

На правах рукописи



Жлуктова Ирина Вадимовна

**ГЕНЕРАЦИЯ СУПЕРКОНТИНУУМА  
В ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ**

Специальность 1.3.19. Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

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

**Научный руководитель:**

**Камынин Владимир Александрович**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИОФ РАН

**Официальные оппоненты:**

**Наний Олег Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, профессор Физического факультета

**Кохановский Алексей Юрьевич**, кандидат физико-математических наук, Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, научный сотрудник лаборатории нелинейной фотоники

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Защита состоится «19» сентября 2022 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.223.02 при ИОФ РАН по адресу г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.02

кандидат физико-математических наук



Т.Б. Воляк

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность исследования**

В диссертации исследуется генерация суперконтинуума в волоконных усилителях при использовании различных волоконных лазерных источников, излучающих в спектральном диапазоне 1–2 мкм, и различных нелинейных сред.

В последние десятилетия генерация суперконтинуума стала предметом исследований многих научных групп, т.к. данная тема представляет интерес для разных областей науки [1], например для дистанционного зондирования объектов [2], анализа дыхания [3], спектроскопии и детектирования остаточных газов [4], гиперспектральной микроскопии [5], ранней диагностики заболеваний [6], когерентной томографии [7], оптической коммуникации [8].

Впервые о генерации суперконтинуума упоминается в [9]. Исследовательская группа получила спектральное уширение при использовании пикосекундных импульсов с энергией 5 мДж, источником которых был неодимовый лазер с модулированной добротностью, а в качестве нелинейной среды применялось боросиликатное стекло. В последующих исследованиях были представлены результаты по генерации суперконтинуума в таких образцах, как кальцит, кварц, хлорид натрия.

В последние десятилетия возник интерес к генерации суперконтинуума в оптических волокнах из-за их оптических, геометрических и механических свойств. К таким свойствам можно отнести одномодовость или многомодовость волокон, малые оптические потери, изменение дисперсии (специализированные волокна), легирование волокон активными ионами, реализация нелинейных эффектов за счет изменения параметров образцов, а также их прочность, стойкость к изгибам.

Развитие волоконной оптики и компонентов, таких как высокоомощные лазерные диоды накачки, оптические волокна различного состава и структуры, позволяет реализовать генерацию суперконтинуума в спектральном диапазоне 0.4–

25 мкм [10,11]. Дополнительно была продемонстрирована генерация в конусных волоконных структурах с перетяжкой. В этом случае спектр простирался в пределах 0.37–1.5 мкм [12].

Одной из распространенных оптических схем генерации суперконтинуума является использование источника импульсов с высокой пиковой мощностью и нелинейной среды для преобразования оптического спектра. В качестве накачки генераторов суперконтинуума выступают оптические системы, состоящие из задающих импульсных лазеров с каскадами оптических усилителей, позволяющие получить достаточную пиковую мощность для эффективного уширения спектра. Преобразование оптического излучения происходит за счет комплекса таких нелинейных эффектов как четырехволновое смешение (ЧВС), фазовая самомодуляция (ФСМ), вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР).

Для генерации суперконтинуума в длинноволновой области спектра в диапазоне 2–3 мкм используют лазерные системы, основанные на таких редкоземельных элементах (РЗЭ), как тулий или гольмий. Для генерации коротковолновой области спектра используют лазерные источники, основанные на ионах иттербия. В качестве нелинейной среды активно применяются волокна с большим содержанием оксида германия ( $\text{GeO}_2$ ), одним из их видов являются волокна с переменной по длине дисперсией [13]. Данный тип волокон позволяет получить генерацию до 3 мкм за счет высокой нелинейности Керра, ВКР и низких (по сравнению со стандартными одномодовыми волокнами) потерь в длинноволновой области. При этом для данных световодов сохраняются преимущества волокон на кварцевой основе, в том числе возможность использования стандартных сварных соединений, что делает источники суперконтинуума более технологичными.

Для получения спектров генерации с длинноволновой границей более 3 мкм все чаще используются нелинейные волокна с уменьшенными потерями в длинноволновой части спектра, такие как ZBLAN ( $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ ) [14], флюоридные [15], селенидные и флюоритные волокна.

**Целью работы** являлось исследование генераторов суперконтинуума, основанных на импульсных лазерных источниках, излучающих в спектральном диапазоне 1–2 мкм, совместно с волоконными усилителями, легированными различными редкоземельными элементами, и нелинейными средами, основанными на кварце, а также анализ спектральных и временных выходных параметров полученного излучения. Исходя из этого, в ходе работы необходимо было решить следующие **задачи**.

1. Разработка и исследование полностью волоконных источников ультракоротких или субпикосекундных импульсов, работающих в режиме синхронизации мод и излучающих в спектральной области 1–2 мкм.
2. Разработка и исследование волоконных усилителей для обеспечения высокой плотности мощности, которая необходима для наиболее эффективной генерации суперконтинуума.
3. Разработка и исследование генератора суперконтинуума, основанного на разных задающих источниках, и анализ полученных данных.
4. Частичное усиление излучения суперконтинуума за счет использования волоконных усилителей, легированные различными РЗЭ (эрбий, тулий и гольмий).
5. Анализ влияния изгибных потерь на генерацию суперконтинуума на длинах волн более 2 мкм.

### **Научная новизна**

1. Впервые за счет использования частичного усиления продемонстрирована возможность при помощи варьирования мощности накачки волоконного усилителя, легированного разными РЗЭ, изменять форму оптического спектра суперконтинуума под требуемые задачи, т.к. такие уширенные спектры могут использоваться для метрологии оптических частот, где необходим суперконтинуум с шириной спектра не менее одной октавы, обладающий высокой стабильностью.

