

На правах рукописи
УДК 621.373.826

Воропаев Василий Сергеевич

**ГЕНЕРАЦИЯ КОГЕРЕНТНОГО СУПЕРКОНТИНУУМА В
БЛИЖНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ В ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ
СВЕТОВОДАХ**

2.2.6 Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Карасик Валерий Ефимович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры лазерных и оптико-
электронных систем МГТУ им.
Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Семенов Сергей Львович**
доктор физико-математических наук,
руководитель Научного центра
волоконной оптики им. Е. М. Дианова
РАН, обособленного подразделения
ФГБУН ФИЦ ИОФ РАН, г. Москва
Гладуш Юрий Геннадьевич

кандидат физико-математических наук,
старший преподаватель лаборатории
наноматериалов Сколковского института
науки и технологий, Сколтех, г. Москва
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии
наук», г. Нижний Новгород

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии
наук», г. Нижний Новгород

Защита состоится «26» апреля 2023 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана, расположенном по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана
и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «___» 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



М. С. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Суперконтинуум (СК) – это интенсивные ультракороткие импульсы (УКИ) с широкополосным спектром, возникающие в результате нелинейного взаимодействия прозрачного материала с распространяющимся в нём излучением. Впервые этот термин введён в работе 1980 г. (Gersten J. I., Alfano R. R., Belic M. Combined stimulated Raman scattering and continuum self-phase modulations //Physical review A. 1980. Vol. 21. №. 4. С. 1222.), чтобы подчеркнуть широкий спектр лазерного излучения, формируемого в режиме генерации СК при сохранении важнейших свойств лазерного излучения – высокой направленности и когерентности.

С момента первых публикаций и по сей день генерация СК активно исследуется. Согласно поисковой системе scholar.google.com, за все время до середины 2022 года насчитывается 62 800 публикаций, посвященных СК, при этом последние пять лет выходит более 3 000 публикаций ежегодно. Отчасти большое количество публикаций объясняется широким диапазоном применений СК в различных областях: оптическая когерентная томография, частотная метрология, флуоресцентная визуализация, оптическая связь, оптические часы, прецизионная спектроскопия и многие другие. Одним из важных свойств СК является его временная когерентность. СК с высокой временной когерентностью (далее просто когерентность) лежит в основе работы стабилизированных лазерных гребенок, используемых в частотной метрологии, прецизионной спектроскопии, причём помимо высокой когерентности для возможности стабилизации частоты отстройки необходимо также, чтобы ширина спектра СК превышала октаву. Излучение генератора когерентного СК характеризуется непрерывной последовательностью импульсных пакетов, в которых амплитудно-фазовые характеристики повторяющихся импульсных пакетов совпадают или имеют незначительные расхождения, связанные с шумами излучения накачки. Излучение некогерентного СК характеризуется последовательностью импульсных пакетов со случайными амплитудно-фазовыми характеристиками даже при накачке стабильными регулярными импульсами. В 2005 году Теодор Хэнш и Джон Холл получили нобелевскую премию по физике за "вклад в развитие лазерного высокоточного спектроскопирования и техники прецизионного расчета светового сдвига в оптических стандартах частоты", одним из ключевых элементов их работ является генератор когерентного СК. Среди организаций, исследующих генерацию СК, следует отметить: Национальный институт стандартов и технологий США, Институт физики света Общества Макса Планка, Бургундский университет Франш-Конте, Городской колледж Нью-Йорка, Научный центр волоконной оптики РАН, МГТУ им. Н. Э. Баумана, МГУ им. М. В. Ломоносова, Институт общей физики им. А. М. Прохорова, Университет ИТМО, ИПФ РАН, НГУ и многие другие.

Генерация СК в видимом диапазоне спектра достаточно хорошо исследована, в то же время формирование СК в ИК-диапазоне представляет интерес из-за большого количества потенциальных применений и активно исследуется многими научными группами. В этом диапазоне содержатся линии поглощения большого числа молекул (молекулярные «отпечатки пальцев»), вызванные переходами между колебательными (отчасти вращательными) энергетическими уровнями основного электронного состояния молекул. Данное обстоятельство позволяет использовать СК в ИК-диапазоне для прецизионной спектроскопии молекул, определения низких концентраций различных молекул (биомаркеров заболеваний, токсичных веществ) в воздухе и различных веществах, калибровки астрономических спектрографов, которые используются для поиска экзопланет и характеризации их атмосферы, создания высокоточных оптических часов и др. Использование источников СК в ИК-спектроскопии, оптической когерентной томографии по сравнению с тепловыми источниками позволяет повысить интенсивность сигнала и уменьшить время измерения.

Особый интерес вызывает формирование СК в ближнем ИК-диапазоне, где лежат обертона и комбинационные линии поглощения большого количества веществ, например: глюкозы, метана, коллагена, воды, аммиака, угарного газа, углекислого газа, биомаркеров различных заболеваний – которые используются для их детектирования с помощью метода абсорбционной спектроскопии. По сравнению со средней ИК-областью поглощение в ближней ИК-области на несколько порядков меньше, что ограничивает минимальную детектируемую концентрацию вещества, но, с другой стороны, данное обстоятельство позволяет увеличить глубину проникновения излучения в исследуемый образец, что важно, например, при диагностике доброкачественных и злокачественных биологических новообразований. Кроме того, в ближнем ИК-диапазоне возможно создание оптического стандарта частоты (ОСЧ), стабилизированного по линии поглощения метана вблизи длины волны 2,36 мкм (с относительной нестабильностью на уровне $1,5 \cdot 10^{-15}$ при времени усреднения 1 с), который может применяться для прецизионного измерения времени – важной научно-технической задачи. Для переноса стабильности ОСЧ в радиодиапазон (диапазон прозрачности атмосферы) используются делители оптической частоты, основанные на генераторах когерентного СК. Таким образом, разработка когерентного широкополосного (ширина спектра более одной октавы) СК в ближнем ИК-диапазоне является важной научно-технической задачей.

