

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Бодрова Сергея Борисовича «Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения импульсного терагерцового излучения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа С.Б. Бодрова направлена на решение одной из ключевых проблем в освоении терагерцового диапазона электромагнитного спектра – созданию эффективных источников терагерцового излучения, а также на разработку методов их применения в научных и практических целях. Основное внимание в диссертации уделяется теоретическому осмыслению и развитию новых экспериментальных схем генерации терагерцового излучения высокой интенсивности, основанных на явлении оптического выпрямления (ректификации) мощных фемтосекундных лазерных импульсов в нелинейно-оптических кристаллах. Актуальность работы связана с востребованностью высокоинтенсивного терагерцового излучения для целей терагерцового ускорения заряженных частиц, манипуляции сверхкороткими электронными сгустками, управления квантовыми процессами в веществе и целого ряда других полезных приложений. Разрабатываемые в диссертации новые диагностические методы также предполагают использование в основном импульсного терагерцового излучения высокой интенсивности.

Содержание работы. Диссертация С.Б. Бодрова состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ по диссертации.

Во *введении* подробно обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цели работы, приведены выносимые на защиту основные положения, указана научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость результатов. Описаны основные методы исследования, раскрыт личный вклад автора.

В *первой главе* проведено глубокое теоретическое исследование процессов генерации волн терагерцовых частот, происходящих при распространении оптического лазерного импульса фемтосекундной длительности в пластине электрооптического (и нелинейно-оптического) кристалла. Для описания различных стадий формирования терагерцового поля введены характеристические длины. С их помощью систематизированы режимы генерации в распространенных электрооптических кристаллах (ZnTe, GaP, GaAs, LiNbO₃) при накачке на различных длинах волн, даны рекомендации по максимизации энергетической эффективности генерации. Введены модифицированные формулы Френеля и обобщенный закон Снеллиуса для описания прохождения через выходную границу кристалла «вынужденного» терагерцового поля, сопровождающего лазерный импульс.

Во *второй главе* исследована генерация терагерцового излучения лазерными импульсами со скошенным, относительно фазовых фронтов, фронтом интенсивности. На основе детальных аналитических расчетов найдена пространственная структура генерируемого терагерцового поля и его временная динамика. Для распространенной схемы генерации в кристалле LiNbO_3 , имеющем форму призмы, проведен очень полезный анализ общего случая, в котором плоскость изображения дифракционной решетки, формирующей скос лазерного импульса, не обязательно параллельна фронту интенсивности импульса. Предложена и теоретически обоснована альтернативная схема, где вместо призмы используется слой LiNbO_3 , а ввод оптической накачки и вывод терагерцового излучения осуществляются через согласующие диэлектрические призмы. Экспериментально продемонстрировано, что эффективность данной схемы сопоставима со стандартной, при этом она более перспективна для масштабирования по мощности лазерной накачки благодаря возможности использования коммерчески доступных широкоапертурных пластин LiNbO_3 . Для стандартной схемы генерации экспериментально выяснена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от температуры при различных длительностях импульса накачки и длинах взаимодействия в кристалле-призме. Определены экспериментальные условия, в которых результаты хорошо согласуются с модельными теоретическими предсказаниями. Рассмотрены возможные причины насыщения роста эффективности при увеличении мощности лазерной накачки, которые, в частности, могут объясняться эффектами самовоздействия накачки.

Третья глава посвящена разработке оригинальных оптико-терагерцовых преобразователей, принцип действия которых основан на эффекте черенковского излучения. Особенность преобразователей состоит в использовании тонкой (толщиной в несколько десятков микрон) пластинки электрооптического материала, которая служит волноводом для оптической накачки. При этом, как и в других известных схемах терагерцовой генерации черенковского типа, генерируемое излучение выводится из пластинки через ее боковую поверхность с помощью согласующей призмы. Экспериментально определены зависимости энергии и спектра генерируемого терагерцового излучения от параметров накачки. В частности, продемонстрировано увеличение эффективности оптико-терагерцовой конверсии в 3 раза (с 0,4% до 1,2%) при увеличении длины волны накачки с 0,8 до 2,1 мкм. Путем масштабирования размеров преобразователей достигнута энергия терагерцовых импульсов свыше 1 мкДж и напряженность сфокусированного поля до 500 кВ/см. Обнаружен эффект расширения спектра генерируемого в кристалле ниобата лития излучения до 3 ТГц при увеличении пиковой интенсивности импульсов лазерной накачки, который объясняется самофокусировкой лазерного излучения или результатом фотогенерации свободных носителей заряда. Показана возможность эффективной черенковской генерации даже в сильно поглощающих терагерцовое излучение кристаллах, таких как DKDP.

