

На правах рукописи



Курников Михаил Александрович

**Генерация, преобразование и детектирование
терагерцовых волн в условиях неколлинеарного
фазового синхронизма с ультракороткими
лазерными импульсами в кристаллах**

Специальность 1.3.19. Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2026

Работа выполнена на кафедре общей физики радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Бакунов Михаил Иванович

Официальные оппоненты: **Раевский Алексей Сергеевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики и техники оптической связи,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Назаров Максим Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
начальник лаборатории сверхсильных световых полей,
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур
РАН, г. Москва.

Защита состоится 22 июня 2026 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.340.03 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по адресу: <https://diss.unn.ru/1634>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.340.03
доктор физ.-мат. наук, доцент

Клюев Алексей Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Имеющаяся в настоящее время острая потребность в развитии методов генерации, детектирования и манипуляции характеристиками терагерцового излучения вызвана все более широким применением этого излучения в научных и практических приложениях. Ведутся работы по созданию настольных терагерцовых ускорителей частиц [1], использованию терагерцовых полей для сверхбыстрого управления намагниченностью материалов [2] и мониторинга квантовых переходов в веществе [3]. Распространенные техники терагерцовой спектроскопии во временной области и терагерцовой интроскопии находят новые применения для решения таких практических задач, как неразрушающее обнаружение дефектов в композитных материалах [4], контроль качества и толщины покрытий в автомобильной и фармацевтической промышленности [5], измерение напряжений в теплоизолирующих покрытиях авиационных двигателей [6] и контроль качества продуктов питания [7].

Наиболее распространенные методы генерации терагерцового излучения основаны на использовании фемтосекундных лазеров и включают эмиссию терагерцовых волн всплесками тока в фотопроводящих антеннах [8], а также оптическое выпрямление лазерных импульсов в кристаллах с квадратичной нелинейностью [9]. В целом метод оптического выпрямления позволяет генерировать терагерцовые поля большей напряженности и с более широким спектром, чем фотопроводящие антенны. В этом методе лазерный импульс индуцирует в среде нелинейную поляризацию, которая повторяет огибающую интенсивности оптического поля и движется вместе с лазерным импульсом, действуя в качестве источника терагерцового излучения. Для эффективного возбуждения терагерцовой волны лазерный импульс должен двигаться синхронно с ее фазовым фронтом. При коллинеарном распространении условие синхронизма сводится к требованию равенства группового индекса на длине волны лазерной накачки показателю преломления терагерцовой волны и приводит к необходимости подбора кристалла под длину волны лазера, что не всегда может быть выполнено. Для распространенных титан-сапфировых (с длиной волны 0,8 мкм) и иттербиевых (с длиной волны 1,06 мкм) лазеров условие коллинеарного синхронизма выполняется на определенных терагерцовых частотах в кристаллах ZnTe и GaP соответственно. Однако сильное двухфотонное поглощение лазерного излучения в этих кристаллах с последующим поглощением терагерцового излучения фотогенерируемыми свободными носителями ограничивает применимость коллинеарной схемы [10, 11]. Более того, для волоконных эрбиевых лазеров с длиной волны 1,55 мкм, которые привлекательны для создания компактных терагерцовых спектрометров, не существует кристалла, обеспечивающего коллинеарный оптико-терагерцовый синхронизм. Перспективными для использования в коллинеарной схеме являются органические кристаллы, которые пока не получили широкого распространения, в частности, из-за высокой стоимости и ряда других недостатков [12].

В последнее время получила распространение неколлинеарная схема терагерцовой генерации, основанная на оптическом выпрямлении в кристалле ниобата лития (LiNbO_3) импульсов титан-сапфирового усилителя, у которых за счет дифракции на решетке создается скос фронта интенсивности под углом $\sim 63^\circ$ по отношению к фазовым фронтам [13]. Такой импульс движется в направлении нормали к своим фазовым фронтам и возбуждает терагерцовую волну, распространяющуюся по нормали к фронту оптической интенсивности синхронно с этим фронтом. Данная схема генерации позволила достичь рекордно высоких значений напряженности терагерцового поля (≥ 1 МВ/см) и энергии терагерцового импульса ($\sim 1 - 10$ мДж) [9, 14], но требует использования лазерной накачки с мультимиллиджоульной энергией импульса, чтобы обеспечить высокую оптическую интенсивность при необходимой большой (по сравнению с терагерцовой длиной волны) ширине пучка накачки.

