

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Цыпкина Антона Николаевича
о диссертационной работе Бодрова Сергея Борисовича
«Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения
импульсного терагерцового излучения»,
представленной на соискание учёной степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа С.Б. Бодрова посвящена разработке, исследованию и апробации методов нелинейно-оптического преобразования фемтосекундного лазерного излучения в короткие импульсы терагерцового диапазона, а также применению таких импульсов для диагностики различных материалов и сред. **Актуальность** исследования обусловлена низкой эффективностью существующих оптико-терагерцовых преобразователей при высокой востребованности доступных и мощных источников терагерцового излучения в фундаментальной и прикладной науке. Нацеленность работы на развитие новых направлений применения импульсных терагерцовых источников подчёркивает её практическую значимость.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 336 страниц, включает 107 рисунков, 3 таблицы и 226 библиографических ссылок.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, поставлены ее цели и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведена информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

Первая глава посвящена теоретическому исследованию генерации импульсного терагерцового излучения путём оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах (таких как ZnTe, LiNbO₃, GaAs, GaP). Получены и проанализированы выражения, описывающие терагерцовые поля, генерируемые в этих кристаллах в двух режимах: при выполнении и невыполнении условия продольного синхронизма с оптической накачкой. Показано, что для корректного описания излучения ближнего терагерцового поля, формируемого в области огибающей лазерного импульса, формулы Френеля и закон Снеллиуса требуют модификации.

Во **второй главе** рассмотрено оптико-терагерцовое преобразование в электрооптических кристаллах лазерных импульсов со специальной пространственно-временной структурой - с наклонённым фронтом интенсивности относительно фазовых фронтов. Представлено детальное обсуждение структуры и динамики фор-

мирования генерируемых терагерцовых полей. Результаты теоретического анализа частично подтверждены экспериментальными измерениями. Также исследуются нестандартные геометрии ввода оптической накачки и вывода терагерцового излучения из кристалла. В частности, на основе теоретических расчётов и экспериментальных данных показано, что часто используемая в экспериментах призма из кристалла LiNbO_3 может быть заменена на слой того же материала, размещённый между двумя согласующими диэлектрическими призмами, без потери эффективности преобразования. Такой подход открывает возможность увеличения энергии терагерцового излучения за счёт применения коммерчески доступных широкоапертурных пластин LiNbO_3 и оптической накачки тераваттного уровня мощности.

В третьей главе предложены и экспериментально исследованы эффективные оптико-терагерцовые преобразователи нового типа, в которых вместо классического коллинеарного синхронизма генерации предлагается использовать механизм черенковского излучения. В качестве нелинейной среды в таких преобразователях используется тонкий (толщиной 30-50 мкм) слой кристалла LiNbO_3 (длиной ~ 1 см), который, по сути, представляет собой сверхразмерный планарный волновод, обеспечивающий длительное взаимодействие и распространение оптической накачки. Генерируемое в слое за счёт черенковского механизма терагерцовое излучение выводится через его боковую поверхность с помощью кремниевой призмы. Экспериментально продемонстрирована перспективность предложенной схемы для генерации коротко-импульсного (длительностью 1-2 периода поля) терагерцового излучения с эффективностью 0.2-1% даже при сравнительно небольшой, порядка десятков микроджоулей, энергии накачки. При субмиллиджоульной энергии накачки достигнута напряженность сфокусированного терагерцового поля 300-500 кВ/см. Обнаружен и объяснён эффект уширения спектра генерации при приближении энергии накачки к порогу насыщения эффективности преобразования. Показано, что схема с поверхностно-боковым выводом черенковский излучения, может быть эффективно использована для оптико-терагерцовой конверсии в кристаллах со значительным поглощением в терагерцовом диапазоне, например в кристалле DKDP.

Четвертая глава посвящена исследованию серии нелинейно-оптических эффектов, индуцированных терагерцовыми полями высокой напряжённости (> 100 кВ/см), и разработке на их основе новых методик нелинейной диагностики материалов. В частности, теоретически и экспериментально показано, что при наложении оптического и терагерцового импульсов в объеме изотропной среды, вторая оптическая гармоника не излучается в окружающее пространство если изменение

терагерцового поля на длине когерентности между первой и второй гармониками является плавным (условие, выполняемое для многих материалов). При таком условии излучение второй гармоники происходит только на границах нелинейности. На основе обнаруженного эффекта предложен и экспериментально апробирован новый метод регистрации малоконтрастных оптических неоднородностей. Также в главе экспериментально исследована динамика нелинейного отклика полярных и неполярных жидкостей при терагерцовом эффекте Керра. Определены соответствующие нелинейные коэффициенты и проведено их сравнение с известными коэффициентами Керра для постоянных и оптических полей. Измерена оптическая люминесценция, наведённая терагерцовым полем в графене. Установлено, что пространственная форма люминесценции повторяет профиль терагерцового пучка, что может быть использовано в целях диагностики пространственного распределения интенсивного терагерцового излучения.

