

На правах рукописи



КОПТЕВ Максим Юрьевич

**РАЗРАБОТКА
ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОГО
ИСТОЧНИКА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ ER-TM ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ**

1.3.19 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

Научный руководитель:

Ким Аркадий Валентинович,
кандидат физико-математических наук,
зав. лабораторией экстремальной нелинейной оптики ИПФ РАН

Официальные оппоненты:

Бутов Олег Владиславович,
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе
ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН;

Мелькумов Михаил Александрович,
кандидат физико-математических наук,
зав. лабораторией волоконных лазеров и
усилителей НЦВО им. Е.М. Дианова РАН

Ведущая организация:

Институт автоматизации и электротехники
Сибирского отделения РАН

Защита диссертации состоится «13» декабря 2021 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН и на сайте ipfran.ru

Автореферат диссертации разослан « » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время волоконные лазерные системы получили широкое распространение во многих областях науки и техники, таких как спектроскопия, медицина, обработка материалов и многие другие. Основными преимуществами волоконных лазерных систем по сравнению с твердотельными аналогами являются компактные размеры, высокая стабильность, отсутствие необходимости настройки в процессе работы, простота изготовления, а также низкая стоимость за счет использования широко распространенных телекоммуникационных компонентов. Широкая полоса усиления активных волокон (эрбиевые, иттербиевые, тулиевые световоды) а также возможность гибкого управления дисперсионными свойствами волокон позволяют создавать полностью волоконные генераторы и усилители ультракоротких импульсов. Существенным отличием волоконных лазеров от твердотельных аналогов является большое влияние нелинейных эффектов, за счет малого диаметра моды. Этот факт накладывает ограничение на максимально достижимую пиковую мощность для полностью волоконных систем, однако большая нелинейность позволяет в свою очередь осуществлять перестройку длины волны лазерных импульсов в большом диапазоне длин волн. Таким образом, для создания перестраиваемого полностью волоконного источника требуется с одной стороны минимизировать нелинейность волоконных усилителей, чтобы избежать искажения формы и дробления фемтосекундных импульсов, а с другой стороны иметь волокна с высокой нелинейностью для эффективной перестройки длины волны. Разработка перестраиваемых волоконных источников в ближнем и среднем ИК-диапазоне является в настоящее время актуальной задачей. Такие источники могут быть использованы для создания лидаров, оптических линий связи, а также для задач спектроскопии и анализа газового состава.

Цели диссертационной работы

- 1) Разработка мощных фемтосекундных эрбиевых CPA систем на основе активных LMA и конусного эрбиевых световодов.
- 2) Разработка гибридной полностью волоконной эрбий-тулиевой системы, генерирующей фемтосекундные импульсы на длине волны 2 мкм.
- 3) Экспериментальное исследование генерации широкополосного суперконтинуума в германатных световодах при накачке фемтосекундными импульсами на длинах волн 1.5 и 2 мкм
- 4) Экспериментальное исследование генерации перестраиваемых рамановских солитонов в микроструктурированных теллуридных световодах при накачке фемтосекундными импульсами на длинах волн 1.5 и 2 мкм

Научная новизна

- 1) Продемонстрирована фемтосекундная волоконная лазерная система на основе активного эрбиевого волокна с большой площадью поля моды. В режиме усиления чирпированных импульсов (CPA) в системе получены субмикроджоульные импульсы на длине волны 1.6 мкм длительностью 530 фс с пиковой мощностью 750 кВт. В полностью волоконном режиме получены импульсы с энергией 14 нДж и длительностью 70 фс. Пиковая мощность излучения составляет 165 кВт, что близко к рекордному значению для систем без внешнего компрессора.
- 2) Продемонстрирована CPA лазерная система на основе конусного эрбиевого световода. Получены импульсы на длине волны 1.56 мкм с энергией 8 мкДж и длительностью 500 фс, что соответствует пиковой мощности 10 МВт.
- 3) Экспериментально продемонстрирован режим генерации двухцветных оптически синхронизированных фемтосекундных импульсов в тулиевом волоконном усилителе, при котором один импульс имеет длину волны 2 мкм, а второй может быть перестроен в диапазоне 2.15–2.3 мкм.
- 4) Показана возможность генерации широкополосного суперконтинуума в диапазоне 1.5–3 мкм в германатных световодах с накачкой фемтосекундными импульсами на длине 1.5 мкм.
- 5) В ходе исследования преобразования спектра гибридной эрбий-тулиевой лазерной системы в микроструктурированных теллуридных световодах была показана возможность генерации перестраиваемых в диапазоне 1.6–2.65 мкм рамановских солитонов, с длительностью порядка 100 фс.

Практическая значимость

- 1) Созданы мощные волоконные лазерные системы на основе LMA и конусного активных эрбиевых световодов с мегаваттной пиковой мощностью. Такие системы могут найти широкое применение в медицине, микрообработке материалов, а так же имеют множество научных приложений.
- 2) Создана двухцветная тулиевая лазерная система, генерирующая импульсы на длинах волн 2 и 2.3 мкм, которая может быть использована в качестве затравки для мощных твердотельных Cr:ZnSe или Cr:ZnS усилителей.
- 3) Разработанные в ходе диссертационной работы источники излучения среднего ИК-диапазона (1.5–3 мкм) могут найти широкое применение в задачах спектроскопии, дистанционного зондирования атмосферы и телекоммуникациях.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Волоконная система, построенная по принципу МОРА и использующая в качестве оконечного усилителя эрбиевый конусный световод, способна

в СРА режиме генерировать фемтосекундные импульсы с пиковой мощностью 10 МВт.

