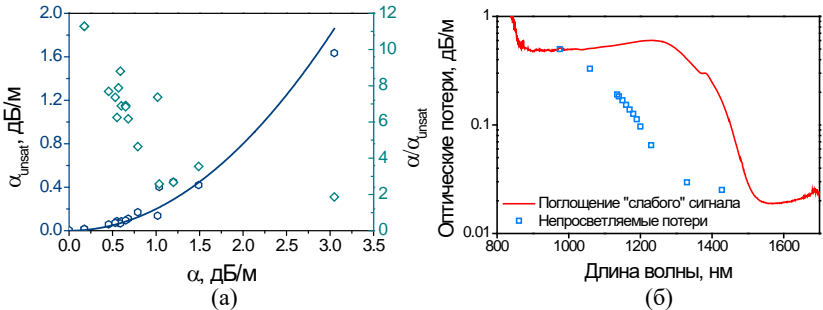


Рис. 2. Зависимость уровня непросветляемых потерь ( $\alpha_{\text{unsat}}$ ) и отношения поглощения к непросветляемым потерям ( $\alpha_{\text{unsat}}/\alpha$ ) от поглощения ( $\alpha$ ) на 1240 нм в фосфоросиликатных световодах с висмутом (а). Спектр оптических потерь и зависимость непросветляемых потерь от длины волны в фосфоросиликатном световоде, легированном висмутом.

Было показано, что при разработке лазеров с модуляцией добротности наилучшим образом подходит фосфоросиликатный световод с поглощением  $\sim 0,6$  дБ/м на длине волны 1,24 мкм.

Так же в рамках данной главы исследовалась зависимость непросветляемых потерь в активном световоде в зависимости от длины волны зондирующего сигнала. Результаты измерений представлены на Рис. 2 (б).



Видно, что непросветляемые потери резко возрастают с уменьшением длины волны зондирующего излучения, и на длине волны  $\sim 980$  нм равны поглощению слабого сигнала. Можно полагать, что при более коротких длинах волн излучения будет наблюдаться оптическое затемнение световода.

Исходя из проведенных измерений были подобраны висмутовые световоды, наиболее подходящие для использования в качестве активной среды импульсных лазеров с модуляцией добротности и синхронизацией мод.

**В четвертой главе** описана работа лазера с синхронизацией мод на основе керровской нелинейности.

В пункте 4.1 детально разобрана функция нелинейного кольцевого зеркала (зеркала Саньяка), как насыщаемого поглотителя. Было показано, что использование световодов с двулучепреломлением внутри зеркала Саньяка значительно влияет на его пропускание, вне зависимости от мощности падающего сигнала.

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

В пункте 4.3 описана работа лазера на нелинейном усиливающем кольцевом зеркале (NALM). Экспериментальная схема показана на Рис. 3, 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. Накачка активного световода производилась с помощью спектрально селективного мультиплексора с рабочими длинами волн 1240 и 1320 нм. Аналогичный разветвитель использовался для выведения непоглощенной накачки из резонатора. В качестве нелинейного световода в данной схеме использовалось германосиликатное волокно с 50 мол. %  $\text{GeO}_2$  (Hi-Ge световод), нелинейный коэффициент которого на рабочей длине волны  $\gamma_{\text{HiGe}}=40 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  [5].

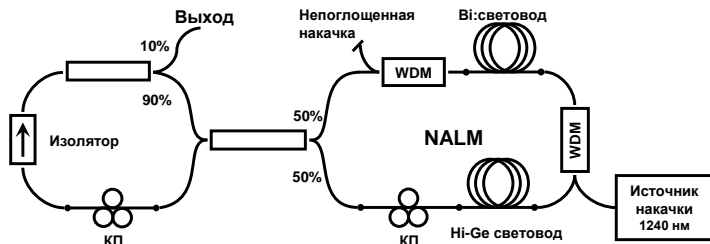


Рис. 3. Схема висмутового волоконного лазера, с синхронизацией мод в нелинейном усиливающем кольцевом зеркале. КП – контроллер поляризации, WDM – спектрально селективный мультиплексор 1240/1320, Hi-Ge световод – германосиликатный световод с 50 мол. %  $\text{GeO}_2$ .

Нелинейное зеркало в данной схеме образовывалось широкополосным 3дБ разветвителем. Для подстройки поляризации внутри лазера в схему была включена пара контроллеров поляризации. Оптический изолятор обеспечивал однонаправленную генерацию. Для вывода сигнала использовался неселективный мультиплексор, ответвлявший 10% внутрирезонаторной мощности.