Свойства СК определяются в основном двумя факторами: характеристиками нелинейной оптической среды и характеристиками УКИ накачки. Перспективным типом сред для генерации СК в ближнем и среднем ИК-диапазонах являются халькогенидные стёкла, которые состоят из одного или нескольких халькогенидов элементов III – V групп

периодической таблицы Менделеева и известны как оптические материалы более 70 лет. Первые сообщения об их применениях в волоконной оптике были опубликованы в 1963 г. Эти стекла обладают важными свойствами, например, широким диапазоном прозрачности в ИК-диапазоне (1 – 10 мкм), низкими оптическими потерями, устойчивостью к атмосферной влажности, а также высоким нелинейным показателем преломления, значение которого на два порядка больше по сравнению со значением для кварцевого стекла. Длина волны нулевой дисперсии халькогенидных материалов лежит в среднем ИК-диапазоне, например, для трисульфида мышьяка (As_2S_3), длина волны нулевой дисперсии равна 4,9 мкм, поэтому СК формируется наиболее эффективно в среднем ИК-диапазоне. В случае использования халькогенидных световодов для генерации СК в ближнем ИК-диапазоне необходимо разработать методы смещения длины волны нулевой дисперсии фундаментальной моды.

Одним из перспективных источников накачки для генерации когерентного СК в ближнем ИК-диапазоне является тулиевый волоконный лазер УКИ на длине волны 1,9 мкм, благодаря компактности, простоте конструкции, а также длине волны, находящейся в середине ближней ИК-области (1 – 3 мкм). Однако, до настоящего времени отечественных волоконных тулиевых лазеров УКИ с требуемыми характеристиками излучения пока не создано, а зарубежные образцы весьма дорогие и труднодоступные.

В этой связи обоснование возможности создания генераторов СК в ближнем ИК-диапазоне путём преобразования УКИ тулиевой волоконной лазерной системы в халькогенидных световодах со смещённой дисперсией является актуальной научно-технической задачей, решение которой имеет важное научное значение и практическую значимость.

Таким образом, **целью данной работы** является исследование генерации когерентного широкополосного СК в ближнем ИК-диапазоне в халькогенидных световодах со смещённой дисперсией при накачке УКИ волоконной тулиевой лазерной системы.

Для достижения поставленной цели в ходе работы необходимо решить следующие **научно-технические задачи**:

1) исследовать физические механизмы генерации СК и сформулировать требования к источнику накачки и к халькогенидному световоду для генерации широкополосного когерентного СК в ближнем ИК-диапазоне;

2) разработать математическую модель генерации СК в халькогенидных световодах со смещённой дисперсией для оптимизации параметров световода и УКИ накачки;

3) разработать полностью волоконную лазерную систему УКИ накачки на основе световодов, легированных ионами туния;

4) разработать халькогенидный световод со смещённой дисперсией и методику определения его оптических характеристик;

5) разработать экспериментальный стенд для исследования генерации СК в халькогенидных световодах со смешённой дисперсией;

6) провести исследование генерации СК в ближнем ИК-диапазоне в халькогенидных световодах со смешённой дисперсией при накачке УКИ волоконной тулиевой лазерной системы.

Решение указанных задач позволит создать волоконный источник когерентного СК ближней ИК-области спектра.

Объектом исследования является генератор СК ближнего ИК-диапазона.

Предметом исследования является процесс генерации СК в халькогенидных световодах со смешённой дисперсией.

Методы исследований. При решении теоретических и прикладных задач использованы методы математического моделирования нелинейной оптики УКИ, экспериментальные методы измерения излучения в виде УКИ.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

- впервые теоретически обоснована и экспериментально продемонстрирована генерация СК ближнего ИК-диапазона (от 1,1 до 2,5 мкм) с шириной спектра, превышающей одну октаву, в световодах с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой при накачке УКИ волоконного тулиевого лазера на длине волны 1,9 мкм;

- разработан оригинальный волоконный генератор УКИ с пиковой мощностью 220 кВт и длительностью импульса 71 фс на основе германосиликатного световода, легированного ионами туния, и компрессора, содержащего световод с увеличенным диаметром поля моды;

- впервые в процессе генерации СК в исследуемых световодах при накачке излучением волоконного тулиевого лазера выявлен эффект генерации третьей гармоники и исследовано влияние этого эффекта на динамику изменения ширины СК.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанный генератор СК с использованием световодов с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой обеспечивает формирование СК ближнего ИК-диапазона (от 1,1 до 2,5 мкм) с шириной спектрального диапазона, превышающей одну октаву;

- созданные математические модели волоконного тулиевого лазера с гибридной синхронизацией мод, волоконного тулиевого усилителя УКИ, процесса генерации СК в световоде позволяют провести проектирование генератора СК и оптимизацию выходных параметров излучения;

- разработанная полностью волоконная система накачки, состоящая из задающего генератора и усилителя, обеспечивает требуемые временные и энергетические характеристики излучения для формирования когерентного широкополосного СК в халькогенидных световодах со смешённой нулевой дисперсией.

