

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Воропаева Василия Сергеевича на диссертацию Зверева Андрея Дмитриевича «Волоконные источники ультракоротких импульсов с гигагерцовой и субгигагерцовой частотами следования импульсов в спектральном диапазоне 1.5-1.6 мкм», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Актуальность

Высокочастотные источники ультракоротких импульсов (УКИ) представляют собой один из наиболее активно развивающихся инструментов современной фотоники, находящий широкое применение в телекоммуникациях, метрологии, биомедицинской диагностике и фундаментальных исследованиях в области нелинейной оптики. В частности, в спектральной области 1.5–1.6 мкм, соответствующей окну минимальных потерь в кварцевых оптических волокнах, такие источники обладают особой значимостью для волоконных систем передачи данных, распределённых сенсорных сетей и технологий когерентной томографии. Высокая частота следования импульсов в гигагерцовом и субгигагерцовом диапазонах открывает возможность формирования оптических гребёнок частот с узким межмодовым интервалом, что делает данные источники востребованными в задачах высокоточной спектроскопии, оптической метрологии и синхронизации. Кроме того, использование волоконной архитектуры обеспечивает компактность, технологическую простоту интеграции и устойчивость к внешним возмущающим факторам, что существенно повышает прикладной потенциал таких систем. Особую актуальность приобретает разработка источников, обладающих высокой стабильностью параметров генерации и низким уровнем шума. Достижение указанных свойств является необходимым условием для практического внедрения волоконных источников ультракоротких импульсов в прецизионные измерительные комплексы, системы передачи информации нового поколения и биофотонные технологии.

Научная новизна

В данной работе впервые продемонстрирована концепция короткого полностью волоконного лазера (длина резонатора менее 0,5 м) основанного на использовании композитного волокна и аэрозольно-синтезированных плёнок одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) с возможностью управления временными и спектральными параметрами выходного излучения. В данной системе удалось реализовать стабильный самозапуск генерации ультракоротких импульсов с основной частотой повторения 489 МГц и отношением сигнала к шуму более 60 дБ.

Практическая ценность

Можно выделить следующие области возможного применения полученных результатов:

- Системы волоконно-оптической связи и телекоммуникации нового поколения – использование компактных источников УКИ в диапазоне 1.5–1.6 мкм позволяет повысить скорость передачи информации и устойчивость каналов связи.
- Оптическая метрология и прецизионные системы синхронизации – высокая частота следования импульсов и низкий уровень шумов создают предпосылки для высокоточных измерений времени и частоты.
- Биомедицинская визуализация и диагностика – применение источников в оптической когерентной томографии, флуоресцентной микроскопии и других биофотонных методах позволяет получать изображения с высоким пространственным и временным разрешением.
- Распределённые волоконно-оптические сенсорные сети – компактные и стабильные лазеры могут использоваться для мониторинга температуры, механических деформаций и химического состава среды на больших расстояниях.

Содержание работы

Диссертация Зверева А.Д. включает 117 страниц основного текста и состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 123 источника. Представленные материалы сопровождаются 72 рисунками и 10 таблицами

Во введении раскрывается актуальность выбранной тематики, формулируются цель и задачи исследования. Здесь же представлены сведения, отражающие научную новизну и практическую значимость работы, перечислены выносимые на защиту положения, а также сведения об апробации результатов.

В первой главе рассматриваются и анализируются современные работы, посвященные высокочастотным источникам ультракоротких импульсов.

Во второй главе диссертации продемонстрированы исследования позволяющие утверждать возможность совместного использования высоколегированного композитного волокна малой длины (до 10 см) и ОУИГ для реализации компактных источников ультракоротких импульсов.

Третья глава демонстрирует перспективность композитных волокон для реализации коротких лазеров с линейными резонаторами. Показана возможность увеличения основной частоты повторения УКИ с 14 до 150 МГц за счет использования композитного волокна с концентрацией ионов Er $1,6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и трех слоев ОУИГ (толщина $\sim 180 \text{ нм}$).

В четвертой главе показана возможность генерации УКИ с частотами следования в субгигагерцовом и гигагерцовом диапазонах в лазерах с

кольцевыми резонаторами. За счет реализации режима гармонической синхронизации была получена стабильная генерация с частотой импульсов более 20 ГГц. Так же было проведено моделирование процесса генерации лазерной системы на основе композитного волокна, одного слоя ОУПГ и гибридного волоконного элемента, выполняющего роль оптического мультиплексора, изолятора и делителя. В результате моделирования была продемонстрирована возможность управления спектральными и временными параметрами импульсов за счет изменения мощности накачки. Данные предположения были подтверждены экспериментально в кольцевом УКИ лазере с основной частотой импульсов 484 МГц.

В заключении перечисляются основные результаты работы и описываются перспективы дальнейшей разработки темы.

Достоверность результатов

Высокая степень достоверности научных результатов достигается за счет использования корректной методологии, включающей апробированные методики расчетов и современное программное обеспечение для математического моделирования. Экспериментальная часть исследования выполнена с применением высокоточного измерительного оборудования, что гарантирует качество эмпирических данных.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Выводы и научные положения, сформулированные в диссертации, являются хорошо обоснованными и логически вытекают из проведенного теоретического и экспериментального исследования. Рекомендации по практическому использованию разработанных лазерных систем основаны на детальном анализе их характеристик и соответствуют современным тенденциям в области фотоники и лазерной физики. Дополнительным аргументом в пользу обоснованности выводов является их успешная апробация в научной среде, выраженная в 18 публикациях (включая 6 статей в изданиях, рецензируемых в WoS и ВАР).

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Несмотря на общую положительную оценку диссертации к работе имеется несколько **замечаний**:

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.

Диссертация Зверева Андрея Дмитриевича на тему «Волоконные источники ультракоротких импульсов с гигагерцовой и субгигагерцовой частотами следования импульсов в спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм» представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, выполненное на высоком уровне как с научной, так и с инженерной точек зрения. Работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к

диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, в соответствии с действующим Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (в редакции от 16 октября 2024 года). Считаю, что Зверев Андрей Дмитриевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Согласие на обработку персональных данных

Я, Воропаев Василий Сергеевич, согласен на обработку, размещение и хранение моих персональных данных, связанную с деятельностью диссертационного совета 24.1.223.03

Официальный оппонент:

Воропаев Василий Сергеевич, кандидат технических наук 2.2.6. «Оптические и оптико-электронные приборы», младший научный сотрудник лаборатории инфракрасных лазерных систем, ИОЦ "Фотоника и ИК-техника", МГТУ им. Н.Э. Баумана.

105005, Москва, 2-я Бауманская ул.,

д. 5, с. 1,

тел: +7 916 460 1695

e-mail: vasek@aport.ru

Младший научный сотрудник

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Кандидат технических наук

_____/ Воропаев В.С.
30.09.2025 (дата)

«ВЕРНО»

Подпись Воропаева В.С. заверяю

ВЕДУЩИЙ СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ЛАПШИНА В.В.

ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ
ЕДИНОЙ ПРИЁМНОЙ
УКСА
МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

30 СЕН 2025