

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.223.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
ИМ. А.М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»,  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 27 октября 2025 г. № 35

О присуждении Звереву Андрею Дмитриевичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Волоконные источники ультракоротких импульсов с гигагерцовой и субгигагерцовой частотами следования импульсов в спектральном диапазоне 1.5-1.6 мкм» по специальности 1.3.19. Лазерная физика принята к защите 16 июня 2025 г. (протокол заседания № 30) диссертационным советом 24.1.223.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (119991 ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, д. 38, приказ о выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук» от 12.12.2023 г. № 2290/нк).

Соискатель Зверев Андрей Дмитриевич, 14 ноября 1997 года рождения. В 2021 г. соискатель с отличием окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по направлению 03.04.02 «Физика». В 2025 году соискатель окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Соискатель работает в должности инженера в лаборатории Активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального

исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель работал в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника в лаборатории Активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории Активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель — Камынин Владимир Александрович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

Каблуков Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории оптических сенсорных систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.

Воропаев Василий Сергеевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории инфракрасных лазерных систем НОЦ «Фотоника и ИК-техника» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

дали положительные отзывы о диссертации со следующими замечаниями:



## 1. Замечания Каблукова С.И.:

1. Сравнивая рисунки 49 и 62, можно прийти к заключению, что при формулировке выводов к главе 3 было сделано ошибочное утверждение о том, что "реализация основной частоты повторения импульсов более 200 МГц на данной компонентной базе невозможна". Тем не менее, сравнивая Рис. 49, где длина резонатора 67 см, и Рис. 62, где из компонентов похожих размеров изображен кольцевой резонатор длиной  $L_{\text{общ}} = 42$  см, можно заключить, что длина линейного резонатора также может быть уменьшена. Кроме того, поскольку в линейной схеме длина активного волокна на 8 см короче, то линейный резонатор может быть сокращен до 36 см, что чуть ли не в два раза меньше, чем представленная на Рис. 49 схема. Таким образом частота следования импульсов может быть увеличена до  $\sim 300$  МГц, что существенно больше, чем указанные в выводах 200 МГц.
2. В выводах к главе 4 написано: "Для уменьшения мощности накачки, необходимой для осуществления генерации, использовалось композитное волокно, легированное комплексом активных ионов Er/Yb (в отличие от волокна, которое использовалось в линейных схемах)." В диссертации не указано по какой причине в линейной и кольцевой схемах использовались разные композитные волокна. Кроме того, в Таблице 2, где сравниваются различные активные Er волокна, следовало также привести композитное Er волокно.
3. В диссертации проводится численное моделирование, но не всегда обосновывается выбор параметров. Например, отсутствует обоснование выбора параметра нелинейности композитного волокна  $\gamma = 0,004 \text{ Вт}^{-1}\text{м}^{-1}$ .
4. Присутствуют опечатки и погрешности в оформлении. Например, в оглавлении нарушен порядок нумерации, где дважды встречаются пункты с совпадающими номерами 1.2 и 1.3.

## 2. Замечания Воропаева В.С.:

1. При измерении спектров усиления ASE в композитном волоконном световоде неясно, учитывались ли спектральные зависимости пропускания используемых мультиплексоров, и насколько учёт данных зависимостей может исказить результат измерений.
2. В ходе работы делается акцент на важность разработки стабильных источников генерации УКИ, при этом практически все разработанные источники имеют в своём составе контроллеры поляризации и волоконные световоды, не сохраняющие состояние поляризации. Известно, что под действием внешних воздействий (разной температуры, давления, влажности) режим генерации в волоконных лазерах УКИ, использующих контроллеры поляризации и волокна, не

сохраняющие поляризацию излучения, может измениться. При этом из работы неясно, насколько разработанные источники (кроме лазеров с гармонической синхронизацией мод) стабильны к воздействиям такого рода, происходили ли срывы генерации во время работы данных лазеров в лабораторных условиях, приходилось ли в разные дни изменять настройки контроллеров поляризации. Если же подверженность внешним воздействиям для разработанных лазеров характерна, хорошо было бы привести рекомендации по улучшению долговременной стабильности данных систем для использования вне лабораторных условий.

