

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Объединенного института высоких температур РАН, д.ф.-м.н., академик РАН



О.Ф. Петров

«14» мая 2026 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Курникова Михаила Александровича «Генерация, преобразование и детектирование терагерцовых волн в условиях неколлинеарного фазового синхронизма с ультракороткими лазерными импульсами в кристаллах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

В настоящее время источники терагерцового излучения находят все большее применение в решении фундаментальных и прикладных научных задач, но реализация этих возможностей зависит от создания эффективных, компактных и мощных источников излучения, а также методов диагностики. Широкое распространение для генерации ТГц излучения получили методы, основанные на применении фемтосекундных лазерных систем. Одним из таких методов является оптическое выпрямление фемтосекундных импульсов в кристаллах с квадратичной нелинейностью. С помощью данного метода удастся получить ТГц импульсы с высокими значениями напряженности электрического поля и достаточно широким спектром. Необходимым условием для эффективной генерации является выполнение условия синхронизма, которое в коллинеарной схеме генерации заключается в равенстве групповой скорости импульса накачки и фазовой скорости ТГц импульса. В такой геометрии используются органические нелинейные кристаллы, но применение их ограничено в связи с высокой стоимостью и низкой стойкостью при работе с высокими частотами повторения импульсов. Использование полупроводниковых кристаллов требует выбора длины волны лазера накачки для выполнения условия синхронизма, что не всегда представляется возможным. Кроме этого, сильное многофотонное поглощение лазерного излучения ограничивает применение таких кристаллов. Применение неколлинеарной схемы позволяет использовать кристалл ниобат лития с высоким значением нелинейно-оптического коэффициента для генерации импульсов ТГц излучения с высокой энергией. Для генерации импульсов с меньшей

энергией может использоваться неколлинеарная схема, основанная на черенковском излучении ТГц волн. Таким образом, диссертационная работа Курникова М.А., посвященная генерации, преобразованию и детектированию терагерцовых волн в условиях неколлинеарного фазового синхронизма с ультракороткими лазерными импульсами в кристаллах является, безусловно, актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка публикаций по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 118 страниц, включая 32 рисунка, список литературы из 100 наименований и список публикаций по диссертации из 14 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, а также современное состояние исследований по теме диссертационной работы. В заключительной части введения изложена цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, а также основные положения, выносимые на защиту. Представлены основные параметры оборудования, используемого при проведении экспериментальных исследований и описаны методы исследований.

В первой главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения полупроводникового кристалла GaP в качестве рабочей среды для черенковской схемы оптико-терагерцового конвертора. В результате проведенных исследований показано, что кристалл GaP может быть использован для оптико-терагерцового преобразования фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны ~ 1.5 мкм в режиме генерации черенковского излучения. Предложена оптическая схема конвертора, в которой сфокусированный цилиндрической линзой в линию пучок накачки вводится в кристаллическую пластинку под углом Брюстера и распространяется в ней так, что половина генерируемого лазерным импульсом черенковского клина выходит из пластинки по нормали в виде терагерцового пучка с плоским волновым фронтом. Использование данной схемы позволило достичь более высокой эффективности оптико-терагерцового преобразования ($\sim 3 \times 10^{-5}$) по сравнению со стандартной коллинеарной схемой преобразования.

Во второй главе представлены результаты разработки нелинейно-оптических оптико-терагерцовых конвертеров черенковского типа, в которых в качестве излучения накачки используются фемтосекундные оптические осцилляторы. Предложены и экспериментально исследованы две схемы конвертора с односторонним выводом терагерцового излучения из кристаллической пластины через один полуконус и с двусторонним выводом через полуконусы, прикрепленные с двух сторон кристаллической пластины ниобата лития. Конверторы исследованы при накачке титан-сапфировым

лазером с длиной волны 800 нм и волоконным эрбиевым лазером с длиной волны 1550 нм. Показано, что кремниевые полуконусы полного внутреннего отражения являются эффективными согласующими элементами для вывода и коллимации черенковского конуса терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных импульсов осциллятора в пластине ниобата лития. Продемонстрирована эффективность преобразования, на два порядка превышающая эффективность распространенной коллинеарной схемы на основе кристалла ZnTe при одинаковой накачке.

