

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Гарнова Сергея Владимировича, на диссертацию **Потемкина Федора Викторовича «Широкодиапазонные фемтосекундные ИК лазерные источники нового поколения и нелинейные преобразования в конденсированных и плотных газовых средах»**, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Представленная к защите диссертационная работа Ф.В. Потёмкина посвящена разработке и созданию новых источников мощного фемтосекундного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов, с возможностью расширения их спектральной области на УФ и ТГц диапазоны, и проведение с их помощью экспериментальных исследований лазерно-индуцированных процессов в прозрачных конденсированных средах (диэлектриках и полупроводниках), в том числе с целью разработки новых способов объёмной микрообработки материалов и изучения фазовых переходов, инициируемых в микрообъемах среды.

Актуальность диссертации – как самого выбора направления исследований, так и полученных автором научных результатов, не вызывает сомнения. Она определяется уже тем обстоятельством, что до последнего времени в среднем ИК диапазоне длин волн оставались практически не изученными лазерно-индуцированные процессы, отвечающие за структурную модификацию материалов и приводящие к необратимому изменению их свойств вплоть до разрушения. С созданием в последние годы мощных ИК лазерных систем, эти исследования приобретают особую, в том числе и **практическую значимость**.

Диссертация, состоящая из введения, четырёх глав, заключения, благодарностей и списка литературы, изложена на 327 страницах, включая 148 рисунков, 12 таблиц и 424 библиографические ссылки. Автореферат

диссертации правильно отражает ее содержание и соответствует тексту диссертации.

В первой главе диссертации автором приведен обзор существующих лазерных систем, генерирующих мощное излучение в ближнем и среднем ИК диапазонах. Далее изложены результаты проведённых в работе исследований усилительных и термооптических свойств кристалла хром-форстерита, ставшие основой для разработки лазерной системы, работающей в ближнем ИК диапазоне с высокой пиковой (более 10 ГВт) и средней мощностью. Для расширения спектрального диапазона лазерной генерации в средний ИК диапазон предложены эффективные (до 10%) экспериментальные схемы параметрического усиления на основе полупроводниковых кристаллов тиогаллата серебра и тиогаллата лития, что позволяет достичь в ближнем и среднем ИК диапазонах гигаваттной импульсной мощности.

Во второй главе диссертации автором приведены оригинальные экспериментальные результаты по генерации лазерного излучения среднего ИК диапазона на основе лазерного усиления излучения параметрического генератора в халькогенидных активных кристаллах, легированных ионами железа. Подробно рассматривается влияние температуры, уровня легирования, технологии роста на усилительные свойства лазерной среды Fe:ZnSe. В результате проведенных исследований создана лазерная система среднего ИК диапазона мультигигаваттной (более 20 ГВт) пиковой мощности состоящая из оптического параметрического усилителя, стретчера, многопроходного лазерного усилителя и компрессора фемтосекундных импульсов.

В третьей главе диссертации рассмотрены проведенные экспериментальные исследования по повышению эффективности преобразования интенсивного фемтосекундного ИК лазерного излучения в гармоники (вплоть до 11-ой, т.е. вплоть до УФ!) и в терагерцевый диапазон, и по разработке методов спектрально-временного управления характеристиками лазерных импульсов в ближнем и среднем ИК диапазонах.

Делается вывод, что микроплазма субкритической плотности приводит к увеличению эффективности преобразования ИК лазерного излучения в третью и пятую оптические гармоники за счёт улучшения условий фазового согласования, а использование бинарной газовой смеси, в которой один из газов (инертный газ) отвечает за нелинейность, а другой (молекулярный газ) за фазовое согласование, приводит к увеличению эффективности преобразования в оптические гармоники интенсивного излучения среднего ИК диапазона ($\lambda=4,6$ мкм). В диссертации показано, что использование бинарной газовой смеси обеспечивает эффективное спектрально-временное управление характеристиками импульсов в среднем ИК диапазоне, что позволяет, сохраняя миллидюймовый уровень энергии, значительно сократить длительность излучаемого импульса.