3. В линейном резонаторе без контроллера поляризации (рис. 49) запуск синхронизации мод осуществлен при трёх слоях одностенных углеродных нанотрубок, но насколько запуск синхронизации мод был повторяемым в данной схеме, и требовалась ли настройка каких-то дополнительных параметров резонатора, не говорится. Также не проводится рассуждений, за счёт чего значительно изменилась длительность импульсов по сравнению со схемой, в которой контроллер поляризации присутствовал.

4. В схемах лазеров на рисунках 46 и 49 в активные световоды вводится только часть излучения накачки (около 70%), что с точки зрения законченного решения является неэффективным. При этом в работе отсутствуют комментарии о возможности устранения данных нежелательных потерь.

5. При исследовании гармонической синхронизации мод не представлены оценки длительности импульсов и ширины спектра, что не позволяет получить полную картину режимов генерации, хотя представлены измеренные спектры излучения.

6. Известно, что действие насыщающихся поглотителей может быть описано уравнением для двухуровневой квантовой системы с учётом времени релаксации возбуждённого состояния. Характерное время релаксации одностенных углеродных нанотрубок составляет около 500 фс, что соизмеримо с длительностями импульсов, представленными в работе. При этом в работе никак не упоминается это свойство насыщающегося поглотителя, и не даются комментарии о важности учёта данного свойства при численном моделировании лазера.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирская область, г. Новосибирск, в своем положительном заключении, подписанным Коляда Натальей Александровной, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником лаборатории 1.1 Оптических часов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук и утвержденным доктором физико-математических наук, директором Федерального государственного



бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук Прудниковым Олегом Николаевичем, указала, что диссертационная работа Зверева Андрея Дмитриевича «Волоконные источники ультракоротких импульсов с гигагерцовой и субгигагерцовой частотами следования импульсов в спектральном диапазоне 1.5-1.6 мкм» является законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном и инженерном уровне, и соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в соответствии с действующим «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РА № 842 от 24 сентября 2013 года (ред. от 16 октября 2024 года).

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19. Лазерная физика по физико-математическим наукам. Считаю, что автор диссертации Зверев Андрей Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Вместе с тем работа не лишена некоторых недостатков, среди которых можно выделить следующие:

1. В защищаемом положении номер 3 указано, что отношение сигнал/шум частоты повторения импульсов составляет 70 дБ. Однако по приведенным радиочастотным спектрам в тексте диссертации невозможно однозначно этого утверждать.
2. Не все ссылки на научные статьи подобраны корректно. Также в ряде случаев ссылки не приведены, хотя приводится информация из сторонних работ. В главе 4.4 (и далее) приводится сравнение полученных результатов с работой [108] из списка цитируемой литературы. При этом в данной статье рассматривался другой тип резонатора лазера и другие режимы работы. Для сравнения следовало найти более схожий пример.
3. Для большинства приведенных радиочастотных и оптических спектров не приведено разрешение анализаторов. В результате достоверность измерений уровней сигнал/шум радиочастотных межмодовых биений лазеров неоднозначна. Также на графиках мощности не приведен диапазон ошибок экспериментальных данных.
4. В главе 3.6. описано применение трех слоев углеродных нанотрубок толщиной 60 нм, при этом не обосновано количество слоев. Ранее в диссертации было доказано, что достаточно одного слоя.
5. В таблице 9 приведены численные данные измерений уровней сигнал/шум межмодовых биений лазеров с различными длинами резонаторов. Приведены значения 75 дБ и 70 дБ для длин резонаторов 0,81 и 0,67 м, соответственно. Для волоконных лазеров эти значения достаточно высокие. Однако не приведены радиочастотные спектры, подтверждающие эти величины.

6. Не всегда объясняется физика результатов.
7. В тексте диссертации и автореферата присутствуют опечатки и неверно сформулированные предложения.

Перечисленные замечания относятся к недостаткам представления материала и не снижают значимости диссертационного исследования.