В **пятой главе** предлагается и экспериментально тестируется новый метод диагностики оптически-индуцированного плазменного филамента в воздухе путем измерения энергии рассеянного на данном филаменте зондирующего терагерцового излучения. Показано, что предложенный метод может быть просто и эффективно использован для измерения распада плотности плазмы в филаменте на наносекундных временах при разных внешних условиях, таких как давление и наличие внешнего электрического поля. Продемонстрировано хорошее согласие экспериментальных результатов с численными расчетами.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Говоря в общем о диссертационной работе, стоит отметить широту проведенных исследований как по разработке эффективных терагерцовых источников, так и по различным направлениям их применения. В тоже время работа оставляет целостное впечатление. Все основные результаты являются новыми, значительная их часть получила хорошее цитирование в литературе. Из полученных результатов можно выделить не отмечавшийся ранее эффект отсутствия излучения второй оптической гармоники при наложении оптического и терагерцового импульсов в объеме изотропной среды, а также продемонстрированную высокую эффективность терагерцовой генерации в черенковских преобразователях. Предложенная в работе новая схема оптического выпрямления скошенных лазерных импульсов в слое кристалла LiNbO_3 с согласующими диэлектрическими призмами открывает широкие перспективы её практического использования в мощных лазерных системах.

Достоверность полученных результатов следует из хорошей согласованно-

сти экспериментальных данных и теоретических предсказаний, а также обусловлена применением апробированных измерительных и расчётных методик. В связи с этим не вызывает сомнений обоснованность сделанных в диссертации выводов и выносимых на защиту положений.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на конференциях различного уровня. Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд вопросов:

1. На рисунке 2.6д имеется особенность у спектра в виде провала. Она очень напоминает спектр суперконтинуума в оптическом диапазоне, который сгенерировался за счет фазовой самомодуляции. Не вызвано ли появление провала фазовой (частотной) модуляцией и в этом случае? Тем более, что на рисунках 2.6 а,в импульсы чирпированные.
2. На рисунке 2.15 и по тексту сказано, что 200 фс является оптимумом по эффективности преобразования в ТГц диапазон. Говорится о компромиссе между интенсивностью и дисперсионной длиной. Но когда мы говорим о наклонном фронте, то учет интенсивности в данном случае как будет учитываться? Также интересен момент, связанный с тем, что при увеличении длительности будет изменяться ширина спектра. Как это будет учитываться и будет ли этот момент учитываться вообще при генерации ТГц излучения?
3. В работе утверждается, что эффективность преобразования оптического излучения в терагерцовое для пластины ниобата лития соизмерима со стандартной схемой. Если посмотреть на рисунок 2.29в, можно увидеть, что значение одинаковой эффективности достигается на разных энергиях. С чем это может быть связано?
4. Если посмотреть на рисунок 3.21а, то можно увидеть, что эффективность конверсии для 1 ТГц максимальная. А в тексте написано, что после 10 мкДж эффективность конверсии на 3,3 и 4 ТГц растёт быстрее, чем при 1 ТГц. Это в рисунке цвета напутаны или в тексте опечатка?
5. Чем обуславливается присутствие нулевых частот на рисунках 2.27, 3.9?

Замечания в текстовом оформлении:

1. В тексте имеются опечатки, но их не так много. Например, «Тем менее, для...». Некоторые значения не указаны в подписи к рисункам, что слегка затрудняет понимание результатов.

2. В научных положениях используется некорректная терминология. Например, «... кубичной нелинейности...», наверно кубической.

При этом указанные замечания не влияют на общую положительную оценку и значимость диссертационного исследования.

Считаю, что диссертация «Нелинейно-оптическая генерация и диагностические применения импульсного терагерцового излучения» соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), является законченной научно-квалификационной работой 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 её автор – Бодров Сергей Борисович заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (01.04.05 — оптика), доцент,
директор Научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»



Цыпкин Антон Николаевич

« 23 » декабря 2025 г.

Я, Цыпкин Антон Николаевич, 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.

Контактные данные:

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

тел.: +7 (812) 480-05-11

E-mail: tsypkinan@itmo.ru

«Подпись Цыпкина Антона Николаевича ЗАВЕРЯЮ»:

*Министерство
С.А. Цыпкин*