

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертационную работу Пушкина Андрея Владимировича
«Генерация и усиление лазерных импульсов в среднем ИК диапазоне
в эрбьевых кристаллах и халькогенидах, легированных ионами железа»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Актуальность темы исследования.

Разработка и исследование новых мощных непрерывных и импульсных лазерных источников в среднем ИК диапазоне представляется актуальной проблемой. В среднем ИК диапазоне находится огромное количество спектров поглощения неорганических и органических молекул, что делает его особенно привлекательным для научных задач и при разработке систем дистанционного зондирования и диагностики, биомедицины, спектроскопии и других приложений. Интерес к наносекундным 3-микронным лазерам обусловлен как возможностью их использования для накачки лазерных усилителей и генераторов в среднем ИК диапазоне (4-6 мкм) на основе халькогенидов, легированных ионами железа, а также параметрических лазерных источников, так и непосредственно для исследования свойств сильно поглощающих сред, в частности воды и биообъектов. Диссертационная работа А.В. Пушкина посвящена разработке и исследованию схем генерации 3-микронных наносекундных лазерных импульсов в эрбьевых кристаллах с высокой пиковой (МВт) и средней (~Вт) мощностью, исследованию особенностей генерации в Fe:ZnSe лазере в режимах непрерывной генерации и пассивной синхронизации мод и исследованию широкополосного усиления лазерных импульсов среднего ИК диапазона в кристалле Fe:CdSe, что является актуальными задачами.

Общая характеристика и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Общий объем составляет 114 страниц, включая 56 рисунков и 5 таблиц. Список литературы содержит 142 источника.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, ставятся задачи, формулируется научная и практическая значимость, приводятся сведения о методологии диссертационного исследования, формулируются научная новизна и защищаемые положения, обосновывается достоверность результатов, приводятся сведения об апробации исследования, указывается личный вклад автора, приводятся данные об объеме и структуре диссертации, дается краткое содержание работы и список статей автора по теме диссертации.

В первой главе диссертации представлены результаты разработок и исследований лазеров на основе различных легированных ионами эрбия кристаллов с диодной и ламповой накачкой, генерирующих мощные наносекундные импульсы в диапазоне длин волн около 3 мкм. А.В. Пушкин реализовал различные методы модуляции добротности, включая акустооптическую (с использованием новых специально разработанных модуляторов на основе кристаллов KYW и KGW), электрооптическую, а также оптико-механическую (на вращающемся зеркале). Также в данной главе экспериментально исследуется тепловая линза и показано, что ее компенсация позволяет увеличить среднюю и пиковую мощность выходного лазерного излучения. Более того, в данной главе продемонстрированы применения наносекундных лазерных импульсов на длинах волн около 3 мкм в задачах лазерно-индукционных процессов жидкостного травления материалов и прямого переноса для задач биопечати, показывающих практическую значимость разработанных лазеров для высокотехнологичных приложений.

Вторая глава посвящена разработке и исследованию лазера на основе монокристалла Fe:ZnSe (с прямой оптической накачкой с помощью волоконного лазера Er:ZBLAN), работающего как в режиме непрерывной генерации, так и в режиме генерации ультракоротких периодических импульсов за счет синхронизации мод при

использовании графена в качестве насыщающегося поглотителя. Также в данной главе исследованы температурные зависимости важных лазерных характеристик (пороговой мощности накачки, выходной мощности, поглощения излучения накачки активным элементом, центральной длины волны генерации).

В третьей главе исследуется широкополосное лазерное усиление импульсов на центральных длинах волн около 5 мкм в кристалле Fe:CdSe. А.В. Пушкин реализовал и исследовал различные схемы, продемонстрировал усиление chirпированных импульсов. После компрессии импульсов их длительность составила около ста фс, а пиковая мощностью составила несколько ГВт.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в результате выполнения диссертационной работы.

Среди основных результатов диссертации следует отметить следующие.

- *Впервые* продемонстрировано использование акустооптических модуляторов на основе кристаллов KYW и KGW для генерации наносекундных импульсов с энергией десятки мДж в 3х-микронных твердотельных лазерах. В лазере на кристалле Cr:Er:YSGG достигнута генерация импульсов длительностью 75 нс с энергией 29 мДж при частоте повторения 5 Гц.
- Экспериментально показано, что компенсация тепловой линзы позволяет значительно увеличить энергию выходных импульсов в 3х-микронных твердотельных лазерах (в кристалле Cr:Er:YSGG с 10 мДж до 23 мДж при частоте повторения 10 Гц).
- *Впервые* реализована электрооптическая модуляция добротности в лазере на кристалле Er:YLF с мегаваттным уровнем пиковой мощности. Продемонстрированы импульсы на длине волны 2,67 мкм с энергией 82 мДж, длительностью 13 нс.
- *Впервые* достигнута непрерывная лазерная генерация в кристалле Fe:ZnSe с выходной мощностью 2,1 Вт на длине волны 4,2 мкм с прямой оптической накачкой с помощью волоконного лазера Er:ZBLAN на длине волны 2,8 мкм.
- *Впервые* продемонстрирована генерация ультракоротких импульсов в лазере на кристалле Fe:ZnSe. Пассивная синхронизация мод осуществлена с помощью насыщающегося поглотителя – графена. Получены импульсы на центральной длине волны 4,4 мкм со средней мощностью 415 мВт при частоте повторения 100 МГц. Длительность импульсов, измеренная методом FROG, составила 640 фс.
- *Впервые* исследовано усиление широкополосных лазерных импульсов в среднем ИК диапазоне (~4-6 мкм) в кристалле Fe:CdSe. В многопроходной схеме усиления достигнута энергия 1,1 мДж для растянутого импульса при спектральной ширине спектра 320 нм. После компрессии импульса его длительность, измеренная методом XFROG, составила 134 фс, а пиковая мощность достигла 5 ГВт.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием надежных экспериментальных методик, воспроизводимостью экспериментальных данных, применением современного специализированного оборудования. Экспериментальные результаты согласуются с результатами численных расчетов и оценок. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в ведущих международных журналах, обсуждались на международных тематических конференциях. Статьи, послужившие основой диссертации, имеют большое количество цитирований, что свидетельствует об их признании в мировом научном сообществе. Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе А.В. Пушкина, являются обоснованными.