В *четвертой главе* исследованы возможности применения интенсивного терагерцового излучения для нелинейно-оптической диагностики материалов. На основе изучения особенностей генерации второй оптической гармоники фемтосекундных лазерных импульсов в присутствии пикосекундного терагерцового импульса разработан и экспериментально апробирован метод обнаружения оптически малоcontrastных границ в прозрачных центрo-симметричных средах. На примере кремния, халькогенидных и теллуридных стекол продемонстрирована возможность определения значений кубической нелинейной восприимчивости непрозрачных материалов путем регистрации наведенной терагерцовым полем второй оптической гармоники. Измерены терагерцовые константы Керра в полярных и неполярных жидкостях и сопоставлены с известными значениями этих констант для оптического и постоянного электрических полей. Экспериментально получены спектрально-энергетические характеристики оптической люминесценции, индуцированной терагерцовым полем высокой напряженности (свыше 100 кВ/см) в однослойном графене.

В *пятой главе* предложен и экспериментально реализован метод диагностики временной динамики электронной плотности в плазменном канале по измерениям энергии рассеянного на канале терагерцового импульса. Предложенным методом на временных интервалах вплоть до 8 нс определена временная динамика электронной концентрации в филаменте, создаваемой фемтосекундным лазерным излучением в воздухе при различных давлениях. Обнаружено, что наложение внешнего постоянного электрического поля приводит к замедлению распада плазмы в филаменте. Теоретически показано, что эффект связан с дополнительным нагревом электронов.

В *заключении* сформулированы основные результаты диссертации.

Новизна диссертации. Научная новизна диссертации связана как с новизной разработанных подходов к теоретическому описанию процессов при генерации терагерцового излучения методом оптического выпрямления мощных фемтосекундных лазерных импульсов, так и с новизной предложенных экспериментальных схем генерации и способов применения высокоинтенсивного излучения терагерцового диапазона, включая полученные новые данные о взаимодействии терагерцового излучения с различными материалами.

Положения и результаты, выносимые на защиту. Сформулированные соискателем научные положения логически вытекают из результатов проведенного исследования, являются вполне обоснованными и достоверными. Достоверность представляемых научных результатов подтверждается их воспроизводимостью, соответствием теоретических предсказаний экспериментальным данным, а также согласованностью полученных результатов с данными сторонних независимых научных групп. Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых отечественных и зарубежных научных журналах.

Опубликование и представление результатов диссертации. По диссертации опубликованы 28 научных работ в журналах из перечня ВАК и международных реферативных баз данных Web of Science и Scopus. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, преимущественно входящих в первый и второй квартили (Q1 и Q2), что свидетельствует о признании их актуальности и научной значимости. В значительной части работ С.Б. Бодров выступает в качестве ответственного (corresponding), первого или последнего автора. Результаты диссертации были широко представлены на профильных научных семинарах, конференциях и симпозиумах.

Фундаментальная и практическая значимость диссертации связаны с тем, что разработанные в диссертации модели, методы и экспериментальные установки терагерцового диапазона открывают новые возможности исследований объектов различной природы.

Резюмируя, отмечу, что диссертация С.Б. Бодрова является завершенным исследованием в одной из актуальных развивающихся областей современной лазерной физики. Диссертационная работа Бодрова С.Б. представляет собой масштабное исследование, имеющее несомненную научную новизну и вносящее существенный вклад в развитие нелинейной оптики и терагерцовой фотоники. Работа отличается методологической строгостью, что проявляется в последовательном построении теоретических моделей и их комплексной экспериментальной верификации. Важным достоинством работы является согласование теоретических предсказаний и экспериментальных результатов, что подтверждает достоверность научных положений и выводов диссертации. Рассматриваемым физическим эффектам дано подробное объяснение.