Эффективную генерацию терагерцового излучения лазерными импульсами меньшей энергии обеспечивает другая неколлинеарная схема, основанная на черенковском излучении терагерцовых волн движущимся вместе с лазерным импульсом нелинейным источником [15], что подобно излучению от релятивистских заряженных частиц в классическом эффекте Черенкова [16]. В черенковской схеме пучок накачки должен иметь малую по сравнению с длиной терагерцовой волны ширину хотя бы в одном направлении, т.е. должен быть сфокусирован. Фокусировка позволяет получить высокую оптическую интенсивность при использовании для накачки лазерных импульсов сравнительно небольшой энергии – порядка десятков мкДж при цилиндрической фокусировке в линию и на уровне единиц нДж при сферической фокусировке в пятно. Таким образом, черенковская схема естественным образом подходит, например, для генерации терагерцового излучения с высокой средней мощностью импульсами итербиевых лазеров с энергией $\sim 1 - 100$ мкДж и высокой (до 1 МГц) частотой повторения, а также для оптико-терагерцовой конверсии импульсов фемтосекундных оптических осцилляторов с энергией $\sim 1 - 10$ нДж в компактных терагерцовых спектрометрах.

Черенковская схема автоматически обеспечивает неколлинеарный оптико-терагерцовый синхронизм без необходимости подбора кристалла под длину волны лазера, причем даже в таких кристаллах, как LiNbO_3 или LiTaO_3 , где оптический групповой индекс и терагерцовый показатель преломления отличаются более чем в 2 раза. Именно применительно к кристаллу LiNbO_3 , обладающему большим коэффициентом квадратичной нелинейности, данная схема в основном и получила развитие. Чтобы снизить негативное влияние сильного поглощения на терагерцовых частотах в LiNbO_3 , было предложено выводить генерируемое терагерцовое излучение из кристалла через его боковую (параллельную пучку накачки) поверхность с помощью расположенной на этой поверхности согласующей кремниевой призмы [17, 18]. Для масштабирования генерируемой терагерцовой мощности было предложено использовать цилиндрическую фокусировку пучка накачки, что позволяет избежать пробоя кристалла при увеличении мощности накачки за счет увеличения длины фокальной линии

[19]. Дополнительным преимуществом фокусировки в линию является генерация терагерцовых волн в виде более удобного для использования черенковского клина, а не конуса, как в случае фокусировки в пятно. Дальнейшее развитие черенковской схемы связано с использованием тонких слоев LiNbO_3 , обладающих волноводными свойствами и обеспечивающих за счет этого подавление дифракционной расходимости оптической накачки по одной из координат [20], а также с реализацией идеи двустороннего вывода терагерцового излучения из слоя LiNbO_3 с дальнейшим формированием единого коллимированного терагерцового пучка [21]. Использование широкоапертурных конверторов позволило масштабировать энергию генерируемых терагерцовых импульсов до 1,2 мкДж и получить поля с напряженностью до 0,5 МВ/см [22]. Увеличение длины волны накачки до 2 мкм обеспечило повышение эффективности конверсии до 1,3% [23].

В последние годы была переосмыслена перспективность полупроводниковых кристаллов, типа ZnTe и GaP , для генерации сильных терагерцовых полей [24, 25]. Для подавления двухфотонного поглощения в этих кристаллах было предложено использовать более длинноволновую накачку, чем титан-сапфировые и иттербиевые лазеры. Нарушение при этом коллинеарного оптико-терагерцового синхронизма может быть преодолено с помощью неколлинеарных схем. Перспективность полупроводниковых кристаллов для оптико-терагерцовой конверсии в схеме с накачкой скошенными лазерными импульсами подтверждена в работах [26, 27].