При мощности накачки около 230 мВт в представленной лазерной схеме можно было добиться лазерной генерации в многоимпульсном режиме. Для этого было необходимо подстроить состояние поляризации в резонаторе путем регулировки контроллеров, а также внешним воздействием инициировать запуск режима синхронизации мод. Следует отметить, что импульсному режиму предшествовала непрерывная генерация, порог которой составлял  $\sim 80 - 100$  мВт, в зависимости от подстройки контроллера поляризации (КП). При этом одноимпульсный режим наблюдался при мощности накачки ниже пороговой – порядка 180 мВт, что говорило о гистерезисе в работе лазера. Спектры выходного сигнала при различных длинах Ni-Ge световода представлены на Рис. 4(а). В диапазоне длин 0,7 – 2 метра наблюдалась отчетливая генерация диссипативных солитонов (ДС). Отличить такие солитоны от других импульсных режимов достаточно легко по форме спектра выходного сигнала, для которого характерна относительная плоская вершина огибающей и резкие края.

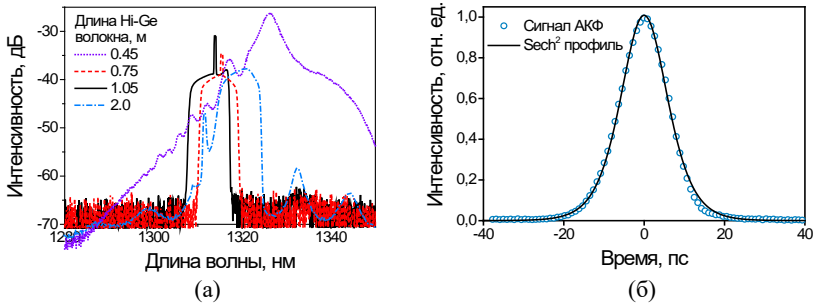


Рис. 4. Выходные спектры импульсной генерации лазера на NALM в случае различных длин Ni-Ge световода (а). АКФ импульсного сигнала на выходе из схемы с усиливающим зеркалом (б).

Из рисунка так же видно, что изменение длины нелинейного световода оказывало незначительное влияние на ширину спектра. Автокорреляционная функция (АКФ) импульсов для представленных режимов так же практически не менялась и составляла  $\sim 20,3$  пс (Рис. 4(б)). Предполагая  $\text{sech}^2$  форму огибающей, данная ширина АКФ соответствует длительности импульса 13,8 пс. Частота повторения импульсов составила 3,9 МГц, что точно соответствует времени обхода резонатора. При этом энергия в отдельном импульсе не превышала 50 пДж.

В пункте 4.4 представлен другой вариант схемы с зеркалом Саньяка (нелинейное оптическое кольцевое зеркало – NOLM). Схема лазера показана на Рис. 5(а). Структурно данный лазер во многом повторяет схему, описанную в предыдущем разделе. В качестве активного световода также использовался 30 м отрезок, световода спектральные характеристики которого показаны на Рис. 1.

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

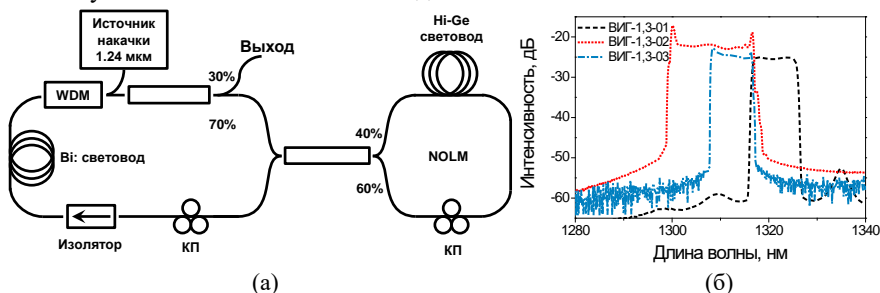


Рис. 5. Схема импульсного лазера на основе нелинейного оптического кольцевого зеркала (NOLM) (а). Спектры импульсного режима работы лазеров ВИГ-1,3-01, 02 и 03 (б).

