

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Потёмкина Фёдора Викторовича «Широкодиапазонные фемтосекундные ИК лазерные источники нового поколения и нелинейные преобразования в конденсированных и плотных газовых средах», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. — Лазерная физика.

Диссертационная работа Потёмкина Ф.В. посвящена созданию и исследованию лазерных систем ближнего и среднего ИК-диапазонов, генерирующих ультракороткие импульсы фемтосекундной длительности с высокой пиковой мощностью (≥ 1 ГВт), и применению этих лазерных систем для исследования нелинейного взаимодействия высокоинтенсивного (≥ 1 ТВт/см²) лазерного излучения с конденсированными и газовыми средами. Разработанные автором методы генерации мощного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов на основе активных лазерных сред хром-форстерита и селенида цинка, легированного железом, не имеют аналогов в мире. Нелинейное взаимодействие этого излучения с конденсированными и плотными газовыми средами способствовало развитию автором методов управления объемным энерговыделением при воздействии мощного лазерного излучения на конденсированную среду в области её прозрачности в целях создания лазерно-индуцированного состояния вещества с плотностью энергии $\sim 10^3$ - 10^4 Дж/см³, обеспечило расширение спектра разработанных лазерных систем в УФ и ТГц диапазоны, что создает основу для создания на отечественной элементной базе широкодиапазонных фемтосекундных лазерных источников нового поколения. Таким образом, научная тематика диссертации, направленная на решение важных задач создания новых мощных фемтосекундных ИК лазерных систем и на их применения для нелинейного взаимодействия лазерного излучения с веществом, **является безусловно актуальной** и соответствует современным приоритетам научно-технологического развития Российской Федерации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка опубликованных статей по материалам диссертации, благодарностей и списка литературы. Работа изложена на 327 страницах, включает 148 рисунков, 12 таблиц и 424 библиографические ссылки на 26 страницах.

Во введении содержится подтверждение актуальности и степени разработанности выбранной темы диссертационного исследования, обозначены предмет и объект исследования, сформулированы цели и задачи, описана научная новизна и практическая значимость работы, приведены защищаемые положения и сведения об апробации результатов работы и о публикациях автора.

В первой главе представлен обзор современных способов генерации мощного импульсного излучения фемтосекундной длительности в ближнем и среднем ИК диапазонах на основе лазерных сред и параметрического преобразования. Обсуждаются усилительные свойства хром-форстеритовой лазерной среды, в том числе в зависимости от уровня ее легирования. В

результате проведенного исследования определена оптимальная плотность энергии накачки, обеспечивающая максимальный коэффициент усиления, что позволило создать лазерную систему ближнего ИК диапазона ($\lambda=1,24$ мкм) на основе хром-форстеритовой активной среды с рекордными выходными характеристиками: мультигигаваттной (>100 ГВт) пиковой и высокой (> 1 Вт) средней мощностью. Отдельное внимание уделяется разработке эффективных методов генерации затравочного излучения суперконтинуума в ближнем и среднем ИК диапазонах при филаментации ИК излучения в конденсированной среде и использованию широкополосного параметрического усиления в нелинейно-оптическом кристалле в условиях невырожденного по частоте группового синхронизма. Последующее использование этого излучения в многокаскадных схемах параметрического усиления на основе ряда нелинейных кристаллов, позволило реализовать перестройку фемтосекундного излучения от ближнего до среднего ИК диапазона в диапазоне длин волн $\sim 1 - 8$ мкм с высокой (до 10%) эффективностью нелинейно-оптического преобразования и генерации малопериодного излучения субгигаваттной пиковой мощности.