2. Впервые создан полностью волоконный иттербиевый источник, излучающий на длине волны 1.12 мкм, который был получен за счет селекции из 1-ой стоксовой компоненты. В качестве селективного элемента использовалась система, состоящая из оптического циркулятора и волоконной брэгговской решетки (ВБР).
3. Продемонстрирована возможность использования уширенного излучения для генерации второй гармоники, а именно желто-зеленого излучения на длинах волн 0.5–0.6 мкм.
4. Впервые получены данные о влиянии изгибных потерь активных и пассивных компонентов оптической схемы на выходной спектр суперконтинуума на длине волны 2 мкм.
5. В данной работе при генерации суперконтинуума использовалось специализированное волокно с переменной дисперсией (DDF). Впервые продемонстрировано существенное отличие спектрального и временного преобразований излучения в зависимости от направления распространения в исследованных образцах DDF волокон.

### **Научно-практическая значимость**

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные данные по частичному усилению излучения суперконтинуума могут найти применение в медицине, а именно использование одного генератора суперконтинуума позволяет упростить процесс исследования воздействия различных спектральных диапазонов лазерного излучения на биологические образцы (мягкие ткани, мышцы, респираторный анализ и т.д.). Отдельным вопросом является изучение различных тканей в организме человека, т.к. в спектральной области 2.2–2.3 мкм есть линии поглощения липидов. Полученная асимметрия, возникающая в спектре суперконтинуума, позволяет получить энергию до десятков нДж и более в требуемой части оптического спектра. Примером такой схемы служит разработка мобильного эндоскопа, который используется на месте оказания медицинской

помощи. Также возможна спектральная фильтрация излучения из суперконтинуума и его усиленной части, с достаточно узкой спектральной линией за счет использования ВБР. Дополнительно генераторы суперконтинуума могут использоваться как источники в низкокогерентной интерферометрии, например, для определения положения дефектов в оптических волокнах.

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

1. Использование в качестве задающего генератора волоконного иттербиевого лазера, работающего в режиме пассивной синхронизации мод и генерации 1-ой стоксовой компоненты, позволяет получить стабильный полностью волоконный генератор суперконтинуума.
2. Генерация суперконтинуума в волокнах с переменной дисперсией и диаметром сердцевины зависит от направления распространения излучения. При распространении излучения от меньшего к большему диаметру длинноволновая граница находится в диапазоне 2.3–2.4 мкм, в обратном случае в диапазоне 2.1–2.2 мкм.
3. Использование волоконных усилителей на основе редкоземельных элементов позволяет локально повысить плотность мощности суперконтинуума с 0.23 до 6.5 мВт/нм.
4. За счет спектральной селекции из стоксовой компоненты задающего иттербиевого лазера реализуется новый стабильный источник, излучающий на длине волны 1.12 мкм с разницей между паразитным излучением и пиком селектированного излучения –28 дБ. Средняя выходная мощность такого источника составляет  $\approx 15$  мВт.
5. Изгибные потери в активных и в пассивных оптических волокнах значительно влияют на длинноволновую границу суперконтинуума. При радиусе изгиба волокна менее 10 см доля мощности в спектре суперконтинуума на длинах волн более 2 мкм сокращается в 3 раза.

**Апробация работы** проводилась на 13-ти различных всероссийских и международных конференциях: 17-ая Международная научная конференция-школа "Нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение" (2018, г. Саранск.), International Conference on Laser Optics (2018 и 2020, г. Санкт-Петербург), Российский семинар по волоконным лазерам, (2019, г. Новосибирск.), Всероссийская конференция по волоконной оптике (2019, г. Пермь.), Международная молодежная научная школа-конференция "Современные проблемы физики и технологий", (2019, г. Москва.), XII Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (2019, г. Саров.) Школа-конференция молодых учёных ИОФ РАН "Прохоровские недели" (2019, г. Москва.), IX международная конференция "Фотоника и информационная оптика" (2020, г. Москва), 9TH EPS-QEOD Europhoton virtual conference, (2020.), Всероссийская конференция по волоконной оптике (2021, г. Пермь).

**Публикации.** По теме диссертации было опубликовано 5 статей в научных журналах, из них 3 статьи входят в международную базу цитирования WoS и 2 публикации входят в Перечень ВАК. Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата. Основные результаты исследования вошли составной частью в работу, поддержанную грантом №19-32-90205 (Аспиранты) Российского фонда фундаментальных исследований.

**Достоверность** результатов работы обеспечивается тем, что теоретическую часть диссертационной работы составили известные в литературе подходы и методики, в том числе использование математической модели распространения излучения в среде, основанной на нелинейном уравнении Шредингера. Достоверность подтверждается надежной статистикой экспериментов, использованием современного оборудования и применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных, публикациями материалов работ в ведущих физических научных журналах и докладами на российских и международных конференциях.

**Личный вклад автора** заключается в участии в разработке экспериментальных методов исследования и их осуществлении, в проведении численных расчетов, написании научных статей и их подготовки к публикациям.

**Структура и объем диссертации** состоит из введения, 3 глав, заключения и цитируемого списка литературы. Работа содержит 117 страницы, 53 рисунка, 10 таблиц и список литературы, включающий 117 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

**Глава 1** содержит литературный обзор по теме диссертации. В данной главе представлены результаты анализа публикаций, касающихся генерации суперконтинуума при использовании различных задающих источников и нелинейных сред. Проведен анализ основных нелинейных эффектов, влияющих на распространение излучения в нелинейной среде, а также на его спектральную форму.