Исходя их формы спектров импульсного сигнала (Рис. 5(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. Также, следует отметить что спектр, соответствующий ВИГ-1,3-01 имеет небольшие пики усиленной спонтанной эмиссии по бокам от центральной длины волны генерации, что обусловлено большим двулучепреломлением в Hi-Ge световоде (аналогичные пики наблюдаются и для схемы на NALM). 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	Hi-Ge 50%, 5м	200	~3,5	10
ВИГ 1,3 - 02	Hi-Ge 30%, 5м	1650		11,3
ВИГ 1,3 - 03	Hi-Ge 30%, 10м	310		22

В пункте 4.5 приводятся результаты усиления и сжатия импульсов задающего генератора представленного выше. В усилителе использовался тот же самый активный висмутовый световод, что и в лазере, длиной 200 м. В качестве источников накачки использовались одномодовые лазерные диоды на 1240 нм с мощностью до 300 мВт. Меняя мощность диодов накачки можно было варьировать коэффициент усиления и соответственно уровень выходного сигнала от 0,6 до примерно 30 мВт, что соответствует коэффициенту усиления  $\sim 17$  дБ и энергии в импульсе  $\sim 8,5$  нДж.

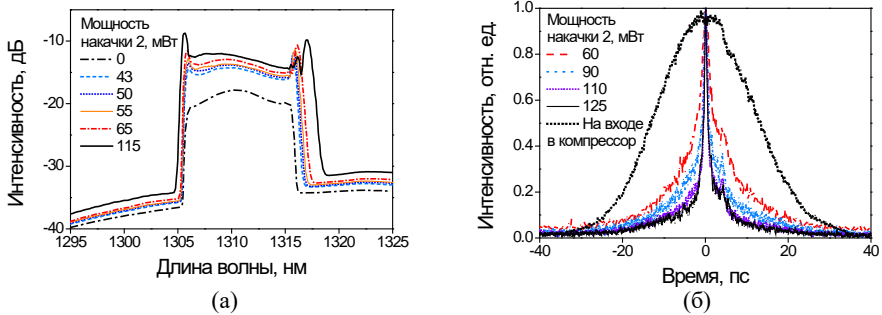


Рис. 6. Оптические спектры усиленного сигнала при различных мощностях источника накачки 2 висмутового волоконного усилителя (а). АКФ на входе и выходе из компрессора при различных мощностях накачки усилителя (б).

Для усиления и компрессии был выбран сигнал на выходе схемы ВИГ 1,3-03. На Рис. 6(а) представлены спектры излучения на выходе усилителя в зависимости от мощности источника накачки 2 (попутная накачка усилителя), мощность источника накачки 1 (встречная накачка) составляла  $\sim 300$  мВт. Исходная ширина спектра составляла около 9 нм, а по мере роста мощности накачки, спектр уширялся, достигая  $\sim 12$  нм на максимальной мощности. При увеличении мощности на краях спектра вследствие действия фазовой сомомодуляции (ФСМ) возникают характерные пики. В противоположность оптическим спектрам, АКФ при росте накачки изменяется незначительно и при максимальной мощности источника 2 ширина достигает  $\sim 35$  пс, что соответствует длительности импульсов порядка 23 пс. Форма АКФ близка к гауссовой.

Далее масштабированные импульсы были сжаты в компрессоре. На Рис. 6(б) представлена нормированная АКФ до и после компрессора при различных мощностях накачки 2 усилителя (мощность источника накачки 1, как и в предыдущем эксперименте, была равна 300 мВт). Исходная ширина АКФ по полувысоте составляла  $\sim 26$  пс. После сжатия ширина снижалась до минимального уровня в 1 пс, что соответствовало длительности импульса примерно 670 пс. Такая длительность была достигнута при мощности накачки 2 усилителя около 125 мВт.

**Пятая глава** была посвящена волоконному лазеру на высокогерманатном световоде, легированном висмутом, работающий в диапазоне 1,7 мкм. Известно, что в высокогерманатных висмутовых световодах помимо висмутовых активных центров, ассоциированных с кремнием (ВАЦ-Si), ответственных за люминесценцию и усиление в области 1,45 мкм присутствуют так называемые ВАЦ-Ge – связанные с германием, работающие в области 1,7 мкм. Типичной концентрацией GeO<sub>2</sub>, необходимой для получения эффективного висмутового световода для диапазона 1,7 мкм является 40-50 мол. %, что сказывается на относительно высокой разнице показателей преломления между сердцевиной и оболочкой ( $\Delta n$ ), при использовании чистого кварцевого стекла для последней. Как правило, для таких световодов  $\Delta n \sim 70 \cdot 10^{-3}$ . 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. 7. Усиление в данном образце составило ~1 дБ/м в пике усиления на 1700 нм. Дисперсия групповых скоростей в высокогерманатном волокне равнялась ~ 120 пс<sup>2</sup>/км на рабочей длине волны 1,7 мкм. Для измерения дисперсии использовался известный интерференционный метод, описанный в [6]. Накачка активного световода производилась с помощью сплавного спектрально-селективного мультиплексора 1550/1700 нм. В качестве источника накачки выступал самодельный непрерывный Er-Yb лазер на длине волны 1570 нм с максимальной выходной мощностью 2 Вт, или лазерный диод на 1550 нм с выходной мощностью до 150 мВт.