Практическая значимость диссертации.

Результаты, посвященные разработке и исследованию 3х-микронных лазеров с управляемыми параметрами, могут быть использованы для самостоятельных приложений,

в частности, воздействия на вещество (воду и биообъекты) в режиме резонансного поглощения для лазерного жидкостного микроструктурирования прозрачных материалов и биопечати. Кроме того, 3х-микронные лазеры могут быть использованы в качестве накачки лазеров в диапазоне 4-6 мкм на основе халькогенидов, легированных железом. Лазерные генераторы и усилители в среднем ИК диапазоне 4-6 мкм могут быть использованы для широкого круга фундаментальных задач в области нелинейной оптики, взаимодействия света с веществом и др., а также важных приложений – дистанционного зондирования, спектроскопии и т.д.

Публикации, отражающие основное содержание диссертации.

По материалам диссертации опубликовано 8 статей в рецензируемых международных научных журналах; во всех статьях А.В. Пушкин является первым автором. Особо следует отметить, что 5 статей опубликованы в высокорейтинговом журнале Optics Letters, что свидетельствует о соответствии работы мировому уровню.

Характеризуя диссертацию А.В. Пушкина, с удовольствием отмечу системный подход автора, полноту проведенного обзора современного состояния исследований, четкость и обоснованность поставленных целей, хорошую структурированность работы, ясность изложения материала. *Автореферат* диссертации с необходимой полнотой отражает содержание исследования. Автором выполнен очень большой объем экспериментальных исследований, в результате чего получены новые практически значимые результаты. Для объяснения, верификации и более глубокого понимания исследуемых процессов в работе применялись численные расчеты, что также является ее достоинством. Таким образом, А.В. Пушкин проявил себя как высококвалифицированный специалист, обладающий необходимыми навыками для комплексного проведения научных исследований мирового уровня.

Вопросы и замечания:

- В эрбьевых кристаллах при генерации трехмикронного излучения на переходе $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ наблюдается значительная термализация накачки, обусловленная как большим дефектом кванта, так и другими источниками, что обсуждается в рамках первой главы. Известно, что тепловыделение приводит к формированию тепловой линзы и деполяризации излучения, что ограничивает энергию выходных импульсов и качество пучка. В работе автор демонстрирует эффективную компенсацию тепловой линзы, но деполяризация не обсуждается. Наблюдалась ли в экспериментах деполяризация излучения и влияла ли она на параметры генерируемых импульсов? Также в связи с этим возникает вопрос, имеют ли перспективы схемы каскадной генерации на двух последовательных переходах $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ и $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, в первую очередь с целью уменьшения тепловыделения, а также с целью увеличения частоты повторения импульсов за счет более быстрого опустошения уровня $^4I_{13/2}$?
- Каковы перспективы увеличения мощности непрерывной генерации в кристалле Fe:ZnSe за счет оптимизации схемы и лазера накачки?
- В главе 2 приводятся результаты измерения субпикосекундных импульсов методом FROG. Известно, что данный метод, основанный на генерации второй гармоники, обладает неопределенностью в выборе направления временной оси и знака фазы. Применялись ли в работе дополнительные измерения или использовались какие-либо соображения для устранения данной неоднозначности?

Следует подчеркнуть, что поставленные вопросы не влияют на общую положительную оценку работы и не умаляют значимости диссертационного исследования.

Заключение.

Диссертация «Генерация и усиление лазерных импульсов в среднем ИК диапазоне в эрбьевых кристаллах и халькогенидах, легированных ионами железа» отвечает всем требованиям, предъявляемым Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19 - «лазерная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Пушкин Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

Анашкина Елена Александровна,
доктор физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»,
старший научный сотрудник лаборатории экстремальной нелинейной оптики
Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.
Тел. +7 (831) 418-90-46, эл.почта: elena.anashkina@ipfran.ru

Анашкина Е.А.
« 09 » декабря 2022

Подпись Анашкиной Е.А. удостоверяю
Ученый секретарь учреждения
к.ф.-м.н.

Корюкин И.В.