**Глава 2** посвящена описанию генерации суперконтинуума при использовании задающего источника, излучающего на длине волны 1 мкм. Схема экспериментальной установки полностью волоконного генератора суперконтинуума при использовании в качестве нелинейной среды волокна с переменной по длине дисперсией (DDF) представлена на рис. 1. В качестве задающего лазера был собран полностью волоконный иттербиевый лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод. Общая длина резонатора составляла  $\approx 200$  м. Также в резонатор лазера были внедрены контроллеры поляризации для обеспечения пассивной синхронизации мод, которая была основана на эффекте вращения плоскости поляризации. За счет изменения режимов работы лазера удалось получить следующие выходные параметры: среднюю

выходную мощность до 8 мВт, частоту следования импульсов 1 МГц с длительностью 0.26 нс. Для обеспечения достаточной плотности мощности для генерации суперконтинуума использовался иттербиевый волоконный усилитель, за счет применения которого удалось повысить среднюю выходную мощность до 800 мВт. Для сравнения преобразования спектра в образце DDF использовались стандартные одномодовые кварцевые волокна (SMF) с диаметрами сердцевины 6 и 9 мкм (SMF6 и SMF9). Для всех использованных образцов волокон были исследованы такие параметры, как нелинейный показатель преломления, дисперсия, нелинейный коэффициент усиления.

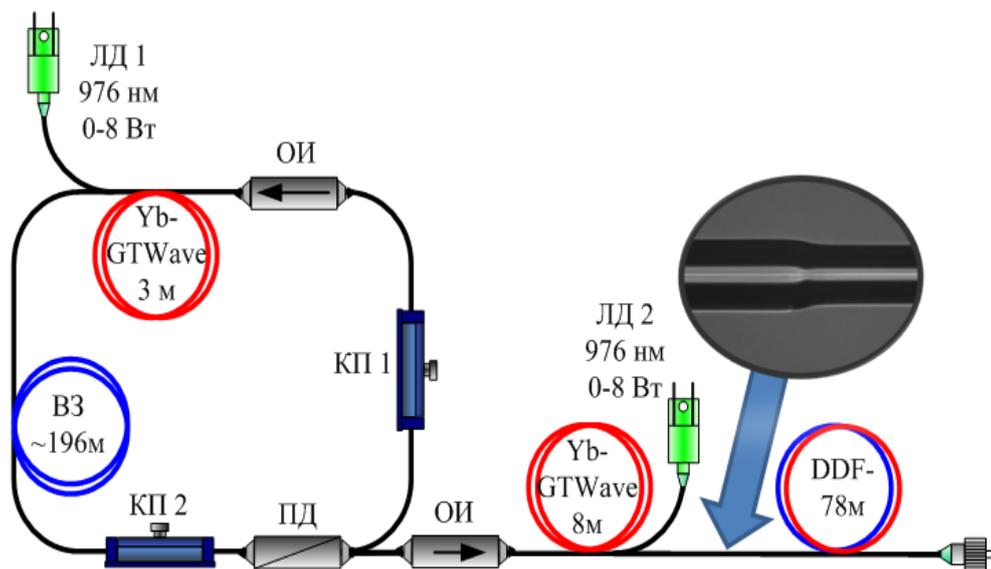


Рисунок 1. Схема генератора СК: ОИ – оптический изолятор, ЛД – лазерный диод, ВЗ – волокно задержки, КП – контроллер поляризации, ПД – поляризационный делитель

В дальнейшем были получены выходные параметры генерации суперконтинуума при использовании перечисленных образцов волокон. При использовании SMF6 и SMF9 спектральная ширина полученного излучения не превышала 1 мкм, а средняя выходная мощность была  $\approx 300$  мВт (рис. 2 (б, в)). Измеренная длительность огибающей импульсов составляла 0.4 нс. При использовании образца DDF была получена максимальная ширина оптического спектра, которая составила 1.49 мкм по уровню сигнала  $-30$  дБ.

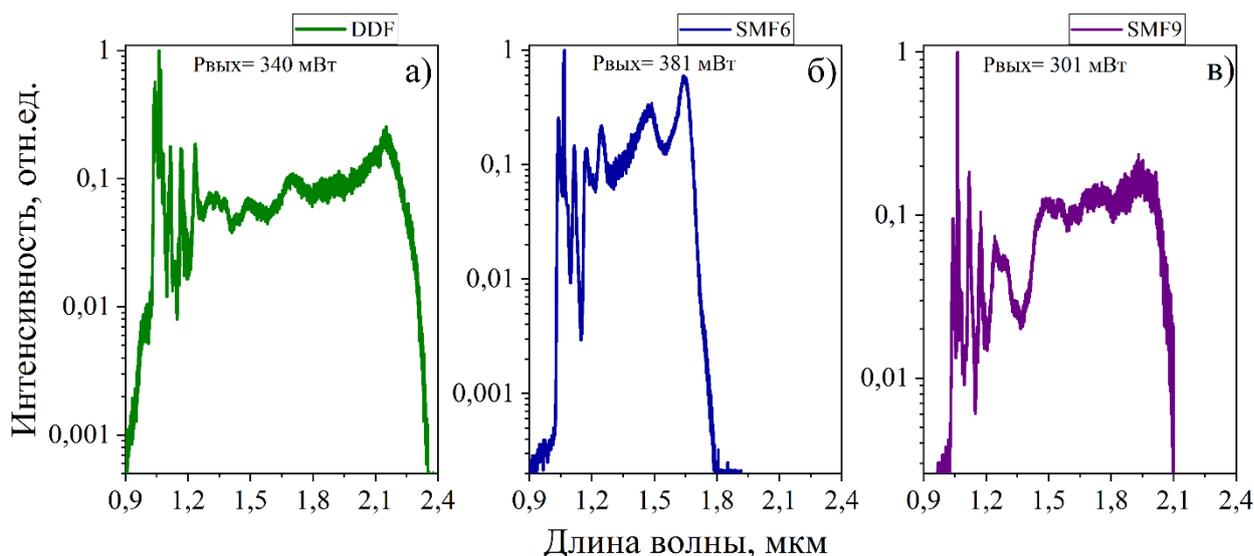


Рисунок 2. Оптические спектры СК при использовании различных нелинейных сред при входной энергии 0.8 мкДж

Дополнительно, после выбора наиболее эффективного по использованию для генерации суперконтинуума образца были проведены эксперименты по влиянию направления распространения в DDF на спектр сверхширокого излучения. А именно, был сварен образец не только от меньшего диаметра к большему (120–150 мкм), но и его развернули (150–120 мкм), чтобы исследовать преобразование излучения в зависимости от распространения по образцу (рис. 3). Максимальная длительность импульсов на выходе составила около 1 нс при распространении вдоль нарастания диаметра сечения волокна и максимальном значении вводимой мощности, а для противоположного направления длительность не превышала 0.73 нс. Экспериментальные результаты подтверждены математическим моделированием распространения излучения в исследованных образцах SMF6, SMF9 и DDF.