Так как работа нелинейного усиливающего зеркала определяется нелинейным фазовым набегом противоположно направленных лучей в зеркале Саньяка, следуя опыту разработки аналогичного лазера на фосфоросиликатном световоде в кольцо зеркала был включен отрезок германосиликатного волокна с содержанием GeO<sub>2</sub> ~ 30 мол. %. Длина нелинейного световода составила 25 метров.

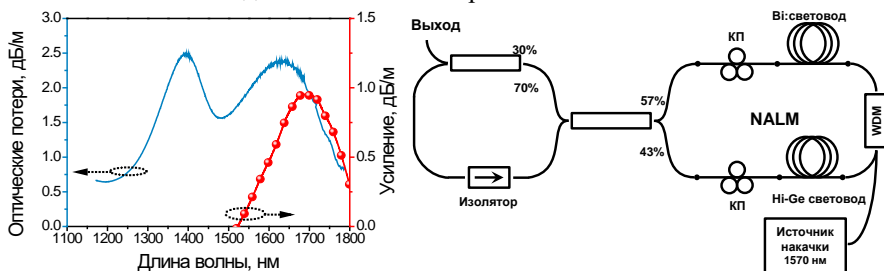


Рис. 7. Спектр оптических потерь и усиления в высокогерманатном световоде с висмутом (а). Схема восьмерка с NALM на высокогерманатном световоде с висмутом (б).

В результате, в представленной лазерной схеме была реализована стабильная одноимпульсная генерация в диапазоне 1,69-1,70 мкм. Порог импульсной генерации составлял ~150 мВт, при этом лазер стартовал с многоимпульсного режима. Исследование поведения схемы в зависимости от мощности накачки показало типичный гистерезис режима синхронизации мод. В частности, для получения одноимпульсной генерации следовало опустить мощность накачки до уровня 80-120 мВт, в зависимости от настройки контроллеров поляризации. Измеренная частота повторения импульсов 3,57 МГц точно соответствовала времени обхода резонатора. Вариация пиковой мощности импульса в процессе работы лазера не превышала 12%. Спектр импульсного сигнала представлен на Рис. 8(а). Кривая спектра имеет гладкое очертание с достаточно резкими, но не вертикальными спадами по краям. Если сравнить форму спектра выходного сигнала с гауссианом и параболой легко видеть, что в отличие от гауссовой кривой полоса генерации имеет существенно более резкие края, которые более характерны для квадратичной зависимости. Действительно, если сравнивать спектр импульсов с параболой очевидно сходство кривых, в особенности их левых частей. Из литературы известно, что в резонаторах импульсных лазеров с суммарной положительной дисперсией существует возможность генерации симилияритонов [7]. Отличительной особенностью данного импульсного режима является параболическая форма спектра и временной огибающей. Отклонение правого края спектра сигнала от квадратичной зависимости может быть обусловлено большой нелинейностью, используемых высокогерманатных световодов, которые, в частности, способствуют чрезмерному воздействию ФСМ, что и вызвало стоксово уширение спектральной линии.

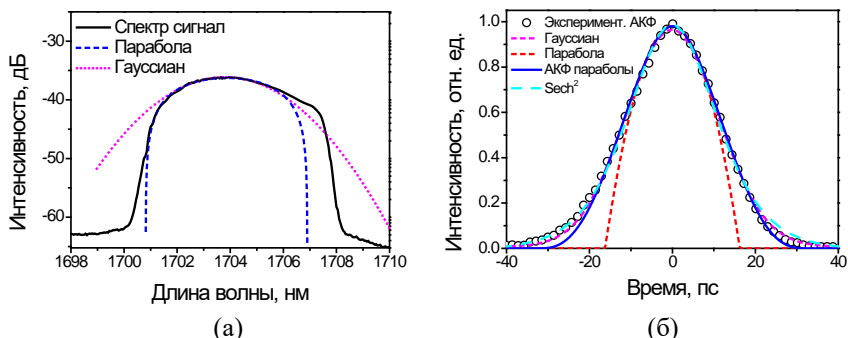


Рис. 8. Спектр импульсной генерации (а). АКФ импульсного сигнала, аппроксимированная гауссовой кривой,  $\text{sech}^2$  профилем и АКФ параболы (б).