Соискатель имеет 6 публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях. Из них 4 входят в международные базы Web of Science и Scopus. В рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ, по созданию на основе композитных волокон, легированных ионами эрбия и комплексом эрбий-иттербий, источников ультракоротких импульсов (длительность менее 10 пс) с субгигагерцовыми и гигагерцовыми частотами повторения, в которых соискатель принял непосредственное участие при проведении экспериментов, обработке экспериментальных данных и написании публикаций. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Список наиболее значительных работ:

1. Passively mode-locked composite erbium fiber laser with a pulse repetition rate of 150 MHz / A.D. Zverev, V.A. Kamynin, S.A. Filatova [et al.] // Optik. - 2022. - Т. 249. - С. 168218.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168218>
2. Er-Yb all-fiber laser with a repetition rate for ultrashort pulses of 300 MHz / A. Zverev, V. Kamynin, V. Tsvetkov [et al.] // Optical Fiber Technology. - 2024. - Т. 88. - С. 104007.  
<https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.104007>
3. Зверев, А.Д. ЭРБИЕВЫЙ ИСТОЧНИК УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ С ГИГАГЕРЦОВЫМИ ЧАСТОТАМИ ПОВТОРЕНИЯ / А.Д. Зверев, В.А. Камынин, В.Б. Цветков // Фотон-экспресс. - 2023. - № 6 (190). - С. 221-222.  
<https://doi.org/10.24412/2308-6920-2023-6-221-222>
4. Comparison of Mode Locking Regimes Based on Nonlinear Rotation of the Polarization Plane in Erbium Fiber-Optic Lasers with Dumbbell-Type and Annular Cavity Designs / A.D. Zverev, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. - 2022. - Т. 49. - № Suppl 1. - С. S35-S42.  
<https://doi.org/10.3103/S1068335622130164>
5. (Invited) control of supercontinuum generation due to soliton propagation in fibers with varying dispersion / D. Korobko, V. Kamynin, M. Salganski, A Sysoliatin, I. Zhluktova, A. Zverev [et al.] // Optik. - 2023. - Т. 287. - С. 171032.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.171032>



6. Зверев А. Д. СИНХРОНИЗАЦИЯ МОД НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГАНТЕЛЕВИДНОМ ЭРБИЕВОМ ЛАЗЕРЕ / А. Д. Зверев, В. А. Камынин, В. Б. Цветков //Фотон-экспресс. – 2021. – №. 6 (174). – С. 106-107.

<https://doi.org/10.24412/2308-6920-2021-6-106-107>

На автореферат поступили 2 отзыва; все отзывы положительные, но есть замечания:

1. От Волкова Игоря Александровича, кандидата физико-математических наук, старшего преподавателя кафедры физического материаловедения Института наукоемких технологий и новых материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»:

- 1) Присутствуют небольшие замечания к оформлению рисунков.
- 2) При анализе автореферата обращает на себя внимание недостаточная обоснованность выбора ключевого параметра заявляемой лазерной схемы. Речь идет о количестве слоев одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ), используемых в качестве насыщающегося поглотителя. В работе декларируется использование структуры из трех слоев, однако отсутствуют данные, подтверждающие, что данное количество является оптимальным для достижения импульсной генерации. Проводилась ли в рамках исследования систематическая оптимизация числа слоев ОУНТ, их толщины и оптических свойств?
- 3) В автореферате заявлено о достижении стабильной синхронизации мод, однако отсутствуют количественные данные, подтверждающие этот факт (измерения амплитудного и/или временного джиттера). Данные параметры были бы хорошей оценкой стабильности импульсной последовательности. Проводилась ли в работе оценка долговременной стабильности работы лазера в режиме синхронизации мод, и если да, то каковы были полученные результаты?

2. От Федосеева Анатолия Ивановича, доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова:

- 1) Следовало бы провести анализ возможных направлений интеграций разработанных источников в конкретные технологические системы.
- 2) Ограниченность данных о долговременной стабильности характеристик.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой степенью их компетенции в вопросах лазерной физики, подтвержденной большим числом публикаций в ведущих

рецензируемых изданиях, что позволяет им оценить достоверность полученных результатов и научно-практическую значимость рассматриваемой в диссертации проблемы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработана** новая методика построения коротких линейных и кольцевых резонаторов на основе композитных волокон, легированных ионами Er (с концентрацией  $1,6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) и комплексом Er/Yb (концентрации ионов Er и Yb  $1,1 \cdot 10^{20}$  и  $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соответственно), а также насыщающегося поглотителя на базе одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ).