В третьей главе представлены результаты теоретического исследования возможности создания в полупроводниковом кристалле ZnS фронтов плазмообразования с регулируемой скоростью движения и большой (в сотни микрон) длиной распространения в условиях многофотонного поглощения скошенных импульсов титан-сапфирового лазера, а также исследованию спектрально-временной трансформации терагерцовых импульсов при отражении от таких фронтов. Проведено моделирование отражения терагерцового импульса от фронта ионизации в кристалле ZnS и исследовано влияние параметров лазерного импульса (интенсивность и угол скоса) на временную форму и спектр терагерцового импульса. Показано, что трёхфотонная ионизация кристалла ZnS лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности позволяет создавать резкие релятивистские фронты ионизации, распространяющиеся на расстояния порядка сотен микрон. Скоростью распространения фронта ионизации можно управлять путем изменения угла скоса лазерного импульса. Созданные таким методом фронты могут служить эффективными доплеровскими преобразователями терагерцовых импульсов.

В четвертой главе представлены результаты теоретического исследования эллипсометрического детектирования импульсов терагерцового излучения в неколлинеарной схеме распространения измеряемого терагерцового и зондирующего импульсов в электрооптическом кристалле. Сформулирована теоретическая модель процесса электрооптического детектирования и развит формализм, позволяющий рассчитывать выходной сигнал предложенной схемы. Выполнен анализ неколлинеарного детектирования терагерцовых волн лазерными импульсами с длиной волны 1550 нм в кристалле GaAs и лазерными импульсами с длиной волны 800 нм в кристалле LiNbO₃. Показано, что неколлинеарная схема электрооптического детектирования обеспечивает оптико-терагерцовый синхронизм при ориентации зондирующего пучка под черенковским углом к терагерцовому пучку без необходимости подбора кристалла под длину волны лазера, в отличие от традиционной коллинеарной схемы. Это позволяет получить высокую эффективность схемы и высокое спектральное разрешение за счет возможности использования толстых кристаллов.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Диссертационная работа Курникова М.А. является цельным и законченным исследованием. Полученные в ней результаты обладают научной новизной и имеют как теоретическое, так и практическое значение для развития терагерцовой фотоники.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации, а также сформулированных в ней научных положений и выводов подтверждается использованием апробированных теоретических, численных и экспериментальных методов. Результаты диссертации не противоречат имеющимся в литературе теоретическим и экспериментальным данным.

Необходимо отметить следующие новые результаты, которые были получены и представлены в работе.

1. Предложена новая эффективная схема генерации терагерцового излучения с накачкой тонкой пластины полупроводникового кристалла GaP лазерными импульсами среднего ИК диапазона в условиях эффекта Брюстера и выводом половины черенковского клина терагерцовых волн из кристалла по нормали.

2. Разработан и экспериментально продемонстрирован преобразователь импульсов фемтосекундных оптических осцилляторов в коллимированное терагерцовое излучение с рекордно высокой эффективностью 0.06%, которая на два порядка превосходит эффективность стандартной коллинеарной схемы преобразования в кристалле ZnTe и на порядок – эффективность преобразователей с выводом излучения через согласующую кремниевую призму.

3. Продемонстрирована работоспособность оптико-терагерцового конвертора с двусторонним выводом терагерцового излучения из пластины ниобата лития через два кремниевых полуконуса полного отражения. Такая схема обеспечивает формирование единого коллимированного терагерцового пучка и подавление интерференционного провала в спектре терагерцового импульса.

4. Предложен способ создания в кристаллах фронтов ионизации с регулируемой скоростью движения и длиной распространения в сотни микрон на основе многофотонного поглощения лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности. С помощью численного моделирования продемонстрирована возможность эффективного спектрально-временного преобразования терагерцового импульса при его отражении от фронта трехфотонной ионизации, создаваемого в кристалле ZnS.

5. Разработана теория терагерцового детектирования, описывающая модуляцию поляризации зондирующего лазерного пучка при неколлинеарном нелинейном

взаимодействии с терагерцовой волной в электрооптическом кристалле с учетом конечной ширины терагерцового и зондирующего пучков.