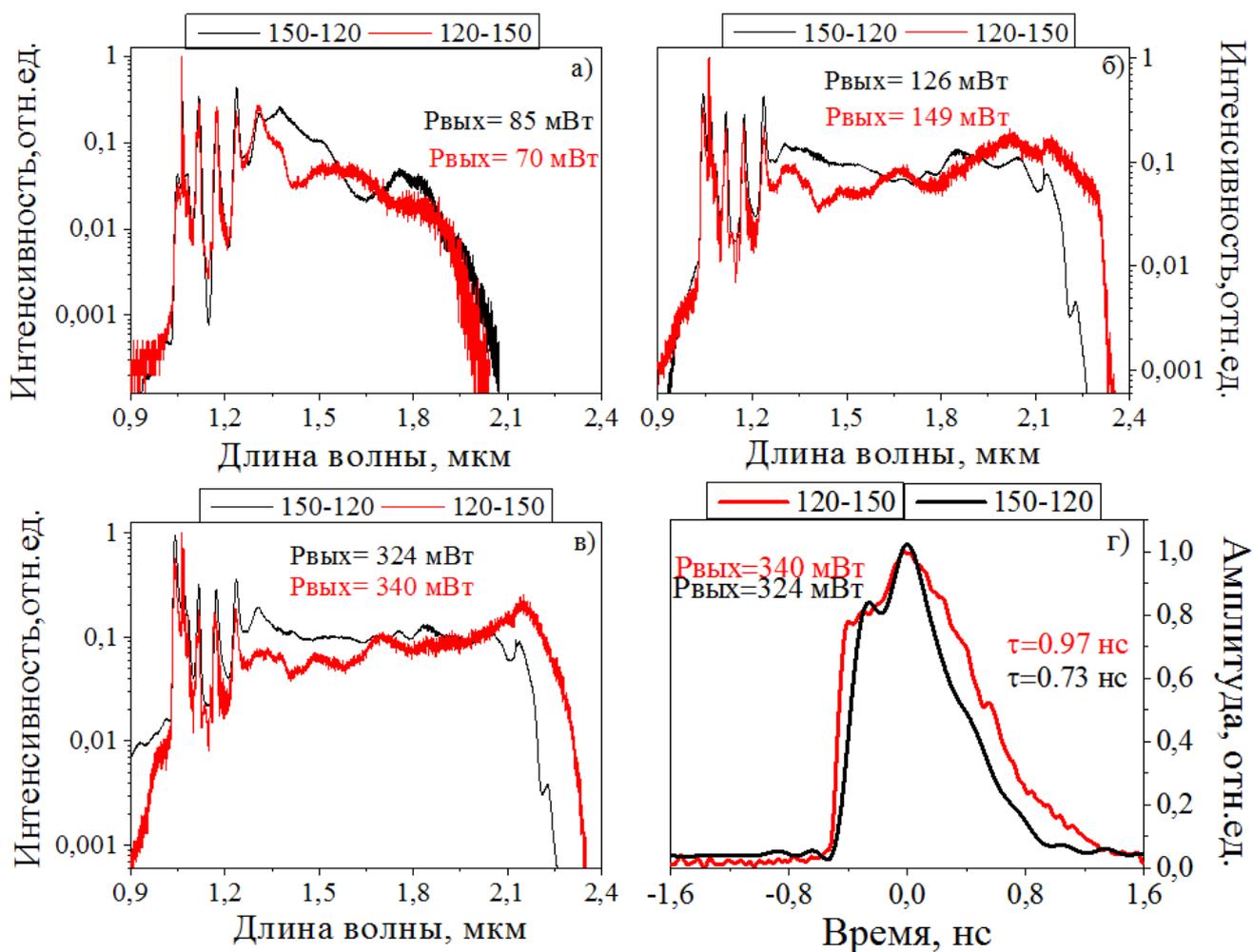


Рисунок 3. Сравнение полученных спектров СК при одинаковых мощностях накачки усилителя для образца DDF

Также в данной главе представлены результаты по усилению излучения суперконтинуума при использовании волоконных усилителей, легированных ионами эрбия (ЭВУ), тулия (ТВУ) или гольмия (ГВУ). Полученные оптические спектры представлены на рис. 5. При использовании ЭВУ средняя выходная мощность составила 445 мВт со спектральной шириной 1.25 мкм по уровню сигнала – 30 дБ. При использовании ТВУ средняя выходная мощность составила 390 мВт со спектральной шириной излучения 0.42 мкм. Последним использовался ГВУ и была зафиксирована средняя выходная мощность 724 мВт со спектральной шириной 0.11 мкм.