- 2) Тулиевый волоконный усилитель способен работать в режиме одновременной генерации двух длин волн: исходной 2 мкм и перестраиваемого в диапазоне 2.15–2.3 мкм солитона, генерирующегося непосредственно в активном волокне.
- 3) В пассивном конусном германатном световоде может генерироваться широкополосный (1.5–3 мкм) суперконтинуум при накачке фемтосекундными импульсами на длине волны 1.5 мкм
- 4) В микроструктурированном теллуридном световоде возможна генерация плавно перестраиваемых в широком диапазоне (1.6–2.65 мкм) рамановских солитонов при накачке фемтосекундными импульсами на выходе гибридной эрбий-тулиевой фемтосекундной волоконной системой.

Личный вклад диссертанта

Основные экспериментальные результаты были получены лично автором или при его определяющем участии. Автором были самостоятельно проведены эксперименты по усилению ультракоротких импульсов в эрбиевом конусном световоде, была разработана и исследована гибридная эрбий-тулиевая волоконная система, проведены эксперименты по нелинейному преобразованию длин волн в германатных и теллуридных световодах. Автор принимал участие в обработке и анализе экспериментальных данных, а также восстановлении формы оптических импульсов из FROG спектрограмм. Основные публикации были подготовлены совместно с соавторами.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена использованием актуальных методов исследования и современного научного оборудования, сравнением экспериментально полученных результатов с результатами численного моделирования, анализом литературных данных, а также результатами последующих исследований других научных групп.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях: VIII Международная конференция молодых ученых и специалистов «ОПТИКА – 2013» (Россия, г. Санкт-Петербург, 2013 г.), Форум молодых ученых ННГУ (Россия, г. Нижний Новгород, 2013 г.), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (Россия, г. Москва, 2013 г.), XIX и XX Нижегородские сессии молодых ученых (Россия, г. Нижний Новгород, 2014 и 2015 гг.), SPIE Photonics West Conference (США, г. Сан-Франциско 2014 и 2016 гг.), 7th EPS-QEOD EURO-PHOTON CONFERENCE "Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources" (Австрия, г. Вена, 2016 г.)

По теме диссертации опубликовано 17 работ, 10 из которых индексируются международными библиографическими базами данных. Работы включают в себя 9 статей в рецензируемых научных журналах, 2 статьи в сборниках трудов и 6 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 106 страниц, включая 50 рисунков. Список литературы включает 103 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследований, а также основные положения, выносимые на защиту, отмечена научная новизна, достоверность и научно-практическая значимость полученных результатов, перечислены основные публикации и доклады по материалам диссертации.

Первая глава посвящена разработке мощных волоконных фемтосекундных лазерных систем на основе активных эрбиевых световодов с большой площадью поля моды: LMA световода и световода-конуса [1–3]. При усилении фемтосекундных импульсов в активных световодах, существенным становится негативное влияние нелинейных эффектов, чтобы их минимизировать используют световоды с большой площадью поля моды.

В LMA световодах увеличение площади моды достигается за счет уменьшения разницы показателей преломления сердцевины волокна и его оболочки. На основе такого световода с диаметром сердцевины 34 мкм и легированного ионами эрбия [2] была разработана мощная лазерная система, построенная по принципу МОРА. Был исследован как полностью волоконный режим работы системы, так и CPA режим с внешним компрессором. В полностью волоконном режиме (рис. 1) импульсы на выходе задающего генератора (200 фс, 50 МГц) сначала усиливались эрбиевым предусилителем до энергии 2 нДж, а затем в оконечном каскаде выполненном на LMA световоде.

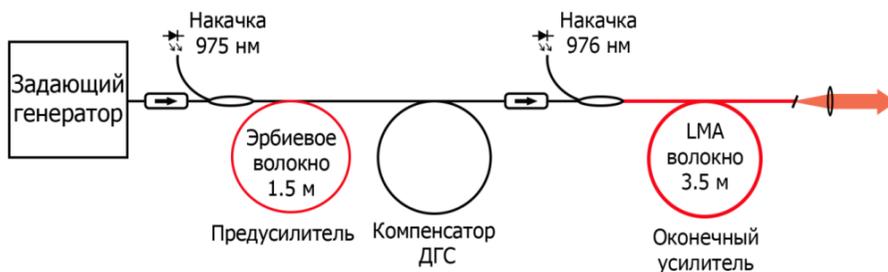


Рис. 1. Схема полностью волоконной лазерной системы на основе LMA эрбиевого световода

Дисперсия LMA световода компенсировалась отрезком германатного световода с нормальной ДГС. На выходе активного LMA световода были получены импульсы с энергией ~ 14 нДж и длительностью 70 фс (рис. 2).

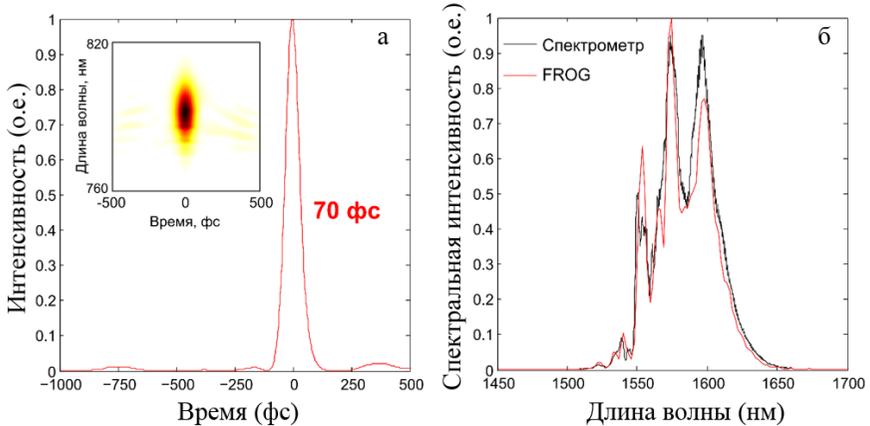


Рис. 2. FROG-спектрограмма и восстановленная из нее форма импульса на выходе полностью волоконной схемы (а) и измеренный и восстановленный из FROG-спектрограммы спектры импульсов (б)