**Доказана** возможность эффективного применения композитных волокон, легированных ионами Er/Yb (концентрации ионов Er и Yb  $1,1 \cdot 10^{20}$  и  $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соответственно), для создания высокочастотных источников УКИ с длительностью менее 10 пс при мощности накачки менее 150 мВт.

**Показано**, что комбинация активных композитных волокон и насыщающегося поглотителя на основе ОУНТ обеспечивает самозапуск и стабильность генерации при высоком отношении сигнал/шум ( $>70 \text{ дБ}$ ).

**Показано**, что использование композитного волокна с высокой концентрацией активных ионов и насыщающегося поглотителя на основе углеродных нанотрубок позволяет реализовать стабильную генерацию ультракоротких импульсов длительностью менее 5 пикосекунд при частотах следования до 0,48 ГГц.

**Экспериментально продемонстрирована** генерация ультракоротких импульсов в коротких линейных и кольцевых волоконных резонаторах длиной менее 0,7 м, включая режим гармонической синхронизации мод с частотой следования импульсов до 968 МГц в лазерах на основе композитного волокна. Полученные результаты подтверждены измерениями временных, спектральных и радиочастотных характеристик.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**Результаты** исследования оптических свойств композитного волокна и насыщающегося поглотителя на основе ОУНТ позволяют проводить теоретическое моделирование и проектирование лазерных систем, создаваемых на их основе



**Улучшены** алгоритмы расчета с применением численных методов моделирования генерации УКИ в коротких резонаторах с учетом оптических параметров композитных волокон и пленок одностенных углеродных нанотрубок.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**Разработанные** лазеры и методики их построения могут быть внедрены в лабораторные и промышленные измерительные комплексы.

**Определены** пределы и перспективы применения композитных волокон и ОУНТ в компактных волоконных лазерных системах.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:**

**Экспериментально продемонстрирована** высокочастотная генерация УКИ в компактных полностью волоконных лазерах. Данные источники реализованы за счет совместного использования уникальных композитных волокон с повышенной концентрацией активных ионов эрбия (более  $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) и пленок ОУНТ.

**Впервые** в лазерах с длиной резонатора менее 0,5 м, созданных на базе композитного волокна, легированного комплексом ионов Er/Yb (концентрации ионов Er и Yb  $1,1 \cdot 10^{20}$  и  $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , соответственно), была реализована непрерывная перестройка параметров выходных импульсов, без срыва режима генерации, за счет изменения мощности накачки.

**Предложен** подход к увеличению основной частоты повторения УКИ в лазерах с кольцевыми резонаторами за счет совместного использования гибридных оптоволоконных компонент и композитных активных волокон.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что** все выводы и результаты диссертации подтверждены экспериментальной воспроизводимостью данных, использованием современного измерительного оборудования и сопоставлением полученных результатов с опубликованными данными по аналогичным системам. Проведено численное моделирование процессов генерации УКИ, результаты которого согласуются с экспериментальными данными. Применены современные методы обработки данных и математического анализа.

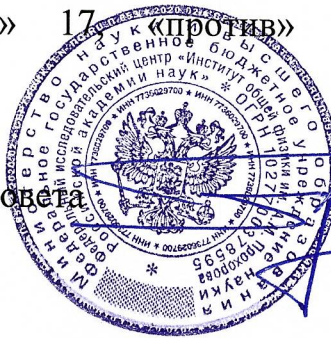
**Личный вклад** соискателя заключается в постановке задач, разработке методов исследования, проведении экспериментов, обработке, анализе полученных данных и подготовке основных публикаций. Все основные результаты, представленные в работе, получены автором лично, либо при его непосредственном участии.

Соискатель Зверев Андрей Дмитриевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, замечания ведущей организации и оппонентов, согласился с некоторыми замечаниями и привёл собственную аргументацию.

На заседании 27 октября 2025 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития лазерной физики и заключающейся в создании новых технических решений и разработку методов реализации на основе композитных волокон компактных и стабильных высокочастотных источников ультракоротких импульсов присудить Звереву Андрею Дмитриевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 10 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: «за» 17, «против» 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета  
академик РАН



Гарнов  
Сергей  
Владимирович

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Осадчий  
Александр  
Валентинович

28 октября 2025 года