Практическая ценность работы. Разработанные и исследованные методы и процессы генерации когерентного СК могут быть использованы:

– для создания стабилизированной лазерной гребёнки в ИК-диапазоне для различных задач, например: прецизионной спектроскопии, деления частоты ОСЧ;

– для создания медицинских приборов анализа дыхания, основанных на методе абсорбционной спектроскопии.

Достоверность работы основана на сопоставлении данных, полученных в результате моделирования, эксперимента, на использовании надежных методов измерений.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты диссертационной работы внедрены и применены в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Материалы диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Реализация результатов работы подтверждается соответствующим актом внедрения. Научные исследования в рамках диссертационной работы поддержаны грантами РФФИ № 18-38-00927 «Исследование генерации суперконтинуума в высоконелинейном световоде с накачкой тулиевым волоконным фемтосекундным лазером для анализа состава выдыхаемого человеком воздуха», РНФ № 16-19-10694 «Фемтосекундные делители и синтезаторы частоты на холодных молекулах метана».

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на конференциях:

- Frontiers in Optics 2017, г. Вашингтон, США, 18 – 21 сентября 2017 года;
- ICLO 2018, г. Санкт – Петербург, Россия, 4 – 8 июня 2018 года;
- ASSL 2018, г. Бостон, США, 4 – 8 ноября 2018 года;
- Saratov fall meeting 2018, г. Саратов, Россия, 24 – 29 сентября 2018 года;
- PIERS2019, г. Рим, Италия, 17 – 20 июня 2019 года;
- CLEO /Europe-EQEC 2019, г. Мюнхен, Германия, 23 – 27 июня 2019 года;
- Frontiers in Optics 2019, г. Вашингтон, США, 15 – 19 сентября 2019 года;
- ASSL 2019, г. Вена, Австрия, 29 сентября – 3 октября 2019 года;
- Frontiers in Optics 2020, виртуальный формат в сети интернет, 14 – 17 сентября 2020 года;
- CLEO /Europe-EQEC 2021, виртуальный формат в сети интернет, 21 – 25 июня 2021 года;

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 научных работах, из них 1 патент на полезную модель и 11 научных статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ и/или международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора заключается в разработке математических моделей, разработке и экспериментальном исследовании волоконных

лазерных систем для накачки исследуемых световодов, проведении экспериментов по генерации СК и анализе полученных данных.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников из 225 библиографических описаний. Материал изложен на 186 страницах машинописного текста и содержит 73 рисунка, 11 таблиц, 59 формул.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и практическая применимость результатов.

В первой главе исследованы основные физические механизмы генерации СК в волоконных световодах, на основе полученных результатов сформулированы требования к источнику УКИ накачки и нелинейной среде. Показано, что хроматическая дисперсия в волоконных световодах при генерации СК значительно влияет на характер проявления нелинейности материала и определяет свойства СК на выходе световода. Рассмотрен процесс уширения спектра УКИ за счёт фазовой самомодуляции без учёта хроматической дисперсии, а также с учётом хроматической дисперсии, показано, что в световодах с аномальной дисперсией групповых скоростей (ДГС) фундаментальной моды излучения для генерации широкополосного СК требуются пиковые мощности на порядки меньше по сравнению со световодами с нормальной ДГС. Рассмотрен процесс распространения солитонов в световодах с аномальной ДГС показано, что для генерации широкополосного СК необходимо, чтобы импульс на входе в световод соответствовал солитону, порядок которого больше или равен 2. Рассмотрен процесс распада солитонов, который связан с тем, что солитоны высших порядков нестабильны и в присутствии ДГС высших порядков и эффекта Рамана распадаются на ряд импульсов меньшей амплитуды. Показано, что для генерации когерентного СК с шириной более одной октавы необходимо, чтобы длительность импульса накачки на полувысоте была менее 150 фс. При более длинных импульсах для генерации СК с шириной более октавы требуется, чтобы пиковая мощность импульса соответствовала солитону порядок которого больше 16, при этом эффект четырёхволнового смешения (ЧВС) или во временной области модуляционной неустойчивости (МН) приводит к значительному снижению степени когерентности генерируемого СК. Для формирования когерентного СК также важно, чтобы длина нелинейной среды была меньше характерной длины проявления ЧВС/МН.

Проведён обзор генераторов когерентного СК ближнего ИК-диапазона на основе различных нелинейных световодов: германосиликатных, флюоридных, теллуритных, полупроводников, окруженных изолятором,

флюоридных. В результате сравнительного анализа параметров и характеристик данных генераторов СК, показано, что в халькогенидных световодах и полупроводниках, окруженных изолятором, удаётся достичь широкополосного СК при наименьшей введённой пиковой мощности импульсов в световод и наименьшей длине световода, что объясняется высоким нелинейным показателем преломления данных сред и является актуальным для снижения требований по пиковой мощности к источнику накачки. В данной работе из-за более доступной технологии изготовления выбраны световоды с сердцевиной из трисульфида мышьяка (As_2S_3) и кварцевой оболочкой, которая за счёт эффекта волноводной дисперсии смещает длину волны нулевой дисперсии фундаментальной моды световода в ближний ИК-диапазон. Структура данных световодов представлена на Рисунке 1. Для повышения эффективности ввода и вывода излучения на торцах световода используются конусные сердцевины.