Во второй главе приведены результаты исследования источника оптической накачки с длиной волны ~ 3 мкм и усилительных свойств халькогенидных сред, легированных ионами железа, для широкополосного излучения в среднем ИК диапазоне ($\sim 4-5$ мкм). Исследуется влияние на спектр усиления активной среды уровня легирования, метода роста и температуры, что становится определяющим фактором при выборе режима усиления для получения максимально широкого спектра усиленного импульса при сохранении энергии на уровне $\sim 10^{-3}$ Дж. Разработанные конструктивные блоки фемтосекундной лазерной системы среднего ИК диапазона – стретчер и компрессор фемтосекундных импульсов – в сочетании с блоком затравочного импульсного излучения с энергией $\sim 10^{-6}$ Дж из параметрического усилителя обеспечили снижение влияния паразитной генерации и позволили достигнуть выходной пиковой мощности на уровне ≥ 20 ГВт. Рассматриваются также возможности расширения спектра источника на Fe:ZnSe (4-5 мкм) в область больших длин волн (5-6 мкм) на основе усиления излучения в кристалле Fe:CdSe. Определена плотность энергии насыщения этой среды, реализована многопроходная схема усиления чирпированного импульса и достигнута мультигигаваттная пиковая мощность на выходе, что позволяет сделать вывод об универсальности предлагаемой концепции. В конце главы впервые демонстрируется спектральный синтез полос усиления, что обеспечивает полосу усиления, достаточную для сохранения длительности импульса ~ 50 фс в среднем ИК диапазоне на выходе такой системы без использования сложных методов нелинейной компрессии.

Третья глава содержит результаты по эффективной генерации когерентного излучения в УФ и ИК диапазонах длин волн при взаимодействии интенсивного фемтосекундного ИК лазерного излучения с газовой средой, включая бинарные смеси. Использование последних в диссертации рассматривается как наиболее перспективный способ управления нелинейными

и дисперсионными свойствами среды. Отдельное внимание в диссертации уделено влиянию длины волны лазерного излучения, давления и состава газовой смеси, условий фокусировки на эффективность генерации оптических гармоник и расширение спектра мощного фемтосекундного ИК лазерного излучения. Устанавливается определяющее влияние генерируемой плазмы на эффективность преобразования высокоинтенсивного фемтосекундного излучения ближнего ИК диапазона в УФ диапазон. Показано, что использование бинарной газовой смеси, состоящей из инертного и молекулярного газа с близкой по отношению к спектру лазерного излучения полосой поглощения, способствует улучшению условий фазового согласования и увеличению эффективности преобразования излучения среднего ИК диапазона в оптические гармоники. Такой нелинейный объект оказывается эффективным при управлении спектрально-временными свойствами мощного излучения в среднем ИК диапазоне, что подтверждается равномерным расширением спектра импульса относительно центральной длины волны с последующей временной компрессией до четырех циклов поля. Осуществлено преобразование излучения ИК диапазона в органических кристаллах, позволяющих расширить спектр излучения созданных лазерных источников ближнего и среднего ИК диапазонов в более длинноволновый. Проведённые исследования доказывают возможность создания широкодиапазонного источника (от УФ по ТГц) когерентного излучения на основе разработанных автором лазерных систем ближнего и среднего ИК диапазона.

В четвертой главе представлены результаты по созданию и диагностике состояния вещества с плотностью энергии $\sim 10^3\text{-}10^4 \text{ Дж/см}^3$, инициируемого при воздействии острогофокусированного высокоинтенсивного ($> 1 \text{ ТВт/см}^2$) фемтосекундного ИК лазерного излучения на конденсированную среду. Продемонстрированы новые методики управления объемным энергокладом, основанные на использовании двухцветной пары острогофокусированных фемтосекундных лазерных импульсов видимого и среднего ИК диапазона. На основе методики генерации несинхронной третьей гармоники в основе время-разрешенной диагностики лазерно-индуцированного состояния вещества с относительно высокой плотностью энергии в диэлектрике и полупроводнике (на примере фторида магния и кремния) на пикосекундной временной шкале показано наличие процессов возбуждения и релаксации когерентных фононов, скачкообразный временной спектр которых позволяет определить каскад фазовых переходов.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Автор выполнил большой объем исследований, в результате которых были созданы мощные фемтосекундные лазерные системы, генерирующие как в ближнем и среднем ИК диапазонах, так и в УФ и ТГц диапазонах за счет нелинейного преобразования ИК излучения в плотных газовых и конденсированных средах, применил излучение этих лазерных систем для создания состояния вещества с относительно высокой плотностью энергии. Все

исследования, представленные в диссертационной работе, проводились на основе разработанных оригинальных экспериментальных схем. Основные положения диссертации прошли апробацию в научной периодической печати и на конференциях. Результаты исследований, вошедших в работу, опубликованы в 70 печатных работах, в том числе 54 статьях, опубликованных в высокорейтинговых журналах, и 1 патенте, а также докладывались на международных научных конференциях. Положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации обоснованы высоким научно-техническим уровнем экспериментов, проведенных автором, и глубокими знаниями диссертанта в области современной лазерной физики, нелинейной оптики и взаимодействия лазерного излучения с веществом. Таким образом, **представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации надежно обоснованы.**

К наиболее важным и значимым результатам, определяющим научную новизну диссертационной работы, на мой взгляд, можно отнести следующие результаты.