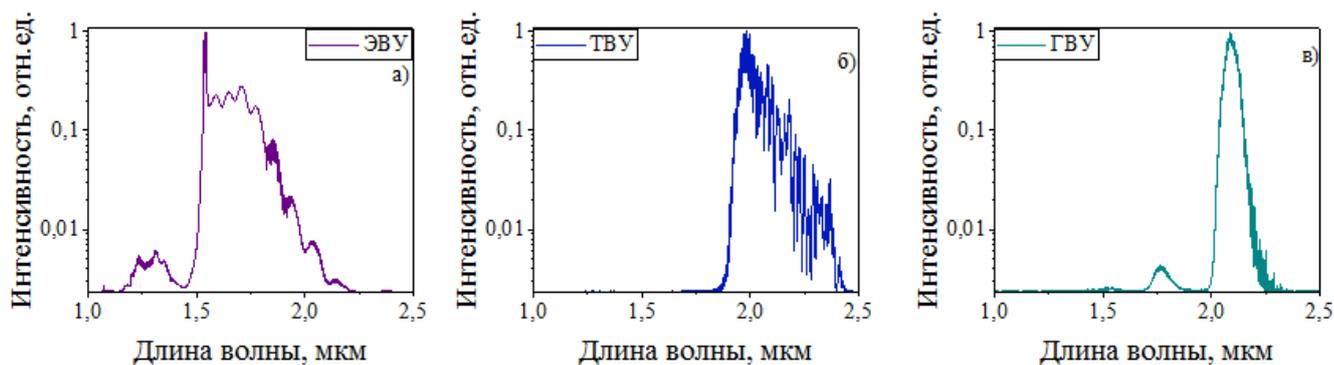


Рисунок 5. Оптические спектры усиленного излучения СК при использовании ЭВУ (а), ТВУ (б) и ГВУ (а)

В дальнейшем проводились эксперименты по спектральной селекции из усиленной стоксовой компоненты задающего иттербиевого волоконного лазера для получения импульсного источника, излучающего на длине волны 1.12 мкм. Для проведения исследования использовался иттербиевый волоконный усилитель, который обеспечил выходную среднюю мощность до 290 мВт. После селекции максимальная средняя выходная мощность излучения составила 14.8 мВт, а длительность импульсов не превышала 0.18 нс.

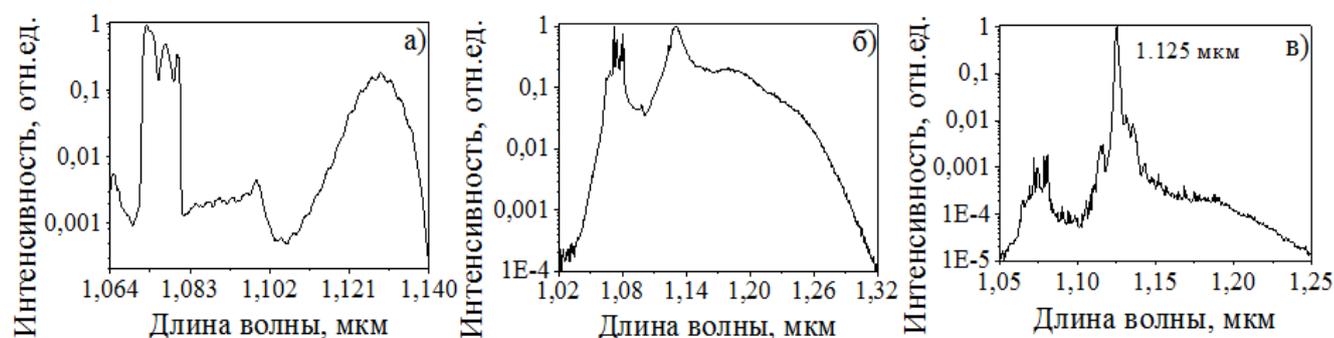


Рисунок 6. Оптические спектры иттербиевого волоконного лазера (а), усиленного излучения (б) и селектированного излучения на длине волны 1.12 мкм (в)

Кроме того, было исследовано нелинейное преобразование усиленного излучения во вторую гармонику за счет использования нелинейных кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  и KDP. В рамках этой части исследования проведена модернизация иттербиевого лазерного источника и реализован режим гибридной синхронизации мод. Для работы данного режима в резонатор были добавлены одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ). Было проведено сравнение между двумя

лазерными источниками, однако был выявлен существенный недостаток при реализации гибридной синхронизации мод. Внедрённые в резонатор ОУНТ начинали повреждаться из-за того, что внутри резонатора была высокая импульсная энергия. Излучение данного источника усиливалось, и средняя выходная мощность достигала  $\approx 600$  мВт. После усиления и введения излучения в нелинейные кристаллы были получены выходные оптические спектры (рис. 7). Максимальная мощность излучения второй гармоники была получена для кристалла  $\text{LiNbO}_3$  и составила 1 мВт. При изменении температуры нагрева кристаллов, а также угла поворота оптической оси кристаллов длина волны излучения варьировалась в пределах 0.53–0.6 мкм для KDP и 0.53–0.54 мкм для  $\text{LiNbO}_3$ .