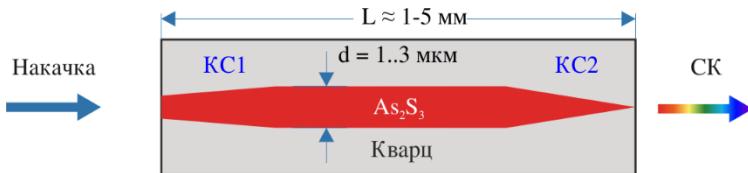


Рисунок 1. Структура световода с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой

Показано также, что при генерации СК в данной структуре с накачкой УКИ на длине волны вблизи 2 мкм, исследования проводились только в световоде с диаметром сердцевины 1 мкм, при этом излучение формировалось преимущественно в диапазоне длин волн более 3 мкм. Однако, волоконных генераторов СК с накачкой тулиевым лазером и данными световодами со спектром, покрывающим диапазон длин волн от 1 до 3 мкм, разработано не было, что подчеркивает актуальность и новизну настоящей диссертационной работы. На основе обзора показано, что пиковая мощность УКИ должна быть более 10 кВт для генерации широкополосного СК.

На основе сформулированных требований к источнику накачки и нелинейной среде разработана структурная схема генератора когерентного СК ближнего ИК-диапазона, которая включает последовательно следующие элементы: волоконный тулиевый лазер с синхронизацией мод, волоконный тулиевый усилитель мощности УКИ, требуемый для увеличения пиковой мощности и снижения длительности импульсов, система ввода излучения в световод, световод с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой, система вывода излучения. На Рисунке 2 показана разработанная структурно-функциональная схема волоконного тулиевого лазера с гибридной синхронизацией мод,

основанной на использовании в качестве насыщающегося поглотителя одностенных углеродных нанотрубок (ОУН), а также метода нелинейной эволюции поляризации (НЭП), который позволяет избавиться от нежелательных квазинепрерывных компонент излучения и требует настройки контроллеров поляризации (КП), также в резонаторе предусмотрена компенсация дисперсии групповой задержки резонатора за счёт использования световода с повышенным содержанием оксида германия в сердцевине (Hi-Ge). На Рисунке 3 показана разработанная структурно-функциональная схема тулиевого волоконного усилителя УКИ, отличающаяся тем, что в ней использован тулиевый германосиликатный световод с нормальной ДГС (Tm^{3+}), в котором увеличивается энергия импульса, его длительность, а также ширина спектра, а также кварцевый световод с увеличенным полем моды (LMA), который играет роль компрессора, т.е. сжимает длительность импульсов до требуемых значений. Оригинальность разработанного усилителя подтверждается патентом на полезную модель.

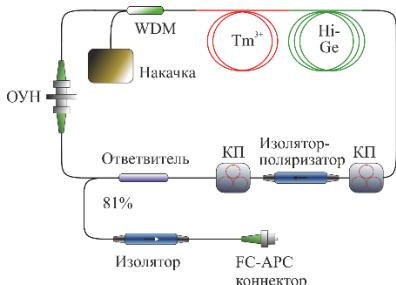


Рисунок 2. Структурно-функциональная схема волоконного тулиевого лазера с гибридной синхронизацией мод

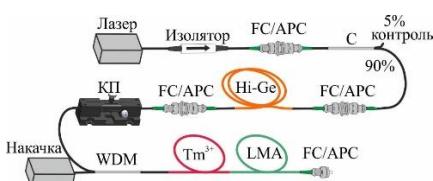


Рисунок 3. Структурно-функциональная схема тулиевого волоконного усилителя УКИ

Таким образом, в первой главе в результате анализа был научно обоснован выбор нелинейной среды, системы накачки, и предложена структурно-функциональная схема генератора СК.

Во второй главе разработана математическая модель генератора когерентного широкополосного СК ближнего ИК-диапазона по разработанной в первой главе структурно-функциональной схеме с целью обоснования достижения требуемых характеристик СК, а именно: спектрального диапазона от 1 до 3 мкм, а также высокой временной когерентности. Данная математическая модель состоит из математических моделей волоконного тулиевого лазера с синхронизацией мод, волоконного тулиевого усилителя УКИ, процесса генерации СК в халькогенидном световоде со смещённой дисперсией. В основе всех моделей лежит обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера (ОНУШ), описывающее

процесс распространения УКИ в волоконных световодах. В математической модели лазера ОНУШ записывается во временной области для одной поляризации излучения и учитывает ДГС световодов (до пятого коэффициента разложения в ряд Тейлора), поглощение, спектральную функцию усиления сигнала, с учётом эффекта насыщения усиления активной среды, а также нелинейные коэффициенты световодов. Решение ОНУШ в модели лазера производится Фурье-методом расщепления по физическим процессам. Помимо распространения излучения через световоды, учитывается спектральная фильтрация излучения резонатором, потери на соединениях световодов и в волоконно-оптических компонентах, а также математические модели насыщающегося поглотителя (ОУН) и метода НЭП. Суть модели заключается в задании шумового излучения, которое циркулирует в резонаторе лазера и формирует режим генерации лазера. Так в разработанном лазере путём численного моделирования в среде Matlab был найден устойчивый режим генерации импульсов. В результате анализа рассчитанной динамики импульса внутри резонатора установлено, что лазер работает в режиме генерации растянутых импульсов, центральная длина волны равна 1900 нм, длительность импульса на выходе лазера составляет 349,61 фс, ширина спектра на полуысоте – 22,67 нм, частота повторения импульсов – 24,1 МГц, пиковая мощность импульсов равна 556 Вт, средняя мощность – 4,63 мВт.