Аппроксимация АКФ сигнала (Рис. 8(б)) различными функциями, в том числе,  $\text{sech}^2$  профилем, АКФ параболы, гауссианом не дает полной уверенности утверждать, что форма импульса точно соответствует одному из

перечисленных контуров. Тем не менее, можно выделить гауссову кривую, как наиболее близкую к форме огибающей (здесь мы не рассматривали возможное искажение формы АКФ, например, за счет интегрирующих элементов электрической схемы автокоррелятора). 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.

В рамках данной работы было изучено масштабирование импульсов в усилителе. В качестве активной среды усилителя использовался  $\sim 100$  м отрезок висмутового световода, по многим параметрам схожий с образцом, использованным для лазерной схемы, но с  $\sim 2.5$  раза меньшим активным поглощением (0,92 дБ/м на 1650 нм) и, соответственно, усилением (0,34 дБ/м на 1700 нм). Усилитель работал по схеме со встречной накачкой на длине 1570 нм в качестве источника использовался Er-Yb лазер с выходной мощностью 500 мВт. 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 изложены в пункте 5.3. Распространение импульса в световоде удобно описывать с помощью нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) [8]:

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

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  $\beta_2$  и  $\beta_3$  учитывали действие дисперсия 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  $A_{\text{eff}}$  световода.

Численное решение уравнения (1) производилось с помощью SSF-метода (Split-step Fourier method), в основе которого лежит использование быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для упрощения в расчете действие зеркала Саньяка было заменено введением эквивалентного насыщаемого поглотителя (пропускание зеркала – ПЗ) с функцией пропускания вида:

$$T(\tau) = T_{\min} + \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{2} \cdot \left( 1 + \cos \left( \pi + \pi \frac{P(\tau)}{P_{\text{sat}}} \right) \right), \quad (2)$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$  – максимальное и минимальное пропускание зеркала соответственно,  $P(\tau)$  – мгновенная мощность в импульсе, а  $P_{\text{sat}}$  – мощность сигнала, соответствующая первому максимуму пропускания.

Результаты моделирования представлены на Рис. 9. Отчетливо видно, что рассчитанный спектр достаточно хорошо совпадает с измеренными зависимостями, в особенности с левой стороны. Более того, контур смоделированного спектра очень близок к параболической функции, что также косвенно указывает на генерацию симилиритонов. На Рис. 9(б) представлена эволюция длительности импульса за один обход внутри резонатора. Видно, что импульс испытывает сильное уширение при распространении через высокогерманатные световоды. При этом увеличение длительности импульса преимущественно компенсируется за счет действия элемента “ПЗ”, присутствие которого оказывается исключительно важным для получения стабильной генерации и формирования импульсов.

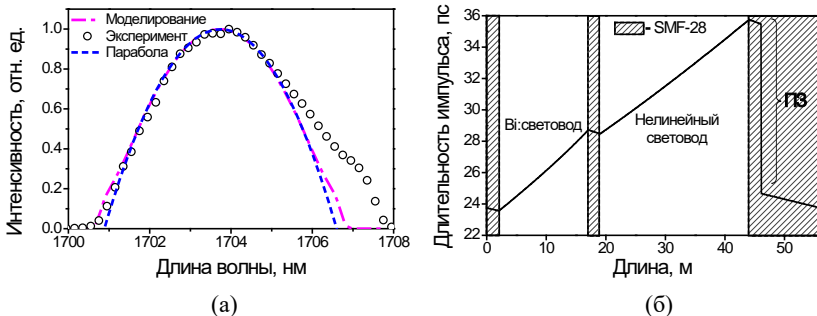


Рис. 9. Сравнение экспериментально измеренных спектров (а) с результатами моделирования. Эволюция длительности импульса (FWHM) в процессе распространения внутри резонатора (б).