Полученное в работе эффективное (до 2%) преобразование ИК лазерного излучения в терагерцевое излучение ($\sim 0,1\text{-}5$ ТГц) реализовано методом оптического выпрямления мощного излучения ближнего ИК диапазона ($\lambda=1,24$ мкм) в органических кристаллах (DAST, DSTMS, BNA, OH1).

Таким образом, можно сделать вывод, что автором на основе рассмотренного в первых двух главах диссертации двухволнового источника мощного фемтосекундного ИК лазерного излучения, разработан и создан не имеющий аналогов широкодиапазонный (от УФ до ТГц) источник когерентного излучения ультракороткой длительности.

В четвертой главе диссертации рассмотрены вопросы взаимодействия острофокусированного ($NA>0,3$) фемтосекундного ИК лазерного излучения с прозрачными конденсированными средами. Обсуждаются нелинейные процессы генерации электрон-дырочной плазмы, возбуждения когерентных фононов, формирования лазерно-индукционных фазовых микромодификаций вещества. Продемонстрировано, что согласованное воздействие двух острофокусированных фемтосекундных лазерных

импульсов с разными длинами волн позволяет управлять объемным энерговкладом (вплоть до 10 кДж/см³).

Для исследования динамики когерентных фононов в диссертации использовалась нелинейно-оптическая методика накачка-зондирование с регистрацией третьей гармоники зондирующего импульса. В результате, впервые показано, что временной спектр когерентных фононов при их возбуждении в диэлектрике и полупроводнике (на примере фторида магния и кремния) позволяет зарегистрировать каскад фазовых переходов.

Выводы и положения, сформулированные в диссертации, **в целом обоснованы**. Результаты экспериментальных исследований получены на современном оборудовании и находятся в согласии с проведенными расчётами, что свидетельствует об их достоверности. Результаты выполненных работ неоднократно докладывались на международных научных конференциях, опубликованы в 70 печатных изданиях, в том числе в 54 статьях, опубликованных в высокорейтинговых журналах, и в 1 патенте.

Полученные результаты обладают **научной новизной**. Разработаны эффективные схемы генерации фемтосекундного лазерного излучения в ближнем и среднем ИК диапазонах, основанные на параметрическом и лазерном усилении, в том числе на основе семейства лазерных кристаллов халькогенидов, легированных ионами железа. Это позволило создать уникальный двухволновой источник мультигигаваттных (более 20 ГВт) ИК лазерных импульсов. Показано, что использование бинарных газовых смесей в качестве перспективного нелинейно-оптического объекта может повысить эффективность преобразования высокоинтенсивного (более 1 ТВт/см²) фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона в оптические гармоники. Предложены методы управления лазерно-индуцированным энерговкладом в объеме конденсированных сред в области их прозрачности с использованием двухволнового воздействия и острофокусированного фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона ($\lambda=4,6$ мкм),

что позволило управлять размерами микромодификаций в плавленом кварце и кремнии на микрометровом пространственном масштабе. Показано, что временные спектры когерентных фононов в сочетании с атомистическим расчётом позволяют выявить фазовые переходы при их лазерном возбуждении в кристаллических средах (на примере фторида магния и кремния).

Замечания к диссертационной работе Ф.В. Потёмкина «Широкодиапазонные фемтосекундные ИК лазерные источники нового поколения и нелинейные преобразования в конденсированных и плотных газовых средах»:

1. Следует обратить внимание на некоторую небрежность автора в представлении своих результатов. Так, предваряя цикл своих работ по генерации ТГц-излучения, автор на рис.76(а), стр.159, приводит корреляционную функцию первого порядка характеризующую длительность ТГц импульса, но не говорит о том, как экспериментально она была получена. Там же, в описании рис.76(б), где приведены спектры импульсов, автор пишет, что «Регистрация спектра ТГц излучения осуществлялась с помощью схемы интерферометра Майкельсона», а двумя строками ниже, что на этом рисунке изображен «спектр ТГц излучения, полученный на основе преобразования Фурье.».
2. На стр.160 автор говорит, что в экспериментах по генерации ТГц излучения был получен «...пучок в перетяжке диаметром 330 мкм по уровню $1/e^2$ по интенсивности, что свидетельствует о возможности достижения электрического поля на уровне 15 МВ/см в перетяжке пучка при использовании полной (70 мкДж) энергии ТГц импульса.» Такой важный результат, несомненно, заслуживает особого внимания и было бы целесообразно более подробно остановиться на измерениях временной структуры импульса, а, следовательно, и на возможности действительного