Длительность импульсов измерялась методом оптического стробирования с разрешением по частоте (FROG). Пиковая мощность в импульсе, рассчитанная с учетом восстановленной из FROG-спектрограммы формы импульса составила 165 кВт, что близко к рекордному значению для эрбиевых полностью-волоконных систем без внешнего компрессора. В режиме усиления chirпированных импульсов, помимо волоконного стретчера, в схему был добавлен акустооптический модулятор для прореживания импульсов, а также второй предусилитель (рис. 3).

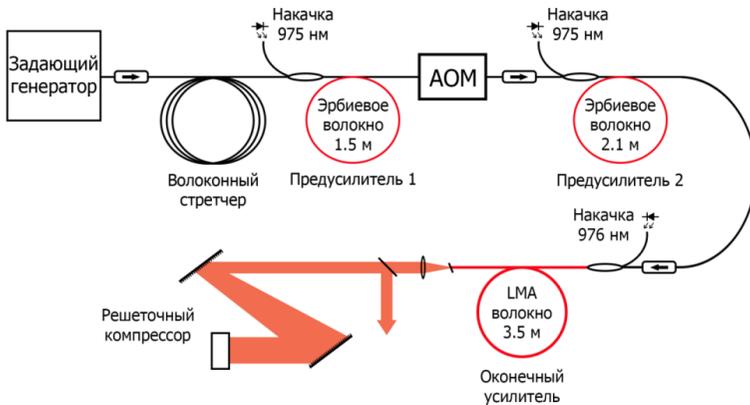


Рис. 3. Схема CPA эрбиевой волоконной системы

Импульсы с задающего генератора растягивались волоконным стретчером до длительности 50 пс. Для обеспечения высокой пиковой мощности при небольшой средней мощности, частота повторения импульсов была понижена акустооптическим модулятором до 1 МГц. Энергия импульсов на выходе LMA световода составила 1 мкДж, затем импульсы сжимались при помощи решеточного компрессора до длительности 530 фс, энергия в импульсе при этом составила 400 нДж (рис. 4).

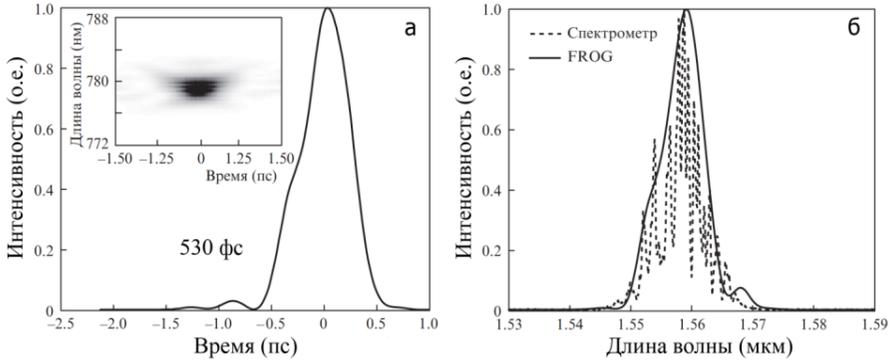


Рис. 4. FROG-спектрограмма и восстановленная из нее форма импульса (а); измеренный и восстановленный из FROG-спектрограммы спектры сигнала на выходе CPA системы (б) [1]

Произведение ширины спектра на длительность импульса (ТВР) составило 0,5, что говорит о хорошем качестве сжатия импульса. Пиковая мощность импульса составила 750 кВт [1].

Еще одним подходом к увеличению площади поля моды световода является использование световодов с увеличивающимся по длине диаметром или конусных световодов. В них за счет адиабатического увеличения диаметра сердцевинки удается обеспечить одномодовый режим работы, при том, что сам световод в толстой части не является одномодовым.

CPA система построенная на основе конусного световода (рис. 5) также построена по принципу задающий генератор – мощный усилитель (MOPA). Импульсы с задающего генератора растягивались волоконным стретчером до длительности ~100 пс, усиливались двумя эрбиевыми предусилителями. Частота повторения импульсов понижалась акустооптическим модулятором до 100 кГц.

Оконечный усилитель был выполнен на отрезке конусного эрбиевого световода длиной 3,2 метра с начальным диаметром оболочки 88 мкм и конечным 300 мкм. Диаметр сердцевинки изменялся от 22 мкм в тонкой части до 75 мкм в толстой. Накачка активного световода осуществлялась в направлении обратном распространению сигнала. Для накачки использовался много-

модовый лазерный диод мощностью 60 Вт со стабилизированной длиной волны 976 нм. Излучение накачки коллимировалось и заводилось в конусный световод при помощи линз с фокусным расстоянием 40 мм. Вывод излучения сигнала осуществлялся дихроичным диэлектрическим зеркалом.