Помимо представленных результатов было показано, что частотная модуляция импульса по мере распространения внутри резонатора практически не менялась и оставалась близкой к линейной. Подобное поведение импульсов может быть обусловлено действием дисперсии групповых скоростей, которая, в данном случае, превалировала над нелинейностью.

**В шестой главе** описывается лазер на фосфоросиликатном висмутовом световоде с синхронизацией мод в насыщаемом поглотителе на одностенных углеродных нанотрубках (ОУНТ). Экспериментальная схема кольцевого лазера представлена на Рис. 10 (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.

Полная длина резонатора составила 20 м. За исключением 15 м отрезка активного световода кольцо лазера состояло из SMF-28. Экспериментально измеренные дисперсионные картины (в том числе дисперсия 3-го порядка) световодов, используемых в схеме, представлены на Рис. 10(б).

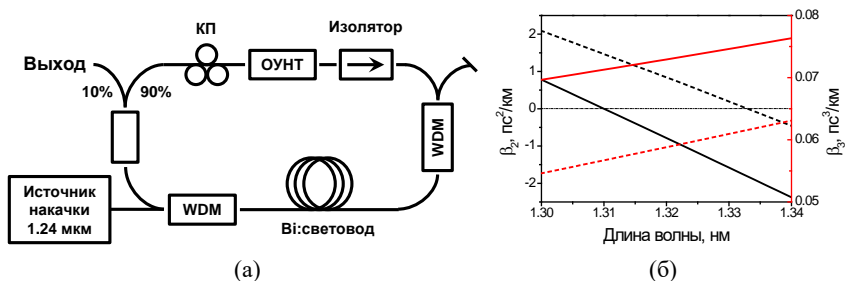


Рис. 10. Схема кольцевого лазера на висмутовом световоде и синхронизацией мод с помощью ОУНТ (а). Дисперсия 2-го и 3-го порядка ( $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ) в висмутовом световоде – пунктирная линия и SMF-28 – сплошная линия (б).

Образец с нанотрубками, используемый в работе был синтезирован с помощью аэрозольного химического осаждения из газовой фазы [9]. Образцы нанотрубок собирались на нитроцеллюлозных фильтрах в виде тонкого слоя, который затем переносился непосредственно на поверхность феррулы. Точный контроль условий синтеза нанотрубок позволял добиться заданных оптических свойств образцов. В частности, средний диаметр ОУНТ составлял  $\sim 2,4$  нм, что обеспечивало спектральное положение второго оптического перехода Вант-Гоффа на 1,37 мкм. Спектр поглощения “слабого” сигнала в образце ОУНТ представлен на Рис. 11(а). На длине волны 1,32 мкм потери составили 3,2 дБ. Использование образцов с большим поглощением было нежелательно, так как требовало значительного увеличения длины активного световода. Время релаксации нанотрубок имело две составляющие: быструю и медленную, наличие которых обусловлено присутствием в образце так называемых металлических и полупроводниковых ОУНТ. Причем первые ответственны за быструю компоненту ( $\sim 500$  фс), тогда как вторые обеспечивают насыщение потерь и медленную релаксацию ( $\sim 1-2$  пс). Также было измерено нелинейное пропускание в слое нанотрубок Рис. 11(б). Исходя из полученных данных видно, что нелинейное пропускание в образце достигает 5%.

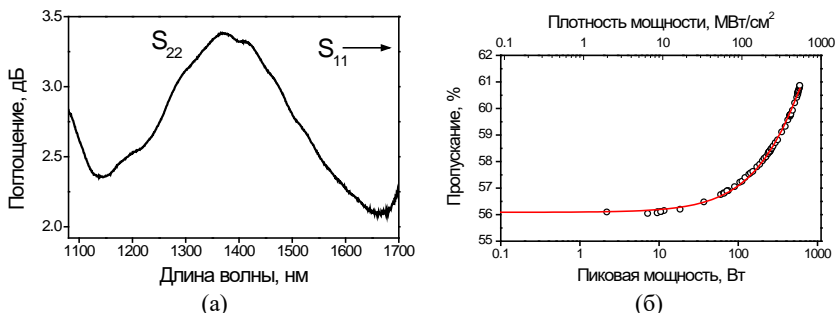


Рис. 11. Поглощение слабого сигнала (а) и насыщение оптических потерь (б) в образце ОУНТ.