Разработанная математическая модель усилителя основана на ОНУШ, записанном в спектральной области, учитывающим спектральные зависимости ДГС световодов, нелинейных коэффициентов, потерь, спектр усиления активного световода, с учётом эффекта насыщения усиления, эффект Рамана. Решение проводится методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности в среде Matlab. В результате расчёта установлено, что импульс на выходе усилителя представляет из себя один основной импульс с высокой пиковой мощностью и минимальной длительностью и несколько боковых импульсов меньшей амплитуды и большей длительности. Установлено, что использование Hi-Ge-световода в усилителе (Рисунок 3) для уширения импульса позволяет повысить пиковую мощность на 10 %. С использованием Hi-Ge-световода длительность импульса составила 53,8 фс, а пиковая мощность – 236 кВт, что удовлетворяет требованиям к источнику накачки, предъявленным в первой главе. Также с помощью численного моделирования показано, что поляризация излучения на входе в усилитель сильно влияет на параметры импульса, длительность импульса и пиковая мощность может изменится на порядок, поэтому в конструкции усилителя обосновано использование КП.

Разработанная математическая модель генерации СК в халькогенидном световоде с кварцевой оболочкой использует ОНУШ в таком же виде, как при моделировании усилителя. Однако спектральная зависимость нелинейного коэффициента фундаментальной моды световода, учитывает векторное распределение поля фундаментальной

моды и нелинейный показатель преломления, усредненный по неоднородному поперечному сечению световода, взвешенный с учётом распределения поля. Для определения оптимального диаметра сердцевины халькогенидного световода выполняется параметрическое исследование в котором, длительность импульса накачки на длине волны 1,9 мкм выбрана равной 65 фс, диаметр сердцевины изменяется от 1 до 3 мкм с шагом 0,1 мкм, длина световода равна 3 мм, при этом для каждого световода определена максимальная пиковая мощность, при которой разработанная математическая модель является неработоспособной, что связано со значительной генерацией излучения в области менее 1 мкм, в которой нелинейный показатель преломления трисульфида мышьяка сильно зависит от длины волны и меняет знак. Параметрическое исследование проведено для значений пиковой мощности равной 25 %, 50 %, 75 %, 90 % от максимальной пиковой мощности для каждого световода. Чувствительность генерируемого СК к шуму оценивается путём вычисления большого количества спектров СК (100 штук) при различном квантовом шуме излучения накачки, который является суперпозицией излучения одиночных фотонов со случайной фазой на каждой учитываемой в модели частоте излучения. Количественный анализ когерентности СК определяется путём вычисления зависимости модуля комплексной степени когерентности первого порядка от длины волны:

$$|g_{12}^{(1)}(\lambda, t_1 - t_2)| = \left| \frac{\langle \tilde{A}_1^*(\lambda, t_1) \tilde{A}_2(\lambda, t_2) \rangle}{\sqrt{\langle |\tilde{A}_1(\lambda, t_1)|^2 \rangle \langle |\tilde{A}_2(\lambda, t_2)|^2 \rangle}} \right|,$$

где угловые скобки означают усреднение по ансамблю независимо генерируемых пар спектров $[\tilde{A}_1(\lambda, t) \tilde{A}_2(\lambda, t)]$;

t – время, измеренное в масштабе временного разрешения спектрометра, используемого для разрешения этих спектров. Так как нас интересует только спектральная зависимость когерентности, то $|g_{12}^{(1)}(\lambda, t_1 - t_2)|$ вычисляется при $t_1 - t_2 = 0$.

На Рисунке 4 представлены спектры СК и спектральные функции когерентности для различных диаметров световодов. Показано, что спектры СК на выходе халькогенидного световода покрывают диапазон от 1 до 3 мкм при диаметре сердцевины больше 1,5 мкм, при этом во всех случаях излучение имеет высокую степень спектральной когерентности.

Таким образом, во втором разделе с помощью разработанных математических моделей теоретически подтверждена работоспособность предложенного генератора СК и обосновано экспериментальное исследование, также определены параметры лазерной системы и нелинейной среды для достижения требуемой ширины спектра когерентного СК.