1. На основе кристаллов хром-форстерита создана и исследована высокоэффективная лазерная система, генерирующая на длине волны 1,24 мкм импульсы излучения фемтосекундной длительности с мультигигаваттным (>100 ГВт) уровнем пиковой мощности, позволившим разработать высокоэффективные (до 10%) схемы параметрического преобразования частоты лазерного излучения в область ближнего и среднего ИК диапазонов ($\sim 1-8$ мкм) с достижением гигаваттного и субгигаваттного уровня мощности, соответственно.
2. На основе халькогенидных активных сред, легированных ионами железа, создана и исследована лазерная система, генерирующая фемтосекундные импульсы излучения с пиковой мощностью более 20 ГВт в средней ИК области спектра в диапазоне длин волн 4-5 мкм
3. Предложены, обоснованы и реализованы нелинейно-оптические методы управления спектрально-временными свойствами мощного фемтосекундного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов в конденсированных и плотных газовых средах, позволившие создать новые источники когерентного излучения сверхкороткой длительности в широком диапазоне длин волн (от УФ до ТГц).
4. Разработан комплекс методов для исследования взаимодействия остророфокусированного высокоинтенсивного (до 10^{14} Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения с прозрачной конденсированной средой, включающий в себя экспериментальные методы диагностики плазмы, эволюции состояния вещества с плотностью энергии $\sim 10^3-10^4$ Дж/см³ и фазовых переходов.

Результаты экспериментальных исследований были получены на современном оборудовании и находятся в согласии с расчетами. При выполнении экспериментальной части диссертационной работы отдельное внимание было уделено повторяемости регистрируемых эффектов, что

обеспечило необходимый уровень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научная и практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью создания на их основе лазерных источников с высокой пиковой мощностью, как в ближнем, так и среднем ИК диапазоне, в том числе в области 3 мкм. Высокое (более 10^4 см^{-1}) поглощение такого излучения в воде определяет применение лазерных источников в разработке новых методов микроструктурирования материалов посредством жидкостного травления. Созданные автором уникальные фемтосекундные лазерные системы с высокой пиковой мощностью могут быть успешно использованы для изучения взаимодействия их излучения с газообразными и конденсированными средами, не рассмотренными в рамках данной диссертации. Разработанные методы локализованного воздействия на объём конденсированных сред, в том числе полупроводниковых, могут, в перспективе, привести к разработке новых подходов в современной ИК фотонике к прототипированию фотонных интегральных схем.

По диссертационной работе Ф.В. Потёмкина имеются следующие замечания:

1. В диссертации содержится большое количество исследовательского и информационного материала, что налагает требования на ее четкое структурирование. К сожалению, последнее выполняется не всегда.

1.1. В диссертации отсутствует отдельная глава, посвященная обзору литературы. Во Введении утверждается (стр.20), что каждая из оригинальных глав содержит его. Однако, в каждой главе, за исключением параграфа 1.1.1, нет подраздела, который может быть четко идентифицирован как обзор литературы. Такой подход к структурированию диссертации затрудняет восприятие информации о том, что сделано до исследований диссертанта в области его интересов.

1.2. Достаточно часто присутствует излишняя информация, уместная скорее для учебника, а не для докторской диссертации, например, изложение основополагающих принципов филаментации лазерного излучения (раздел 3.1.1. стр. 137), оценка релятивистского режима взаимодействия (Введение, стр.6), и т.п.

1.3. Иногда нарушается логика изложения. Например, на стр 38 сначала приведены выводы по многопроходному усилителю, а только потом (в следующем разделе) приводится схема и результаты расчётов/экспериментов (параграфы 1.2.4 и 1.2.5).

1.4. Отсутствует обоснование выбора именно воды в качестве источника суперконтинуума (параграф 1.3.1.3).

2. Присутствуют некорректные утверждения.