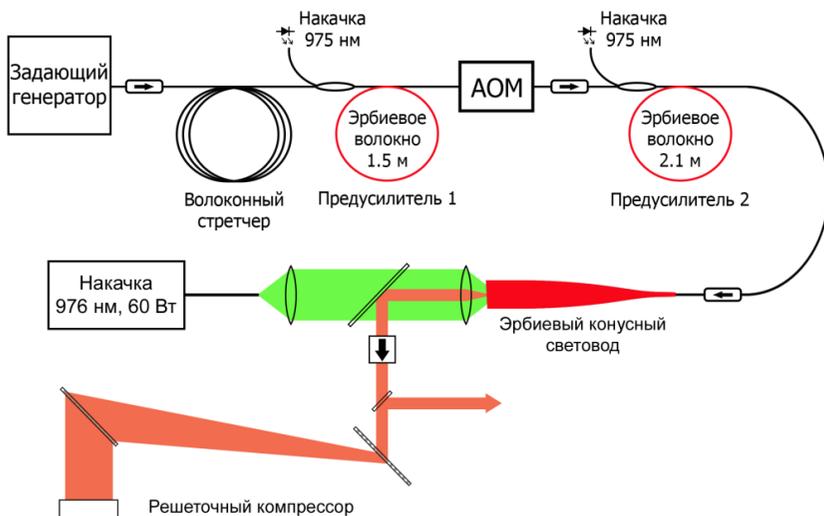


Рис. 5. Схема CPA системы на основе эрбиевого конусного световода [3]

Импульсы на выходе сжимались решеточным компрессором на просветных решетках (LightSmyth T-940CL, 940 штр./мм). При этом на выходе компрессора с учетом эффективности сжатия (75%) и пропускания изолятора фарадея (85%) энергия в импульсе составила 8 мкДж. Длительность импульса, измеренная методом FROG, составила 500 фс (рис. 6).

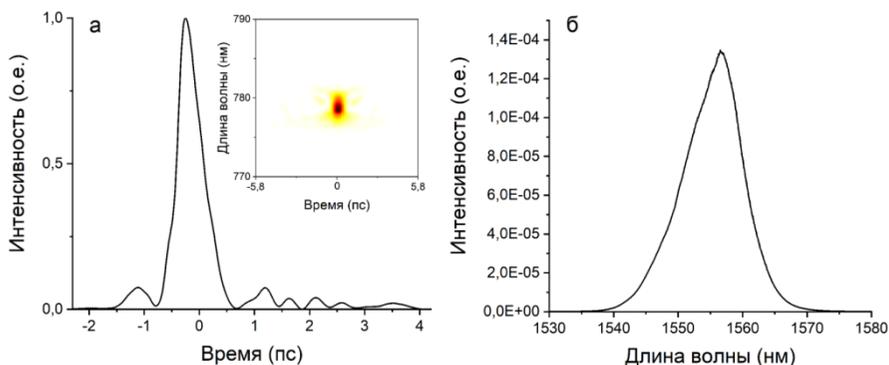


Рис. 6. FROG-спектрограмма и восстановленная из нее форма импульса (а) и спектр (б) на выходе CPA системы на основе конусного световода [3]

Максимальная пиковая мощность, достигнутая в эксперименте, составила порядка 10 МВт. Это значение было экспериментально подтверждено превышением порога самофокусировки импульсов в кварцевом стекле [3].

Вторая глава посвящена разработке гибридной эрбий-тулиевой волоконной системы [4, 5]. За основу была взята эрбиевая фемтосекундная лазерная система, состоящая из волоконного фемтосекундного лазера с пассивной синхронизацией мод, двух предусилителей и акустооптического модулятора (рис. 7). Средняя мощность после первого каскада усиления составила 30 мВт, после чего импульсы прореживались акустооптическим модулятором до частоты повторения 5 МГц. Средняя мощность импульсов на выходе второго эрбиевого усилителя составила 20 мВт. Далее длина волны излучения преобразовывалась в двухмикронный диапазон в отрезке высоконелинейного световода длиной 20 см, за счет эффекта рамановского самосмещения частоты [4]. Усиление двухмикронных импульсов происходило в отрезке тулий-иттербиевого световода длиной 10 м с диаметром сердцевины 10 мкм. Активный световод имел сдвоенную структуру (световод типа «двушка»), его сердцевина содержала 0.8 мас. % Tm^3 и 4.8 мас. % Yb^3 .

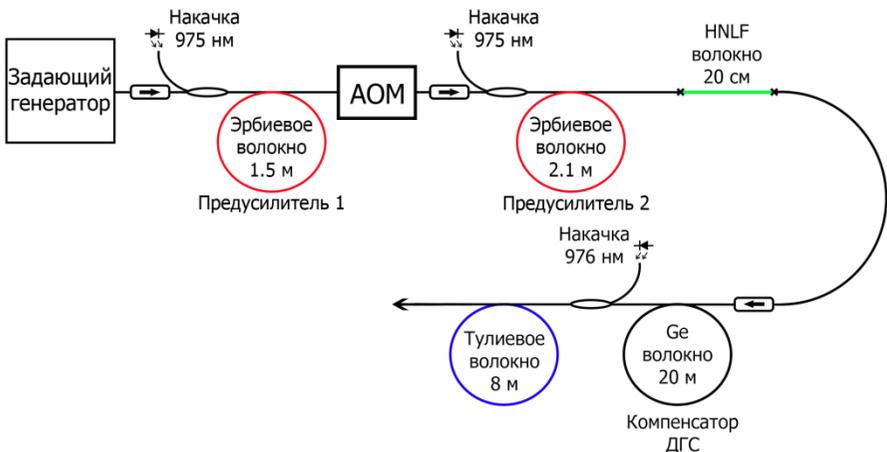


Рис. 7. Схема гибридной эрбий-тулиевой волоконной системы.