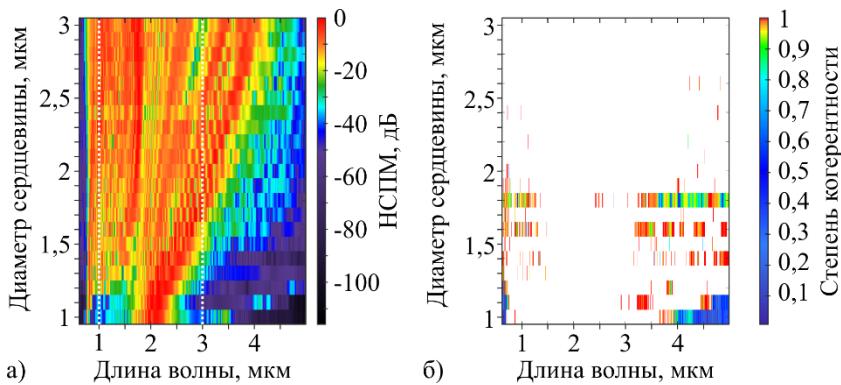
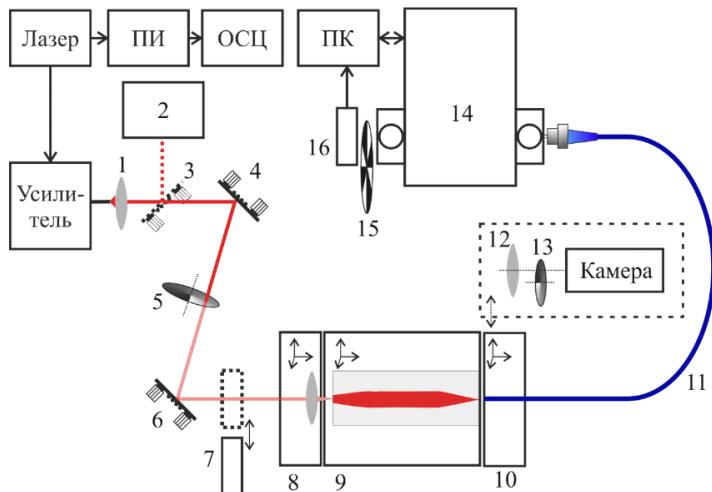


Рисунок 4. Нормированные спектральные плотности мощности (НСПМ) СК (а) и спектральные степени когерентности (б, белым цветом показаны значения в диапазоне от 0,99 до 1) для различных диаметров сердцевин халькогенидных световодов с кварцевой оболочкой при накачке УКИ с длительностью 65 фс и значением энергии 90 % от энергии, при которой решение не может быть найдено

В третьей главе в соответствии с разработанной в первой главе структурно-функциональной схемой был изготовлен макетный образец генератора когерентного СК ближнего ИК-диапазона и проведено экспериментальное исследование оптических характеристик излучения СК и волоконной тулиевой лазерной системы. Для генерации СК выбран световод с сердцевиной из трисульфида мышьяка диаметром 1,7 мкм и кварцевой оболочкой, согласно расчёту спектр СК должен охватывать диапазон длин волн от 1 до 3 мкм. Также эксперименты проводились с использованием световода с диаметром сердцевины 1,2 мкм, в этом случае согласно расчёту генерируется дисперсионная волна, наличие которой интересно подтвердить в эксперименте. Структурно-функциональная схема экспериментальной установки для исследования генерации СК представлена на Рисунке 5.

Измеренные спектральная плотность мощности и автокорреляционная функция излучения волоконного тулиевого лазера с гибридной синхронизацией мод в сравнении с результатами моделирования показаны на Рисунке 6. Частота повторения импульсов лазера равна 23,84 МГц, энергия импульсов – 0,25 нДж, длительность импульсов – 331 фс, ширина спектра – 21,66 нм, погрешности данных параметров, полученных из численного расчёта, составляют 1,2 %, 22,8 %, 5,5 %, 4,7 %, соответственно. Измеренный методом FROG временной профиль мощности линейно-поляризованного импульса на выходе усилителя при средней мощности 600 мВт для полной поляризации представлен на Рисунке 7,а.



1, 12 – коллиматоры; 2 – автокоррелятор; 3 – откидное зеркало;
 4,6 – зеркала с регулировками; 5, 13 – регулируемые аттенюаторы;
 7 – измеритель мощности; 8 – короткофокусная линза на регулируемой
 платформе; 9 – исследуемый образец на регулируемой платформе;
 10 – регулируемая платформа; 11 – многомодовый флюоридный световод;
 14 – монохроматор; 15 – модулятор; 16 – PbSe приёмник излучения;
 ПК – персональный компьютер; ПИ – быстродействующий приёмник
 излучения; ОСЦ – осциллограф;

Рисунок 5. Структурно-функциональная схема экспериментальной
 установки для исследования генерации СК с использованием
 разработанной волоконной лазерной системы

В предположении одинаковой формы импульса в ортогональных поляризациях пиковая мощность на выходе усилителя составляет 220 кВт, длительность импульса составляет 71 фс, погрешности данных параметров, полученных из численного расчёта, составляют 7,2 %, 24,2 %, соответственно. Стоит отметить, что измеренные автокорреляционные функции ортогональных поляризаций импульса действительно схожи (Рисунок 7,6), и длительность импульса на выходе усилителя сильно зависит от настроек контроллера поляризации (КП на Рисунок 3), что подтверждает результаты численного расчёта.

Проведённые исследования генерации СК в световоде с диаметром сердцевины 1,2 мкм подтвердили генерацию дисперсионной волны, предсказанную при численном моделировании, а СК имеет спектральный диапазон от 1,5 до 2,5 мкм, однако при повышении средней мощности накачки до фокусирующей линзы в световод более 30 мВт спектр СК перестаёт уширяться, а в выходном излучении зарегистрирован пик

излучения на длине волны 633 нм, соответствующий третьей гармонике накачки, который увеличивается при повышении мощности накачки.