2.1. «Видно, что амплитуда усиленного импульса остается почти постоянной в диапазоне перестройки 940–800 нм» (стр 63). Однако, судя по Рис. 18а, эта амплитуда увеличивается примерно в 3 раза.

2.2. «Использование более высоко легированных кристаллов может позволить создавать источники ИК излучения в области прозрачности атмосферы 4,5–5 мкм» (стр. 118). Однако согласно Рис. 54в максимальная длина волны генерации составила только 4.45 мкм.

2.3. «На Рис. 55(а) показана зависимость коэффициента усиления слабого сигнала за проход...» (стр 119). На Рис. 55а и 56 указан логарифм (!) коэффициента усиления.

2.4. «Одной из уникальных особенностей как хром-форстеритовой системы, так и системы на основе активной среды Fe:ZnSe, является возможность изменения длительности импульса и внесения положительного или отрицательного чирпа за счет изменения расстояния между дифракционными решётками компрессоре» (стр. 239). Это утверждение относится к любой(!), а не только к исследуемой лазерной системе, использующей метод усиления чирпированных импульсов.

3. Ряд терминов либо не корректен, либо не определен.

3.1. Автор определяет термин «экстремальное состояние вещества», как вещество с «удельным энергокладом более кДж/см³» (стр.190). В диссертации удельный энергоклад находится в пределах $\sim 10^3$ - 10^4 Дж/см³. Однако, согласно В.Е.Фортову, «экстремальное состояние вещества», – это состояние с высокой плотностью энергии, а «"высокой" плотностью энергии в веществе традиционно принято считать величину, превышающую 10^4 - 10^5 Дж см⁻³», (В.Е.Фортов, Экстремальные состояния вещества на Земле и в космосе, УФН, т.179, № 6, 653-687 (2009)), т.е. выше, чем достигнутый автором энергоклад.

3.2. В тексте используется термин NA, но нигде не отмечено, что это числовая апертура. Также не поясняются термины XFROG, вакуумная интенсивность, ТГ и ПГ (надо полагать третья и пятая гармоники).

3.3. Латинское выражение «post-mortem» скорее имеет отношение к паталогоанатомии, чем к лазерной физике.

4. В определении мягкой и острой фокусировки - разнбой. На Рис. 80 острая фокусировка при $NA = 6 * 10^{-3}$, а мягкая фокусировка при $NA = 4 * 10^{-3}$. В то же время на стр. 182 понятие острой фокусировки связывается с $NA > 0,3$, а на стр. 217, рис. 111(б) мягкая фокусировка при $NA = 0,1$, а жесткая при $NA = 0,2$. Также в автореферате - острая фокусировка при $NA \sim 0,1$ (стр.26).

5. В тексте имеются многочисленные опечатки: «с малой часть хром-форстеритового излучения (стр.77), «пустоты, окруженная кольцом» (стр 239), «проведено комплексное сравнение воздействия импульсов разной длительности (от 0,1–0,2 фс (!) до 1,2 пс), (стр 268, вывод 8), и др.

Приведенные выше замечания не умаляют научной значимости диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой систематическое научное исследование проблем создания источников лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов с высокой пиковой мощностью, проблем расширения спектра излучения созданных лазерных систем в УФ и ТГц диапазоны методами нелинейной оптики и

применения таких систем для формирования вещества с относительно высокой плотностью энергии. Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяют квалифицировать ее как значительное достижение в области лазерной физики, нелинейной оптики и взаимодействия лазерного излучения с веществом. Содержание диссертации правильно отражено в автореферате.

Диссертация Потемкина Ф.А. отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Диссертация является законченным научным исследованием и по своему содержанию соответствует специальности 1.3.19.— лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Потёмкин Фёдор Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

Руководитель Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор

Ионин Андрей Алексеевич
28 августа 2023 г.

Специальность, по которой защищена диссертация оппонента:

01.04.21 –Лазерная физика

Контактные данные:

тел.: +7(916) 195 5341, e-mail: ioninaa@lebedev.ru

Адрес места работы:

119991, г. Москва, Ленинский пр., д.53

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Отделение квантовой радиофизики

Подпись руководителя Отделения квантовой радиофизики им.Н.Г.Басова
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

А.А. Ионина удостоверяю:

Ученый секретарь

Физического института им.П.Н.Лебедева РАН



А.В. Колобов
28 августа 2023 г.