Накачка осуществлялась сборкой многомодовых лазерных диодов на длине волны 976 нм. Для компенсации дисперсии тулиевого световода использовался отрезок волокна с нормальной ДГС ($50 \text{ ps}^2/\text{км}$) длиной 20 м. На выходе системы были продемонстрированы импульсы с энергией 2 нДж с центральной длиной волны 2.01 мкм. Длительность импульсов была измерена методом FROG и составила 130 фс (рис. 8).

При дальнейшем увеличении мощности накачки тулиевого усилителя, что соответствует энергии в импульсе > 2 нДж, наблюдался двухцветный режим работы усилителя, при котором от основного импульса на длине волны

2 мкм непосредственно в усилителе отделялся рамановский солитон. Регулировкой накачки осуществлялась плавная перестройка солитона в диапазоне 2.1–2.3 мкм (рис. 9).

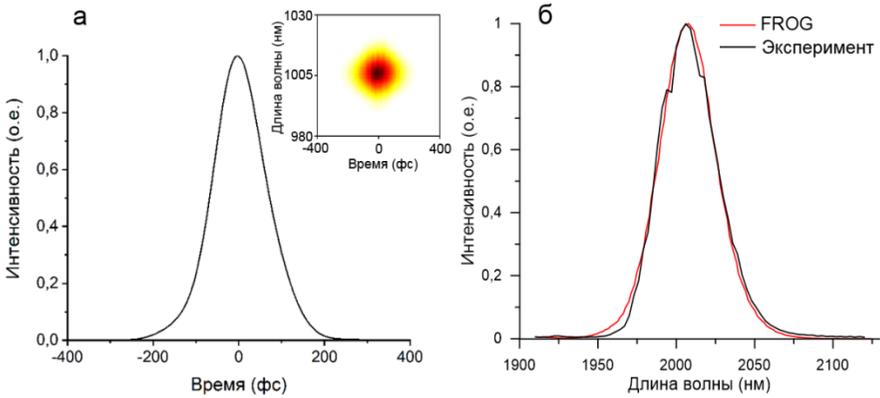


Рис. 8. FROG-спектрограмма и восстановленная из нее форма импульса (а) и измеренный экспериментально и восстановленный из FROG-спектрограммы спектры на выходе тулиевого усилителя (б)

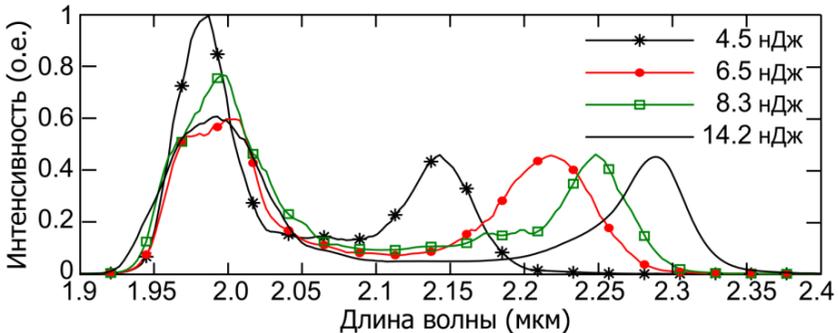


Рис. 9. Режим генерации двухцветных импульсов. Спектры на выходе тулиевого световода в зависимости от суммарной энергии импульсов [5]

Длительность импульсов на длинах волн 2 мкм и 2.25 мкм была экспериментально измерена методом FROG. Для импульса на длине волны 2 мкм длительность составила 125 фс при энергии 5 нДж, а для импульса на длине волны 2.25 мкм длительность составила 145 фс при энергии 3 нДж.

Также была исследована возможность работы лазерной системы в режиме усиления chirпированных импульсов. Для этого компенсатор ДГС перед тулиевым усилителем был заменен на волоконный стретчер из отрезка свето-

вода SMF-28e длиной 30 м. Максимальная энергия импульсов на выходе усилителя составила 200 нДж при длительности импульса 35 пс (рис. 10). Параметр линейного чирпа составил 0.185 пс^{-2} . По оценке данные импульсы могут быть сжаты до длительности 120 фс при помощи решеточного компрессора [5].

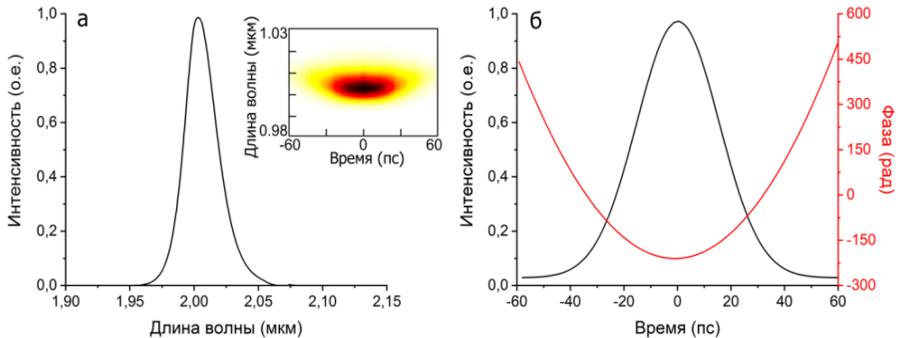


Рис. 10. Спектр (а) и восстановленная из FROG-спектрограммы форма (б) импульса на выходе тулиевого усилителя в режиме CPA

Усиление импульсов до больших энергий приводило к порче фазового профиля импульса и его формы за счет влияния ФСМ, что приводит к невозможности дальнейшего эффективного сжатия импульса.