достижения столь высокого ТГц поля. (Да и с энергией импульсов следовало бы уточнить: почему на рис.76, стр.159, показана энергия почти 90 мкДж?).

3. Там же (стр.159-160), автор делает весьма смелое утверждение о временной структуре ТГц поля : «Оценка длительности одного цикла поля для ТГц излучения с центральной частотой ~3 ТГц, генерируемого в данных кристаллах, даёт значение ~330 фс, что говорит о генерации в органических кристаллах DAST и DSTMS терагерцового излучения предельно короткой длительности, близкой к одной осцилляции поля.» Такой способ оценки длительности импульса, вообще говоря, может определять его значение лишь по порядку величины.

4. В Главе 4, §4.4.2., стр.194, «Теневое фотографирование микроплазмы», автор пишет, что «...эта методика вместе с измерением геометрических размеров лазерно-индуцированной плазмы может быть применена для определения концентрации электронов плазмы». Это утверждение и связь между регистрируемым автором поглощением и вычисляемой им концентрацией электронов, скажем так, не совсем корректны и, по крайней мере, это должно быть подтверждено какими-либо подтверждениями (аналитическими соотношениями или результатами численным моделированием?), что в диссертации не приведено. Слов автора о том, что «В диссертации применялись модель Друде-Лоренца для плазмы и 1-ое приближение теории дисперсии.», на мой взгляд, недостаточно. Утверждения автора, что он экспериментально получил «...оценку на разрешение по электронной концентрации плазмы порядка $5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ » вызывает обоснованные сомнения, как и указанные им далее концентрации электронов: $1,3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. И уж совсем удивительным представляется приведенное автором на рис.109(а) значение точности определения концентрации электронов $n_e^{\max} = (5,30 \pm 0,01) \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

5. Далее в разделе §4.4.5., «Диагностика микроплазмы и объемного энерговклада с помощью оптико-акустического метода», автор приводит на стр.206, рис. 103 (а) трехмерные распределения концентрации электронов возникающих в дистиллированной воде (!), максимальные значения которых достигают $4 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (оценено мной по псевдо-цветовой диаграмме) и говорит, что «Погрешность в определении концентрации электронов плазмы ... в рамках данной методики составляет $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ». Даже в плотных газоплазменных средах связь концентрации плазмы и поглощения в ней зондирующего излучения не всегда может быть аналитически реализуема, в частности потому, что отвечающая за поглощение *частота столкновений* может варьироваться в очень широких пределах. Здесь же речь идет о воде, для которой динамические процессы генерации зарядовых состояний и их взаимодействия с излучением еще далеко не изучены.

6. В Главе 4, §4.7.3.2. стр. 251, «Численное моделирование tandemного воздействия остросфокусированных лазерных импульсов на объем плавленого кварца» автор пишет, что здесь «...будут рассмотрены вопросы, связанные с образованием плазмы и ее влиянием на распространение импульса, то есть с величиной энерговклада и его геометрией, а также влиянием длины волны излучения на процессы плазмообразования.». Удивительно, что столь серьезная заявка на саму возможность получения столь принципиально важных, фундаментальных результатов обосновывается автором в рамках применения им лишь двух простейших формул: кинетического уравнения (58) и соотношения для сечения поглощения, вытекающего из модели Друде (58). Такой подход к рассмотрению генерации лазерно-индукционной плазмы в конденсированных средах был принят лишь на заре лазерной эры и в настоящее время уже не является востребованным. Более того, автор по непонятным причинам даже четко не определяет те параметры, которые входят в эти формулы. Так характеризуя уравнение (58), автор пишет, что «... σ - сечение поглощения излучения плазмой (обратное тормозное излучение)»,