Замечания. К диссертации имеются следующие замечания:

1. Дисперсия диэлектрической проницаемости нелинейного кристалла в большей части теоретических расчетов учитывается в виде упрощенной формулы (1.4) с однофононным резонансом и некоторым эффективным значением высокочастотной диэлектрической проницаемости ϵ_{∞} . Действительно, это приближение во многих случаях достаточно для описания эффектов в терагерцовом диапазоне даже для такого сложного по структуре кристаллической решетки и дефектов кристалла, как ниобат лития. Хотя, как известно, дисперсию коэффициента поглощения однорезонансная модель в ниобате лития не описывает, требуется дополнительный учет осцилляторной зависимости константы затухания γ_{eff} (см., например, работы T. Qiu, M. Maier, Phys. Rev. B (1997) 56, R5717, K. A. Kuznetsov, et al. (2016) Appl. Phys. B, 122, 223). Вместе с тем, для описания спектров генерации в гораздо более простом по структуре кристалле ZnTe в диссертации потребовалось применение усложненной четырехрезонансной модели диэлектрической проницаемости. Хотелось бы видеть в работе более подробный анализ причин учета

разных приближений для описания дисперсионных характеристик генерирующих терагерцовое излучение кристаллов.

2. Сравнение модельных представлений с результатами экспериментов проводится только на примере ряда известных диэлектрических кристаллов. Вместе с тем, полезно было бы привести обсуждение того, до какой степени применимы результаты проведенных расчетов к набирающим популярность схемам оптического выпрямления в органических кристаллах – таких, как DAST, DSTMS, OH1, HMQ-TMS и другие (см. обзор M. Jazbinsek et al., *Appl. Sci.* (2019), 9, 882).

3. Небольшое снижение эффективности генерации при охлаждении кристалла ниобата лития с температуры 77К до 10К, представленное на Рисунке 2.26(г), вряд ли связано с неточной настройкой схемы, как это полагается в работе. Аналогичное снижение наблюдалось и при исследовании другого эффекта - параметрического рассеяния света с участием холостых фотонов терагерцовой частоты (см. Fig.3а в статье Novikova T.I. et al., *Appl. Phys. Lett.* (2020), 116, 264003). По-видимому, это снижение связано с падением квадратичной восприимчивости кристалла в данном диапазоне температур.

4. Среди возможных причин насыщения эффективности генерации, указанных на стр. 142, следовало бы также рассмотреть проявление процессов короткоживущего фоторефрактивного разрушения кристалла, происходящих только в течение действия импульсов накачки и в небольшом отрезке времени после них. Даже в выбранных для экспериментов кристаллах ниобата лития стехиометрического состава существуют дефекты структуры (вакансии лития, замещение вакансий другими ионами и т.д.), а значит, при высоких уровнях интенсивности накачки происходит возбуждение носителей заряда поляронного типа. Эти процессы могут приводить к искажению волновых фронтов участвующих в процессах волн.

5. В разделе 4.5 сообщается, что для визуализации распределения интенсивности в пучке терагерцового излучения, вызывавшего люминесценцию графена, применялась схема с кристаллом GaP и призмой Глана. Не ясно, чем принципиально такая схема отличается от пробно-энергетического подхода к стробированию напряженности (не интенсивности) терагерцового поля (см. S. P. Kovalev and G. Kh. Kitaeva, *J. Opt. Soc. Am. B* (2013) 30, 2650), применявшегося, например, в статье I. E. Pyakov et al., *Appl. Phys. Lett.* (2014) 104, 151107 и других последующих работах.

6. Хотя в целом текст диссертации хорошо оформлен и скомпонован, встречаются недостатки в виде пропуска или замены отдельных букв.

Отмеченные замечания не снижают научную ценность полученных результатов. Тематика диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика. Основные результаты диссертации опубликованы в достаточном количестве статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Автореферат даёт полное представление о содержании диссертации.

Диссертационная работа Бодрова Сергея Борисовича «Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения импульсного терагерцового излучения» является завершенным научным трудом и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Бодров Сергей Борисович, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Профессор кафедры квантовой электроники
физического факультета Московского
государственного университета имени М.В. Ломоносова,
доктор физ.-мат. наук (01.04.21 Лазерная физика), доцент

20 декабря 2025 г.

Китаева Галия Хасановна

Я, Китаева Галия Хасановна, даю согласие на обработку моих персональных данных (приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 № 662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора физико-математических наук Бодрова Сергея Борисовича.

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Тел.: +7(499)138-67-25

Адреса электронной почты: gkitaeva@physics.msu.ru, kitaevagh@my.msu.ru

И.о. декана физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова,
профессор

В.В. Белокуров