С помощью точной подстройки КП в представленной схеме была получена стабильная самостартующая импульсная генерация. Режиму синхронизации мод предшествовала стохастическая многомодовая непрерывная генерация при значениях мощности накачки ниже пороговой. Зависимость выходной средней мощности лазера от мощности накачки, а также соответствующие пороги генерации представлены на Рис. 12(а).

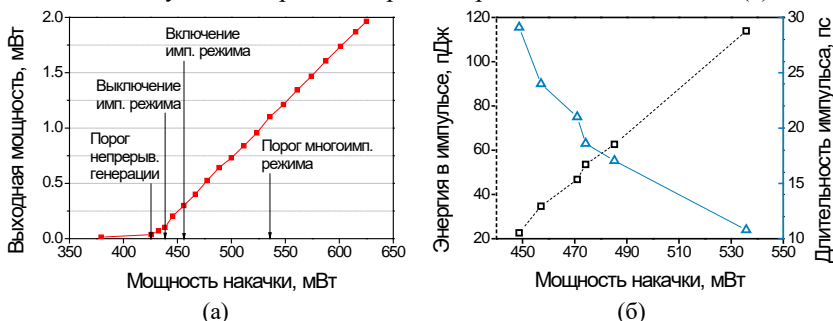


Рис. 12. Выходная мощность лазерной схемы (а), и зависимость энергии в импульсе и его длительности (б) от мощности накачки.

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. 12(б).

**В заключении** приведены основные выводы данной научной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе исследовались оптические свойства активных волоконных световодов, легированных висмутом, а так же импульсные

режимы лазеров на их основе. В результате проведенной работы были получены следующие основные результаты:

1. Проведена оптимизация состава фосфоросиликатных световодов, легированных висмутом, 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 и отношением оптических потерь к непросветляемым.

2. Реализована и исследована схема полностью волоконного висмутового лазера с пассивной синхронизацией мод, основанной на керровской нелинейности. Используя фосфоросиликатный световод с висмутом в качестве активной среды удалось получить генерацию в области 1300 нм. В лазере на нелинейном усиливающем кольцевом зеркале (NALM) была получена генерация диссипативных солитонов длительностью  $\sim 14$  пс и энергией 50 пДж.

3. Разработан лазер на основе фосфоросиликатного висмутового световода с использованием пассивного нелинейного кольцевого зеркала (NOLM). Проведенный анализ и оптимизация схемы позволили получить импульсную генерацию со средней мощностью  $\sim 6$  мВт, выходной энергией в импульсе  $\sim 1,7$  нДж и длительностью  $\sim 11$  пс. С помощью висмутового усилителя средняя мощность сигнала из задающего генератора была увеличена до  $\sim 30$  мВт, а энергия в импульсе – до  $\sim 8,5$  нДж. Использование решеточного компрессора позволило сжать усиленные импульсы до субпикосекундных длительностей  $\sim 670$  фс.

4. Разработан висмутовый лазер с пассивной синхронизацией мод на нелинейном усиливающем кольцевом зеркале, генерирующий в области 1700 нм. Оптимизация параметров лазерной схемы позволила получить стабильную генерацию УКИ длительностью 17,7 пс, энергией в импульсе 84 пДж и пиковой мощностью 4,7 Вт. С помощью усилителя на высокогерманатном световоде с висмутом энергия в импульсе была увеличена до 5,7 нДж.

5. Разработана модель лазера на нелинейном кольцевом зеркале с использованием нелинейного уравнения Шредингера и SSF-метода. В рамках представленной модели были проведены расчеты, позволяющие изучить формирование и распространение импульсов в резонаторе. Сравнение расчетных данных с экспериментом показало хорошую корреляцию полученных результатов.

6. 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 самостартующая импульсная генерация диссипативных солитонов длительностью 7,8 пс и энергией 110 пДж.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи

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. **Khagai A.**, Melkumov M., Riumkin K., Khopin V., Firstov S., and Dianov E. NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7  $\mu\text{m}$  // Optics letters. – 2018. – Vol. 43. – Issue. 5. – P. 1127-1130.