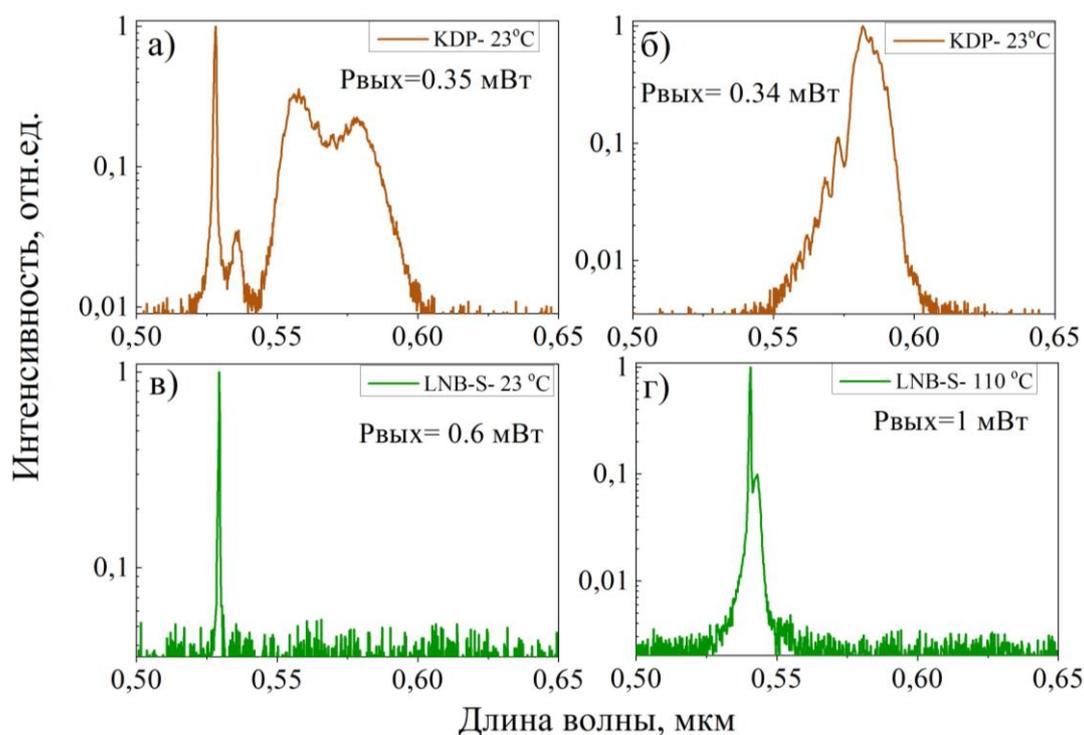


Рисунок 7. Оптические спектры излучения второй гармоники для нелинейных кристаллов при комнатной температуре  $23^\circ\text{C}$ , где (а, в) спектры для KDP (под нормальным падением) и LNB-S; (б) KDP при падении излучения близко к нормальному; (г) LNB-S при максимальной температуре нагрева  $110^\circ\text{C}$ .

**Глава 3** содержит экспериментальные результаты работы по генерации суперконтинуума при использовании лазерного источника, излучающего на длине

волны 2 мкм и работающего в режиме гибридной синхронизации мод. Частота следования импульсов составляла 14.9 МГц, которая соответствовала длине резонатора 14 м. Длительность импульсов не превышала 1.4 пс (измерено на автокорреляторе), а средняя выходная мощность равнялась 4.7 мВт. Как и в случае с предыдущим генератором суперконтинуума, использовался гольмиевый волоконный усилитель, который позволил поднять среднюю выходную мощность до 325 мВт. В качестве нелинейной среды использовалось волокно, легированное оксидом германия ( $\text{GeO}_2$ ). В ходе работы была проведена оптимизация его длины для обеспечения наиболее эффективной генерации суперконтинуума. Она составила 0.9 м. Средняя выходная мощность была около 108 мВт, а максимально достигнутая спектральная ширина 0.63 мкм. Было проведено математическое моделирование по генерации СК при использовании  $\text{GeO}_2$  волокна и стандартного кварцевого волокна SMF 28 (рис. 8).

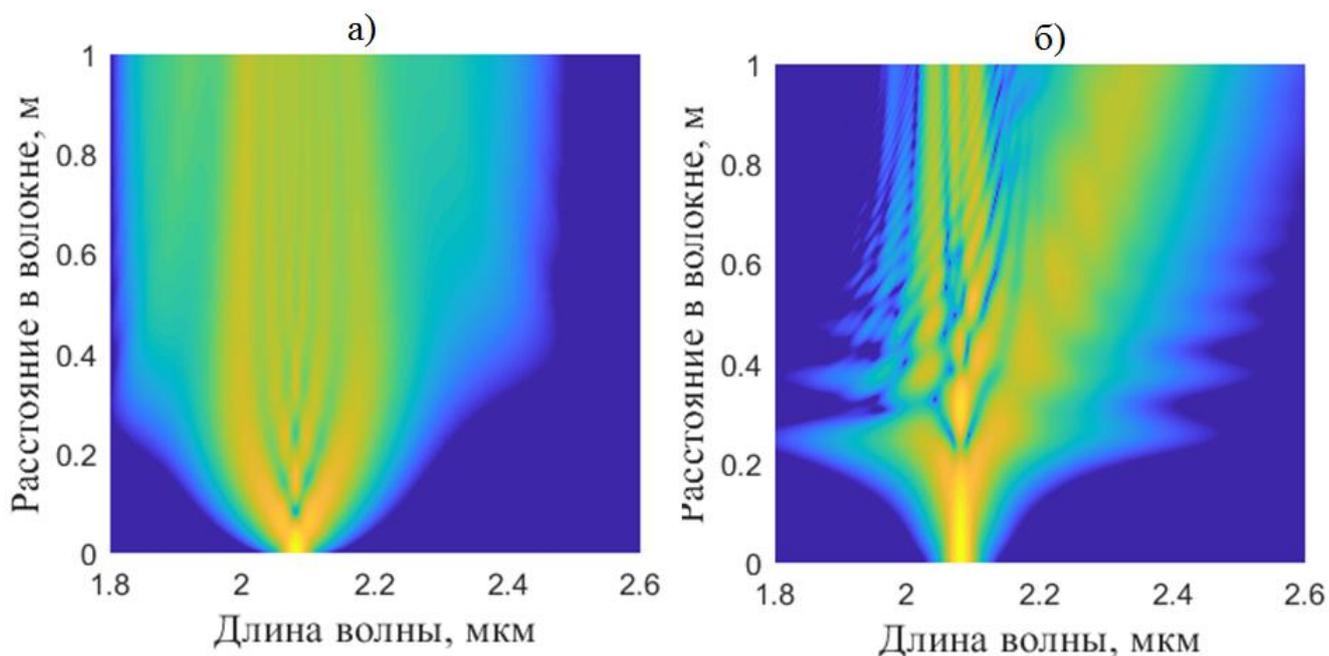


Рисунок 8. Результаты численного моделирования, показывающие спектральную эволюцию для образца  $\text{GeO}_2$  (а) и SMF28 (б)

Также в данной главе исследовался вопрос о влиянии изгибных потерь в области спектра более 2 мкм, возникающих при укладке оптических волокон. Была использована экспериментальная установка по измерению изгибных потерь в

волокнах, в которой использовалась система синхронного детектирования. В эксперименте исследовались образцы волокон, легированных ионами Ho и Ge. Исследуемые образцы наматывались на катушки разных диаметров (100, 30 и 10 мм). Были получены оптические спектры пропускания при различных радиусах изгиба. Для гольмиевого волокна (10 см) было зафиксировано, что длина волны отсечки находится на длине волны 1.26 мкм, для германатного волокна (90 см) длина волны отсечки 1.17 мкм. В ходе эксперимента активное волокно усилителя наматывалось на катушки разных диаметров.