Третья глава содержит результаты экспериментов по широкополосной перестройке фемтосекундных лазерных импульсов в средний ИК-диапазон [6–9]. Для этого, прежде всего, необходимо, чтобы световод, в котором осуществляется преобразование, был прозрачен в данной спектральной области. Поэтому в экспериментах использовались германатный и теллуридный световоды.

Германатные световоды имеют сердцевину, выполненную из оксида германия, а оболочку из оксида кремния. Они прозрачны в диапазоне длин волн до 3 мкм и имеют, по сравнению с кварцевыми, больший коэффициент нелинейности. В эксперименте использовались германатные световоды, выполненные в виде конуса, то есть с изменяющимся по длине диаметром сердцевины и оболочки. Накачка световодов осуществлялась как при помощи эрбиевой фемтосекундной лазерной системы генерирующей импульсы с энергией 2 нДж и длительностью 70 фс с частотой повторения 50 МГц (рис. 11), так и при помощи гибридной эрбий-тулиевой волоконной системы, рассмотренной в главе 2.

Наилучший результат получился при использовании конусного световода с начальным диаметром сердцевины 6 мкм, конечным 3 мкм и длиной 180 см.

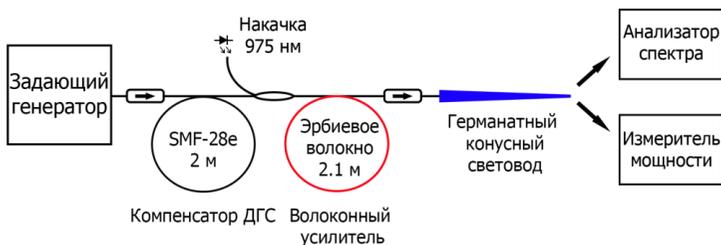


Рис. 11. Схема экспериментальной установки по исследованию конусного германатного световода

При накачке эрбиевой лазерной системой был получен суперконтинуум в диапазоне 1.5–3 мкм (рис. 12).

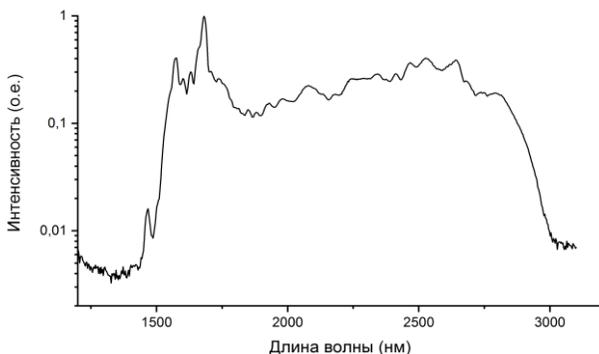


Рис. 12. Спектр суперконтинуума на выходе германатного конусного световода с накачкой фемтосекундными импульсами на длине волны 1.5 мкм

При накачке эрбий-тулиевой лазерной системой был получен суперконтинуум в диапазоне 1.7–3 мкм (рис. 13).

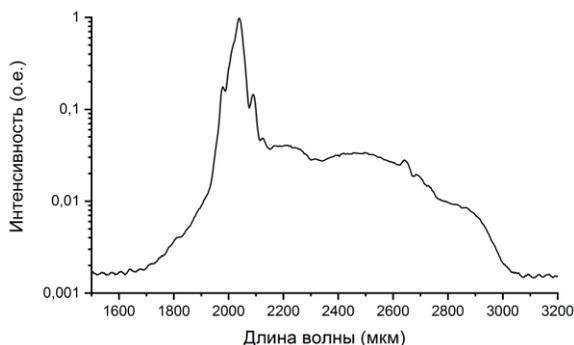


Рис. 13. Спектр суперконтинуума на выходе конусного германатного световода с накачкой фемтосекундными импульсами на длине волны 2 мкм

Из-за сильного поглощения в эксперименте не удалось получить преобразование в область > 3 мкм, однако конусные германатные световоды позволяют создавать компактные и простые в изготовлении источники широкополосного суперконтинуума (схема с полуторамикронной накачкой), что важно для многих приложений.

По сравнению с германатными, теллуридные световоды обладают большей полосой прозрачности (до 4 мкм) и на порядок большим коэффициентом нелинейности. Поскольку температура плавления теллуридных стекол мала, теллуридные световоды, в отличие от германатных не могут быть напрямую сварены с кварцевыми.

В экспериментах по широкополосной перестройке длины волны использовался теллуридный микроструктурированный световод изготовленный из стекла состава $72\text{TeO}_2-24\text{WO}_3-4\text{La}_2\text{O}_3$ (мол. %). Поскольку точка нуля ДГС для теллуридных стекол, как правило, располагается в области > 2 мкм, световод был изготовлен в исполнении с подвешенной сердцевинкой (suspended core). В качестве накачки использовалось излучение как эрбиевой фемтосекундной лазерной системы (1560 нм, 2 нДж, 150 фс), так и эрбий-тулиевой системы (2000 нм, 2–3 нДж, 130 фс) (рис. 14).