### Доклады на конференциях

3. Melkumov M. A., **Khagai A. M.**, Myasnikov D. V., Dianov E. M. NOLM-based mode-locked bismuth doped fiber laser at 1.31 microns // Proc. of the 25th annual International Laser Physics Workshop (LPHYS'16), Erevan, 11-15 July, 2016.
4. **Хегай А. М.**, Мелькумов М. А., Мясников Д. В., Дианов Е. М. Висмутовый волоконный лазер УКИ на нелинейном оптическом кольцевом зеркале, работающий в области 1.3 микрона // Труды 7-го Российского семинара по волоконным лазерам (РСВЛ 2016), Новосибирск, 5-9 сентября, 2016, С. 95.
5. **Khagai A. M.**, Melkumov M. A., Riumkin K. E., Khopin V. F., Afanasiev F. V., Myasnikov D. V., Dianov E. M. Figure-of-eight bismuth doped fiber laser operating at 1.3 microns in dissipative soliton regime // Proceedings of SPIE Vol. – 2017. – Т. 10083. – С. 100830A-1.
6. **Khagai A. M.**, Melkumov M. A., Afanasiev F. V., Khopin V. F., Dianov E. M. Investigation of optical properties of short-lived luminescence centers in bismuth-doped phosphosilicate fibers // Proc. Borate&Phosphate Conference, Oxford, Great Britain, 24-28 July, 2017, P. 140.
7. **Khagai A.**, Melkumov M., Riumkin K., Khopin V., Guryanov A., and Dianov E. M Mode-locked bismuth fiber laser operating at 1.7  $\mu\text{m}$  based on NALM // Advanced Solid State Lasers, Nagoya, Japan, 01-05 October, 2017, P. JTU2A. 20.
8. **Хегай А.М.**, Мелькумов М.А., Хопин В.Ф., Рюмкин К.Е., Фирстов С.В., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М 1.7 мкм пикосекундный висмутовый волоконный лазер на нелинейном усиливающем кольцевом зеркале // Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО 2017), Пермь, 03-06 Октября, 2017
9. **Khagai A. M.**, Melkumov M. A., Gladush Y. G., Afanasiev F. V., Nasibulin A. G., Dianov E. M. Bismuth fiber laser at 1.32  $\mu\text{m}$  mode-locked with SWCNT // 5th Workshop on Specialty Optical Fiber and Their Applications (WSOF'2017), Limassol, Cyprus, 11-13 October, 2017.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Snitzer E. Optical maser action of  $\text{Nd}^{+3}$  in a barium crown glass // *Phys. Rev. Lett.* – 1961. – Vol. 7. – Issue. 12. – P. 444.
- 2 Horton N. G., Wang K., Kobat D., Clark C. G., Wise F. W., Schaffer C. B., and Xu C. In vivo three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain // *Nat. Photonics.* – 2013. – Vol. 7. – Issue. 3. – P. 205.
- 3 Bufetov I. A., Melkumov M. A., Firstov S. V., Riumkin K. E., Shubin A. V., Khopin V. F., Guryanov A. N., Dianov E. M. Bi-Doped Optical Fibers and Fiber Lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2014. Sept. Vol. 20, no. 5. P. 111–125.
- 4 Firstov S. V., Alyshev S. V., Riumkin K. E., Khagai A. M., Kharakhordin A. V., Melkumov M. A., and Dianov E. M. Laser-Active Fibers Doped With Bismuth for a Wavelength Region of 1.6–1.8  $\mu\text{m}$  // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2018. – Vol. 24. – Issue. 5. – P. 1-15.
- 5 Yatsenko Y., Mavritsky A. D-scan measurement of nonlinear refractive index in fibers heavily doped with  $\text{GeO}_2$  // *Opt. Lett.* – 2007. – Vol. 32. – Issue. 22. – P. 3257-3259.
- 6 Tateda M., Shibata N., Seikai S. Interferometric method for chromatic dispersion measurement in a single-mode optical fiber // *IEEE J. Quantum Electron.* – 1981. – Vol. 17. – Issue. 3. – P. 404-407.
- 7 Renninger W. H., Chong A., Wise F. W. Pulse shaping and evolution in normal-dispersion mode-locked fiber lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2012. – Vol. 18. – Issue. 1. – P. 389-398.
- 8 Agrawal G. P. Nonlinear fiber optics // *Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century.* – Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. – P. 39-50.
- 9 Nasibulin A. G., Kaskela A., Mustonen K., Anisimov A. S., Ruiz V., Kivisto S., Rackauskas S., Timmermans M. Y., Pudas M., Aitchison B., Kauppinen M., Brown D. P., Okhotnikov O. G., and Kauppinen M. Multifunctional free-standing single-walled carbon nanotube films // *ACS nano.* – 2011. – Vol. 5. – Issue 4. – P. 3214-3221.