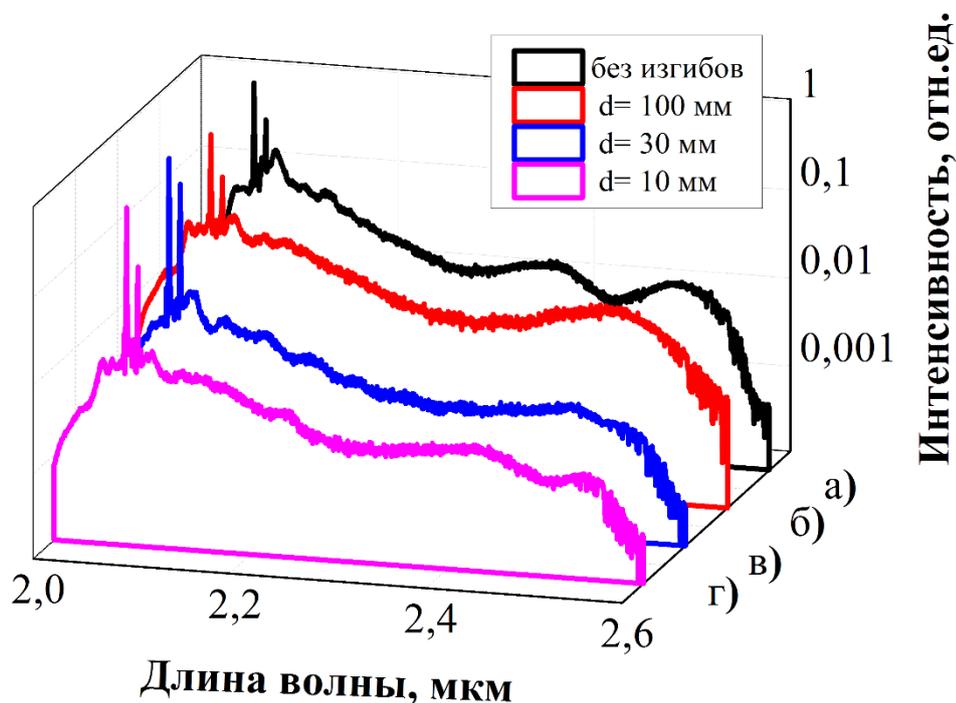


Рисунок 9. Оптические спектры СК при изгибах GeO<sub>2</sub> волокна

После этого были проведены эксперименты по изгибам GeO<sub>2</sub> волокна. Оно изгибалось с такими же диаметрами, как и в предыдущих экспериментах. Средняя выходная мощность составляла на максимальном токе накачки  $\approx 108$  мВт (без изгибов) и падала до 76 мВт (при минимальном изгибе 10 мм), доля мощности в спектральной области 2.2–2.6 мкм была не более 27 %. На рис. 9 представлены оптические спектры суперконтинуума. Видно, что при уменьшении диаметра изгиба GeO<sub>2</sub> волокна изменение спектра идет в области от 2.4 мкм и до 2.6 мкм и становится более плоским.

В **заключении** подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные результаты:

1) Продемонстрирована полностью волоконная оптическая схема генератора суперконтинуума, основанная на использовании стандартных и специализированных кварцевых волокнах. В качестве задающего источника использовался волоконный иттербиевый лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод, что позволило получить стабильный источник суперконтинуума при контроле его выходных параметров. Получены значения средней выходной мощности до 8 мВт при частоте следования 1 МГц и длительности импульсов 0.26 нс. Использование иттербиевого волоконного усилителя позволяет повысить среднюю выходную мощность до 800 мВт и реализовать спектральное преобразование излучения.

2) Использование в схеме генератора суперконтинуума накачки на длине волны 1 мкм волокна с переменной дисперсией позволило получить уширенное излучение со средней выходной мощностью до 340 мВт и спектральной шириной излучения 1.49 мкм по уровню  $-30$  дБ. При распространении излучения от меньшего к большему диаметру длинноволновая граница находится в диапазоне 2.3–2.4 мкм, в обратном случае – в диапазоне 2.1–2.2 мкм.

3) Продемонстрировано частичное усиление оптического суперконтинуума за счет использования волоконных усилителей, легированных ионами эрбия, тулия или гольмия. Установлено, что использование волоконных усилителей позволяет локально повысить плотность мощности суперконтинуума с 0.23 до 6.5 мВт/нм. Максимальная спектральная ширина 1.25 мкм по уровню сигнала  $-30$  дБ может быть получена при использовании эрбиевого волоконного усилителя. При использовании гольмиевого усилителя была достигнута максимальная средняя выходная мощность 724 мВт.

4) Продемонстрировано, что за счет спектральной селекции из стоксовой компоненты задающего иттербиевого лазера получается стабильный источник,

излучающий на длине волны 1.12 мкм. Продемонстрирован контраст между паразитным излучением и пиком селектированного излучения –28 дБ. Средняя выходная мощность такого источника составляет до 15 мВт.

5) Получены спектры пропускания и спектральные зависимости изгибных потерь волокон, легированных ионами гольмия и оксидом германия. Установлено, что при радиусе изгиба волокна менее 10 см доля мощности в спектре суперконтинуума в области 2 мкм сокращается в 3 раза.