Основные результаты, полученные в диссертационной работе, не вызывают сомнений в высокой научной квалификации автора. Несмотря на это, следует отметить следующие замечания.

1. Для полученных экспериментальных зависимостей отсутствует анализ погрешностей измерений.

2. В диссертационной работе указано, что калибровка ячейки Голея проводилась с использованием ослабленного света накачки, но нет информации о методике калибровки. Каким образом осуществлялась калибровка ячейки Голея?

3. При экспериментальном исследовании выходных характеристик оптико-терагерцового конвертора с односторонним выводом терагерцового излучения через кремниевый полуконус полного внутреннего отражения была использована схема фокусировки ТГц излучения с цилиндрическим и сферическим параболическими зеркалами, а в схеме электрооптического детектирования использовался кристалл GaP толщиной 50 мкм. Почему такая схема фокусировки и измерений не использовалась при исследовании оптико-терагерцового конвертора с двусторонним выводом терагерцового излучения?

4. На рис.2.11 амплитуда «осцилляторного хвоста» составляет около 20% от амплитуды основного сигнала, а на рис. 2.14 амплитуда «осцилляторного хвоста» составляет уже около 40%. Наблюдаемые осцилляции с частотой ~ 1.1 ТГц автор связывает с наличием нежелательных отражений терагерцового излучения от толстого слоя клея на одной из границ слоя LiNbO_3 . Но на спектрах рис. 2.11 и 2.14 провал практически одинаковый на частоте ~ 1.1 ТГц. Чем это можно объяснить?

Следует также отметить небольшие замечания по оформлению диссертационной работы.

1. Присутствуют небольшое количество опечаток в тексте. Так на стр. 52 (4 строка сверху) перед словом «несмотря» должна быть запятая. На стр. 55 в предложении «Экспериментальное исследование влияния указанных факторов на характеристики генерируемого терагерцового излучения и проведено ниже.» союз «и» перед словом «проведено», вероятно, лишний. На стр. 57 фокусное расстояние линз (первый абзац) указано в «мм», а должно быть в «см».

2. Было бы правильно приводить рисунки после их первого упоминания в тексте. В диссертационной работе некоторые рисунки встречаются раньше упоминания их в тексте. Например, рисунок 2.11 расположен на 56 стр., а ссылка на него идет только на 58 стр.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и выносимых на защиту положений. Тематика и содержание диссертации полностью соответствуют специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Результаты, полученные в диссертационной работе, в перспективе могут быть использованы в следующих учреждениях: Институте общей физики РАН, Физическом институте РАН, Институте прикладной физики РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, в РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ, в «Курчатовском институте».

Материалы, представленные в диссертации хорошо известны научной общественности, они неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в высокорейтинговых рецензируемых научных журналах, таких как Optics Letters, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Optics Express и др. Курников М.А. является соавтором патента на изобретение «Опτικο-терагерцовый преобразователь с полуконическими элементами вывода терагерцового излучения». Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа Курникова Михаила Александровича «Генерация, преобразование и детектирование терагерцовых волн в условиях неколлинеарного фазового синхронизма с ультракороткими лазерными импульсами в кристаллах» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Курников Михаил Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Диссертационная работа и настоящий отзыв, составленный кандидатом физико-математических наук Овчинниковым Андреем Владимировичем, обсуждались на семинаре лаборатории лазерного воздействия Объединенного института высоких температур РАН 6 мая 2026 г. и получили положительную оценку.

Старший научный сотрудник
лаборатории лазерного воздействия,
кандидат физико-математических наук
(01.04.08 Физика плазмы)
Тел.: +7 (495) 362-55-62
E-mail: a.ovtch@gmail.com

А.В. Овчинников

Заведующий лабораторией лазерного воздействия,
кандидат физико-математических наук
(01.04.08 Физика плазмы)
Тел.: +7 (495) 362-55-22
E-mail: sitnik_ds@gmail.com



Д.С. Ситников

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт
высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2

Тел.: 8 (495) 484-23-00

E-mail: ok-oivt@ihed.ras.ru

Веб-сайт: <https://jiht.ru/>

« 14 » 05 2026 г.