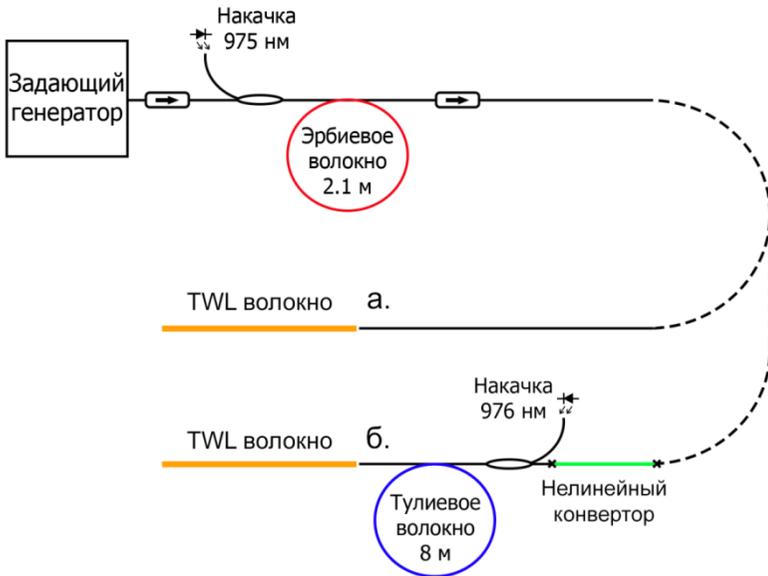


Рис. 14. Схема экспериментальной установки для генерации перестраиваемых солитонов в TWL световоде: а – накачка на длине волны 1,6 мкм, б – накачка на длине волны 2 мкм

Длина теллуритного световода составила 63 см. Ввод излучения в световод осуществлялся при помощи стыковки на микрометрических столах.

При накачке на длине 1.5 мкм на выходе световода наблюдалось сильное уширение спектра накачки, а так же линейные дисперсионные волны в области нормальной дисперсии волокна и рамановские солитоны в области аномальной дисперсии. Максимальная длина волны рамановского солитона составила 2.25 мкм. При накачке на длине волны 2 мкм наблюдались рамановские солитоны с максимальной длиной волны 2.65 мкм. В обоих случаях, варьируя расстояние между световодами, при заводе излучения осуществлялась плавная перестройка длины волны солитонов в широком диапазоне длин волн (рис. 15).

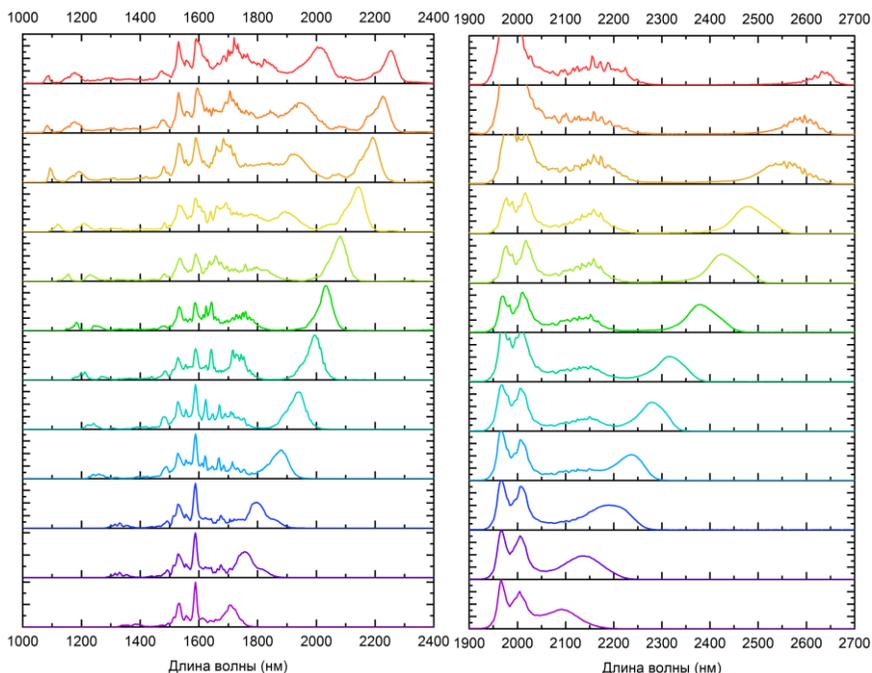


Рис. 15. Спектры на выходе теллуритного световода в зависимости от вводимой энергии (снизу вверх – увеличение энергии) при накачке фемтосекундными импульсами на длине волны 1.5 мкм (слева) и 2 мкм (справа)

Энергия солитонов оценивается в 30–50 пДж. Длительность солитона на длине волны 2 мкм была экспериментально измерена методом FROG и составила 85 фс [8], произведение спектральной ширины импульса на его длительность (ТВР) составило 0.38, что близко к значению для солитона $TBP \approx 0.315$.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы работы.

Основные результаты работы:

- 1) Разработана мощная эрбиевая лазерная система на основе волокна с большой площадью поля моды. Система может работать как в полностью волоконном, так и в CPA режиме. В полностью волоконном режиме были получены импульсы длительностью 70 фс с энергией 14 нДж. Пиковая мощность при этом составила 165 кВт, что близко к рекордному значению для фемтосекундных полностью волоконных систем без внешнего компрессора. В CPA режиме импульсы длительностью 50 пс были сжаты при помощи компрессора до длительности 530 фс с энергией в импульсе 400 нДж. Полученные в CPA режиме импульсы использовались в экспериментах по генерации дисперсионных волн в различных световодах.
- 2) Разработана мощная эрбиевая CPA лазерная система на основе конусного активного световода, имеющего диаметр сердцевины на входе 22 мкм, а на выходе 75 мкм. За счет адиабатического увеличения диаметра активного световода по его длине удается достичь высокого порога нелинейных эффектов при сохранении одномодового излучения. Импульсы длительностью 100 пс были усилены в конусном световоде, а затем сжаты до длительности 500 фс при энергии 8 мкДж, что соответствует пиковой мощности 10 МВт.
- 3) Разработана гибридная эрбий-тулиевая полностью волоконная лазерная система, в которой излучение эрбиевого фемтосекундного источника преобразуется в отрезке нелинейного световода в двухмикронное и затем усиливается тулиевым усилителем. Получены импульсы на длине волны 2 мкм длительностью 130 фс с энергией 2 нДж, а также chirпированные импульсы длительностью 35 пс и энергией 200 нДж, пригодные для дальнейшего сжатия дисперсионным компрессором. Обнаружен режим генерации двухцветных оптически синхронизированных импульсов непосредственно в активном тулиевом световоде. При этом первый импульс остается на длине волны 2 мкм и имеет энергию 3–5 нДж при длительности ~125 фс, а второй представляет собой рамановский солитон, перестраиваемый в диапазоне 2.1–2.3 мкм, длительностью ~140 фс с энергией 3 нДж.
- 4) Экспериментально исследован процесс нелинейного преобразования длин волн в конусных германатных световодах с накачкой фемтосекундными наноджоульными импульсами на длинах волн 1.5 и 2 мкм. Продемонстрирована генерация широкополосного суперконтинуума в диапазоне 1.5–3 мкм для накачки на длине волны 1.5 мкм 70 фс импульсами с энергией 2 нДж. При накачке 120 фс, 2 нДж импульсами на длине волны 2 мкм продемонстрирован суперконтинуум в диапазоне 1.7–3 мкм.
- 5) Исследован процесс генерации рамановских солитонов в микроструктурированном теллуридном световоде с подвешенной сердцевиной. При накачке полуторамикронными импульсами длительностью 150 фс и энер-

гий 2 нДж получены рамановские солитоны перестраиваемые в диапазоне длин волн 1.7–2.25 мкм. При накачке импульсами с выхода тулиевой системы длительностью 125 фс с энергией 2 нДж получены солитоны перестраиваемые в диапазоне длин волн 2.1–2.65 мкм. Перестройка солитонов плавная и в обоих случаях осуществлялась разбюстировкой ввода излучения в теллуритное волокно. Энергия солитонов составляет порядка десятков пикоджоулей. Солитон на длине волны 2 мкм был измерен методом FROG, его длительность составила 85 фс.

Список публикаций по теме диссертации

1. Kotov L.V., **Koptev M. Yu.**, Anashkina E.A., Muravyev S.V., Andrianov A.V., Bubnov M.M., Ignat'ev A.D., Lipatov D.S., Gur'yanov A.N., Likhachev M.E., Kim A.V. Submicrojoule femtosecond erbium-doped fibre laser for the generation of dispersive waves at submicron wavelengths // *Quantum Electron.* 2014. Vol. 44, № 5.
2. Kotov L.V., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Février S., Lhermite J., Cormier E., **Koptev M.Y.**, Anashkina E.A., Muraviev S.V., Andrianov A.V., Kim A.V., Likhachev M.E. Double-clad large mode area Er-doped fiber for high-energy and high-peak power amplifiers // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.* 2014. Vol. 8961.
3. Andrianov A.V., **Koptev M.Yu.**, Anashkina E.A., Muravyev S.V., Kim A. V., Lipatov D.S., Velmiskin V. V., Levchenko A.E., Bubnov M.M., Likhachev M.E. Tapered erbium-doped fibre laser system delivering 10 MW of peak power // *Quantum Electron.* IOP Publishing, 2019. Vol. 49, № 12. P. 1093–1099.
4. Anashkina E.A., Andrianov A.V., **Koptev M.Yu.**, Mashinsky V.M., Muravyev S.V., Kim A.V. Generating tunable optical pulses over the ultrabroad range of 1.6–2.5 μm in GeO_2 -doped silica fibers with an Er: fiber laser source // *Opt. Express.* 2012. Vol. 20, № 24.
5. **Koptev M.Yu.**, Anashkina E.A., Andrianov A.V., Muravyev S.V., Kim A.V. Two-color optically synchronized ultrashort pulses from a Tm/Yb-co-doped fiber amplifier // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, № 7.
6. Anashkina E.A., Andrianov A.V., **Koptev M.Y.**, Muravyev S.V., Kim A.V. Generating femtosecond optical pulses tunable from 2 to 3 μm with a silica-based all-fiber laser system // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, № 10.
7. Anashkina E.A., Andrianov A.V., **Koptev M. Yu.**, Muravyev S.V., Kim A.V. Towards Mid-Infrared Supercontinuum Generation With Germano-Silicate Fibers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2014. Vol. 20, № 5.
8. **Koptev M.Yu.**, Anashkina E.A., Andrianov A.V., Dorofeev V.V., Kosolapov A.F., Muravyev S.V., Kim A.V. Widely tunable mid-infrared fiber laser source based on soliton self-frequency shift in microstructured tellurite fiber // *Opt. Lett.* 2015. Vol. 40, № 17. P. 4094–4097.

9. **Koptev M.Y.**, Anashkina E.A., Andrianov A.V., Dorofeev V.V., Kosolapov A.F., Muravyev S.V., Kim A.V. Broadband soliton self-frequency shifting of hybrid femtosecond Er/Tm fiber laser system in microstructured suspended-core tellurite fiber // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2016. Vol. 9728.

КОПТЕВ Максим Юрьевич

**РАЗРАБОТКА
ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННОГО
ИСТОЧНИКА ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ ER-TM ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 11.10.2021 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ №48(2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46