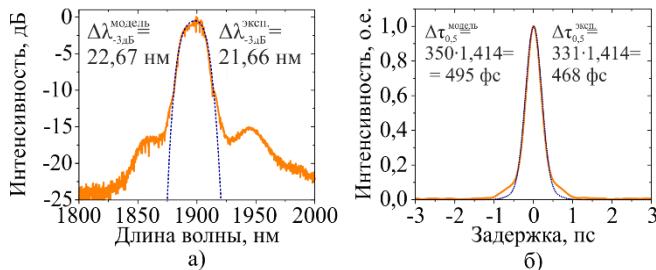


Рисунок 6. Спектральная плотность мощности (а) и автокорреляционная функция (б) излучения лазера, пунктирной кривой показаны результаты расчёта

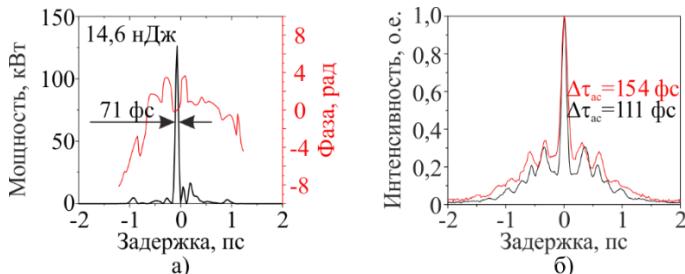


Рисунок 7. Временной профиль мощности линейно-поляризованного импульса на выходе усилителя при средней мощности 600 мВт для полной поляризации (а) и автокорреляционные функции ортогональных поляризаций (б)

Спектральный диапазон СК на выходе световода с диаметром сердцевины 1,7 мкм составляет от 1,1 до 2,5 мкм по уровню шумов приёмника излучения (Рисунок 8), ширина СК превышает одну октаву. При повышении мощности накачки более 60 мВт спектр перестаёт уширяться, на выходе световода наблюдается генерация третьей гармоники накачки, а пик на длине волны около 2,6 мкм в спектрах СК (Рисунок 8) увеличивается с увеличением мощности накачки, данный пик соответствует четвёртому порядку дифракции третьей гармоники накачки. При повышении средней мощности до 600 мВт оба световода разрушаются и перестают проводить излучение, что предположительно связано с сильным поглощением световодом излучения третьей гармоники накачки.

Таким образом, в третьей главе изготовлен и экспериментально исследован макетный образец генератора когерентного СК ближнего ИК-диапазона, подтверждены основные результаты расчёта второй главы, выявлена генерация третьей гармоники накачки, неучтённая в расчёте.

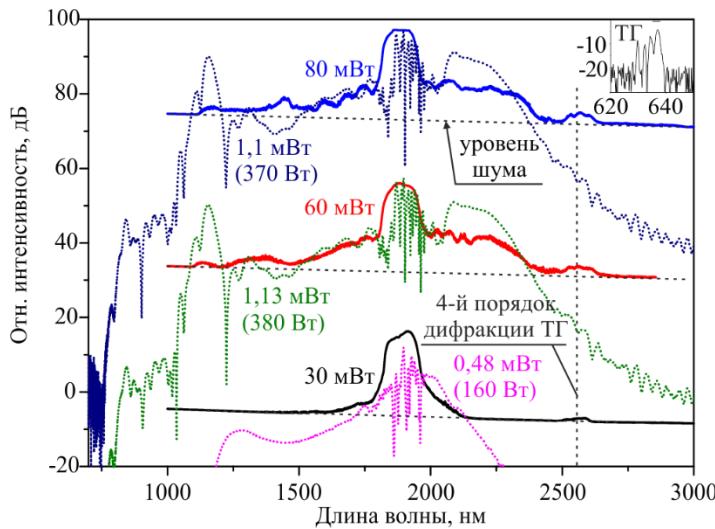


Рисунок 8. Измеренные спектры СК на выходе световода с диаметром сердцевины 1,7 мкм при различных мощностях излучения перед линзой, фокусирующей излучение в световод, вместе с результатами численного моделирования (штриховые кривые) при указанных средних и пиковых мощностях импульса, введённых в световод, на вставке показан спектр третьей гармоники (ТГ) при мощности 80 мВт

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально продемонстрирована возможность генерации когерентного широкополосного СК в диапазоне длин волн от 1,1 до 2,5 мкм при использовании световодов с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой и УКИ накачки тулиевой волоконной лазерной системы.

2. Создана математическая модель процесса генерации СК в световодах с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой при накачке излучением на длине волны 1,9 мкм, на базе которой разработана методика расчёта основных параметров СК, обеспечивающая рациональный выбор диаметра сердцевины световодов.

3. Разработана оригинальная волоконная тулиевая лазерная система УКИ для накачки световода на длине волны 1,9 мкм, состоящая из волоконного тулиевого лазера с гибридной синхронизацией мод и волоконного тулиевого усилителя и формирующая УКИ с минимальной длительностью 71 фс и пиковой мощностью 220 кВт при частоте следования 23,8 МГц и средней выходной мощности 600 мВт.

4. Впервые разработан, изготовлен и экспериментально исследован генератор когерентного СК ближнего ИК-диапазона, который формирует в световоде с сердцевиной из трисульфида мышьяка с диаметром 1,7 мкм и кварцевой оболочкой СК в диапазоне длин волн от 1,1 до 2,5 мкм при средней мощности источника накачки 60 мВт. В целом результаты экспериментального исследования подтвердили правильность основных теоретических положений и расчётных соотношений, однако при повышении мощности УКИ накачки разработанная математическая модель не согласуется с экспериментальными исследованиями, предположительно из-за не учёта в модели эффекта генерации третей гармоники.