далее, что σ «описывает лавинную ионизацию с сечением, определяемым в модели Друде выражением (59)». Раскрывая члены в этом выражении, автор без всяких на то оснований и ссылок пишет, что характерное время столкновения для плавленого кварца составляет $\tau_c=1,3$ фс. Говорить о таких столь малых временах (указывая их с такой точностью!) без приведения хотя бы качественных объяснений механизмов к ним приводящим, является не корректным. И уже совсем удивительным представляются слова автора (ниже, на стр.253), что «Наилучшее согласие с экспериментальными данными получено расчетами, проведенными для значения $\tau_c = 0,5$ фс.».

7. В положениях, выносимых на защиту (п.4, стр.16), автор пишет: «Сочетание процессов генерации затравочной микроплазмы коротковолновым излучением за счет *полевой ионизации и последующего нагрева электронов* (курсивом выделено мной) микроплазмы длинноволновым лазерным излучением при использовании двухцветной пары остросфокусированных ($NA=0,5$) фемтосекундных низкоэнергетичных (\sim мкДж) лазерных импульсов обеспечивает управление объёмным энерговкладом (до уровня 10 кДж/см³) в конденсированную среду в области её прозрачности.». Оснований утверждать, что именно *полевая*, а не лавинная ионизация является доминирующим процессом начальной стадии нелинейной генерации электронов у автора нет.

8. Дополнительными замечаниями по диссертации являются следующие:

8.1. Автор часто приводит численные результаты измерений без указания соответствующих погрешностей измерений. Это в первую очередь касается измерений длительностей импульсов. Означает ли, например, что « ≈ 31 фс» (стр.170) и « 28 фс» (стр.172) измерено с точностью ± 1 фс ? И это с учетом того, что указанный на рис.84, (стр.172) метод измерения SHG FROG не обеспечивает такую точность.

8.2. Приведенные автором на стр. 187 формулы описывающие сферические aberrации линз имеют отношение к монохроматическому излучению и уже

для субпикосекундных, не говоря уже о фемтосекундных импульсах, их использование вряд ли корректно и требует разъяснений почему они приводятся в тексте диссертации.

8.3. В разделе Личный вклад автора, автор на стр.23 пишет: «Вклад автора в исследования, на результатах которых подготовлена диссертационная работа, является определяющим, это касается как постановки решаемых задач, так и основных идей, расчётов и выводов (курсивом выделено мной).» Столь сильное утверждение, вряд ли совсем корректно учитывая, что в четырех публикациях по теме диссертации вклад автора составляет 0.2, а в двух – 0.4.

Вместе с тем, указанные замечания не снижают в целом значимости представленной к защите диссертации. Диссертация **Ф.В. Потёмкина** отвечает требованиям к диссертациям, установленным МГУ им. М.В. Ломоносова и критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ им. М.В. Ломоносова. Она оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук МГУ им. М.В. Ломоносова.

Диссертация **Ф.В. Потёмкина** «Широкодиапазонные фемтосекундные ИК лазерные источники нового поколения и нелинейные преобразования в конденсированных и плотных газовых средах» является законченным научным исследованием и соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а сам соискатель **Потёмкин Фёдор Викторович** заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «лазерная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН
директор ФГБУН ФИЦ
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова

Российской академии наук».

ГАРНОВ Сергей Владимирович

«21» августа 2023 г.

Контактные данные:

тел.: , e-mail: garnov@kapella.gpi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.21 – Лазерная физика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38,

ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики им. А.М. Прохорова

Российской академии наук».

Тел.: +7 (499) 503-8734; e-mail: office@gpi.ru

Подпись С.В. Гарнова удостоверяю:

Учёный секретарь ИОФ РАН

Доктор физико-математических наук

Б.В. Глушков

«21» августа 2023 г.