### Список опубликованных работ

1. **Жлуктова, И.В.**, Камынин В.А., Филатова С.А., Трикшев А.И., Цветков В.Б. Преобразование субнаносекундных импульсов в иттербиевом волоконном усилителе // Фотон-Экспресс. 2019.Т.6. №158. 234-235.

2. Filatova, S.A., Kamynin V.A., **Zhlukтова I.V.**, Trikshev A.I., Arutyunyan N.R., Rybin M.G., Obraztsova E.D., Batov D.T., Voropaev V.S., Tsvetkov V.B. Spectral and temporal dynamics of ultrashort pulses in a holmium-doped fibre amplifier// Quantum Electronics. -2019.-Vol.49.-№12.- 1108 –1111.

3. **Zhlukтова, I.V.**, Filatova S. A., Trikshev A. I., Kamynin V. A., Tsvetkov V. B. All-fiber 1125 nm spectrally selected subnanosecond source// Applied Optics. -2020-Vol.59.- №29.-9081-9086.

4. **Zhlukтова, I.V.** Kamynin V.A., Arutyunyan Nataliya R., Obraztsova Elena D., Guryev Denis A., Trikshev Anton I., Tsvetkov Vladimir B. Hybrid source of subnanosecond pulses in the spectral range 532-600 nm // Applied Physics Express - 2021.- Vol.14.-№11.-112002(1)-112002(5).

5. **Жлуктова, И.В.**, Камынин В.А., Зверев А.Д., Сысолятин А.А., Цветков В.Б. Частичное усиление суперконтинуума в спектральном диапазоне 1.5-2 мкм // Фотон-Экспресс. -2021.-Т.6.-№174.- 124-125.

### Цитируемая литература

1. Dorsinville, R.; Ho, P.P.; Manassah, J.T.; Alfano, R.R. Applications of

Supercontinuum: Present and Future // In The Supercontinuum Laser Source; Springer New York: New York, NY, 1989.

2. Lambert-Girard, S.; Allard, M.; Piché, M.; Babin, F. Differential Optical Absorption Spectroscopy Lidar for Mid-Infrared Gaseous Measurements // *Appl. Opt.*-2015.-Vol. 54.- №7.- 1647.

3. Bartlome, R.; Sigrist, M.W. Laser-Based Human Breath Analysis: D/H Isotope Ratio Increase Following Heavy Water Intake // *Opt. Lett.*-2009.- Vol. 34.- №7.- 866.

4. Reyes-Reyes, A.; Hou, Z.; van Mastrigt, E.; Horsten, R.C.; de Jongste, J.C.; Pijnenburg, M.W.; Urbach, H.P.; Bhattacharya, N. Multicomponent Gas Analysis Using Broadband Quantum Cascade Laser Spectroscopy // *Opt. Express.*-2014.- Vol.22.-№15.- 18299.

5. Dupont, S.; Petersen, C.; Thøgersen, J.; Agger, C.; Bang, O.; Keiding, S.R. IR Microscopy Utilizing Intense Supercontinuum Light Source // *Opt. Express.*- 2012.- Vol.20.-№5.- 4887.

6. Seddon, A.B. Mid-Infrared (IR) - A Hot Topic: The Potential for Using Mid-IR Light for Non-Invasive Early Detection of Skin Cancer in Vivo. *Phys. status solidi.*-2013.- Vol.250.- №5.- 1020-1027.

7. Hartl, I.; Li, X.D.; Chudoba, C.; Ghanta, R.K.; Ko, T.H.; Fujimoto, J.G.; Ranka, J.K.; Windeler, R.S. Ultrahigh-Resolution Optical Coherence Tomography Using Continuum Generation in an Air–Silica Microstructure Optical Fiber // *Opt. Lett.*-2001.-Vol.26.- №9.- 608.

8. Ohara, T.; Takara, H.; Yamamoto, T.; Masuda, H.; Morioka, T.; Abe, M.; Takahashi, H. Over-1000-Channel Ultradense WDM Transmission with Supercontinuum Multicarrier Source // *J. Light. Technol.*-2006.- Vol.24.- №6.- 2311–2317.

9. Alfano, R.R., Shapiro, S.L. Emission in the Region 4000 to 7000 Å Via Four-Photon Coupling in Glass // *Phys. Rev. Lett.*-1970.- Vol.24.-№11.- 584–587.

10. Stark, S.; Russell, P.S.J. Extreme Supercontinuum Generation to the Deep-UV. In Proceedings of the 2011 International Quantum Electronics Conference (IQEC) and Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim incorporating the Australasian Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy and the Australian

Conference on Optical Fibre Technology; IEEE, August 2011.

11. Dai, S.; Wang, Y.; Peng, X.; Zhang, P.; Wang, X.; Xu, Y. A Review of Mid-Infrared Supercontinuum Generation in Chalcogenide Glass Fibers // *Appl. Sci.*-2018.- Vol.8.- №5.- 707.

12. Birks, T.A.; Wadsworth, W.J.; Russell, P.S.J. Supercontinuum Generation in Tapered Fibers // *Opt. Lett.*- 2000.- Vol.25.- №19.-1415.

13. Kamynin, V.A.; Kurkov, A.S.; Mashinsky, V.M. Supercontinuum Generation up to 2.7 Mm in the Germanate-Glass-Core and Silica-Glass-Cladding Fiber // *Laser Phys. Lett.*-2012.- Vol.9.- №3.- 219–222.

14. Xia, C.; Kumar, M.; Kulkarni, O.P.; Islam, M.N.; Terry, J. F.L.; Freeman, M.J.; Poulain, M.; Mazé, G. Mid-Infrared Supercontinuum Generation to 45 Mm in ZBLAN Fluoride Fibers by Nanosecond Diode Pumping // *Opt. Lett.*-2006.- Vol.31.- №17.- 2553.

15. Желтиков А.М. Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверхкороткими лазерными импульсами // *УФН.*-2006.- Т.176.- №6.- 623-649.