5. Впервые в световодах с сердцевинами из трисульфида мышьяка с диаметрами 1,2 мкм и 1,7 мкм и кварцевыми оболочками выявлена генерация третей гармоники УКИ накачки и исследовано её влияние на генерационные характеристики СК.

Результаты данной диссертационной работы могут быть использованы для создания полностью волоконных генераторов когерентного СК в инфракрасной области, используемых в частотной метрологии, молекулярной спектроскопии, оптических часах, а также для создания медицинских приборов анализа дыхания, основанных на методе абсорбционной спектроскопии.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на:

1. Разработку математической модели процесса генерации СК в световодах с сердцевиной из трисульфида мышьяка и кварцевой оболочкой, учитывающей эффект генерации третей гармоники, а также теоретическую зависимость нелинейного показателя преломления трисульфида мышьяка.

2. Исследование генерации СК в световодах с диаметрами сердцевин больше 1,7 мкм при накачке УКИ на длине волны 1,9 мкм.

3. Разработку волоконной тулиевой лазерной системы УКИ, основанной на световодах с сохранением поляризации, что позволит повысить временную стабильность генерационных характеристик УКИ и СК.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Волоконный тулиевый усилитель мощности ультракоротких импульсов на длине волны 1,9 мкм : пат. 206388 Рос. Федерация. № 2020143738 / Воропаев В. С. [и др.] ; заявл. 29.12.2020 ; опубл. 08.09.2021, Бюл. № 25. 8 с. (0,92 п. л. / 0,74 п. л.)

2. Octave-Spanning Supercontinuum Generated in As_2S_3 -Silica Waveguides Pumped by Tm-doped All-fibre MOPA / V. Voropaev [et al.] // 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2021, Munich, 21–25 июня 2021 года. Munich, 2021. (0,12 п. л. / 0,09 п. л.)

3. Усиление ультракоротких импульсов на длине волны 1,9 мкм в тулиевом световоде с нормальной дисперсией / В. С. Воропаев [и др.] // Фотон-экспресс. 2021. № 6(174). С. 122-123. (0,23 п. л. / 0,18 п. л.)
4. All-fiber ultrafast amplifier at 1.9 μm based on thulium-doped normal dispersion fiber and LMA fiber compressor / V. Voropaev [et al.] // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No 1. (1,04 п. л. / 0,83 п. л.)
5. All-fiber 1.9 μm ultrafast amplifier based on normal dispersion thulium-doped fiber and large mode area silica fiber compressor / V. S. Voropaev [et al.] // International Conference on Laser Optics, St. Petersburg, 02–06 ноября 2020 года. St. Petersburg, 2020. P. 9285426. (0,12 п. л. / 0,09 п. л.)
6. Numerical modelling of stretched pulse hybrid mode-locked tm-doped all-fiber laser at 1.9 μm compared with experimental data / V. S. Voropaev [et al.] // Optics InfoBase Conference Papers, Virtual, Online, 14–17 сентября 2020 года. Virtual, Online, 2020. P. LM4F.4. (0,23 п. л. / 0,18 п. л.)
7. Ultrashort pulse amplification and compression at 1.9 μm using normal dispersion thulium-doped germanosilicate fiber / V. S. Voropaev, A. I. Voronets, D. T. Batov [et al.] // Optics InfoBase Conference Papers, Virtual, Online, 14–17 сентября 2020 года. Virtual, Online, 2020. P. LW7G.2. (0,23 п. л. / 0,18 п. л.)
8. Numerical model of hybrid mode-locked Tm-doped all-fibre laser / A. Donodin [et al.] // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. No 1. P. 17396. (1,04 п. л. / 0,52 п. л.)
9. High Power Multi-soliton and Noise-like Pulse Generation Regimes in a Passively Mode-locked Thulium-doped All-fiber Ring Oscillator / V. S. Voropaev, A. I. Donodin, A. I. Voronets [et al.] // Progress in Electromagnetics Research Symposium : 2019 PhotonIcs and Electromagnetics Research Symposium - Spring, PIERS-Spring 2019 - Proceedings, Rome, 17–20 июня 2019 года. Rome: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. P. 2399-2404. (0,69 п. л. / 0,62 п. л.)
10. Supercontinuum generation in a As_2S_3 -silica nanospike waveguide pumped by Tm-doped fiber laser / A. Donodin, V. Voropaev, A. Voronets [et al.] // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, CLEO/Europe-EQEC 2019, Munich, 23–27 июня 2019 года. Munich, 2019. P. 8871929. (0,12 п. л. / 0,09 п. л.)
11. Femtosecond thulium-doped fiber-ring laser for mid-IR spectroscopic breath analysis / A. Donodin, V. Voropaev, V. Lazarev [et al.] // Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE : Laser Physics, Photonic Technologies and Molecular Modeling, Saratov, 24–28 сентября 2018 года. Saratov: SPIE, 2019. P. 1106603. (0,92 п. л. / 0,1 п. л.)
12. Generation of multi-solitons and noise-like pulses in a high-powered thulium-doped all-fiber ring oscillator / V. Voropaev [et al.] // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. No 1. P. 18369. (1,27 п. л. / 1,02 п. л.)