В диссертации (глава 1) исследована перспективность использования полупроводниковых кристаллов применительно к черенковской схеме оптико-терагерцовой конверсии. Теоретические и экспериментальные исследования проведены на примере кристалла GaP с накачкой на длине волны 1,54 мкм. Указано, что слабое терагерцовое поглощение в полупроводниковых кристаллах ($<2 \text{ см}^{-1}$ на частоте 1 ТГц в GaP) и сравнительно небольшой угол неколлинеарного синхронизма ($\approx 19^\circ$ в GaP при накачке на 1,54 мкм, вместо $\approx 63^\circ$ в LiNbO_3) позволяют отказаться от бокового вывода терагерцового излучения через согласующую призму и использовать обычные кристаллические пластинки толщиной в несколько миллиметров. Предложена практически удобная схема терагерцовой генерации, в которой сфокусированный в линию пучок оптического параметрического усилителя вводится в пластинку GaP под углом Брюстера ($\sim 72^\circ$) и распространяется в ней под углом к нормали, равном углу черенковского синхронизма с терагерцовыми волнами ($\sim 19^\circ$). При этом половина генерируемого лазерным импульсом черенковского клина выходит из пластинки по нормали в виде удобного для использования терагерцового пучка с плоским волновым фронтом. Работоспособность схемы подтверждена численным моделированием, а также продемонстрирована экспериментально. Лазерные импульсы длительностью 140 фс и энергией 10 мкДж были конвертированы в импульсы терагерцового излучения с шириной спектра $\sim 2,5$ ТГц с эффективностью $\sim 3 \times 10^{-5}$, которая по крайней мере на порядок превосходит эффективность стандартной коллинеарной схемы оптико-терагерцовой конверсии.

Как отмечалось выше, развитие черенковских оптико-терагерцовых конверторов с боковым выводом терагерцового излучения из кристалла LiNbO_3 через согласующие призмы шло, в основном, применительно к преобразованию мощных импульсов лазерных усилителей. В то же время для таких приложений, как терагерцовая спектроскопия во временной области (THz-TDS [28]) и терагерцовая сканирующая туннельная микроскопия (THz-STM [29]) может быть предпочтительным использование в качестве накачки фемтосекундных оптических осцилляторов с более низкой (на уровне наноджоулей), чем у усилителей, энергий импульса, но гораздо более высокой (≈ 100 МГц вместо ≈ 1 кГц) частотой повторения из-за потенциально более высокого отношения сигнал/шум, компактности и удобства использования.

При накачке кристалла оптическим осциллятором лазерный луч должен быть сфокусирован в пятно (а не в линию, как при накачке усилителем), чтобы обеспечить высокую оптическую интенсивность, необходимую для эффективного оптического выпрямления. Генерируемое при такой фокусировке терагерцовое излучение имеет вид черенковского конуса, эффективный вывод которого из слоя LiNbO_3 является более сложной задачей, чем вывод генерируемого при накачке усилителем черенковского клина. Действительно, геометрия используемых в конверторах призм не соответствует геометрии расходящегося конуса, так что только та часть терагерцового излучения, которая падает на выходную грань согласующей кремниевой призмы под углами, меньшими угла полного внутреннего отражения на границе кремний-воздух (17°), будет выходить в свободное пространство, причем в форме расходящегося пучка. Хотя даже в этом случае эффективность конверсии значительно превосходит достигаемую в стандартной коллинеарной схеме с кристаллом ZnTe [30], необходима разработка специализированных конверторов под накачку оптическими осцилляторами.

Проблема вывода терагерцового излучения существует и для конверторов на основе гребенчатых оптических волноводов, сделанных из LiNbO_3 [31]. Для повышения эффективности вывода в работах [32, 33] были использованы сферические и конические кремниевые линзы с эмпирически выбранной формой. Были также сделаны попытки теоретического расчета оптимального радиуса кривизны и положения центра кривизны сферической линзы [34], а затем выдвинуто предположение, что предпочтительными могут быть конические линзы [35]. Если, однако, поверхность конической линзы будет в точности соответствовать коническому волновому фронту, то черенковское излучение будет выходить в свободное пространство в виде неудобного для использования сильно расходящегося конуса. Чтобы обеспечить коллимацию (или фокусировку) излучения, необходимо рассчитать и изготовить коническую линзу со сложным профилем поверхности. Даже в этом случае неизбежными будут значительные френелевские потери из-за больших углов падения излучения на выходную поверхность такой линзы.

В диссертации (глава 2) разработан и экспериментально апробирован принципиально иной дизайн черенковских оптико-терагерцовых конверторов

для преобразования импульсов оптических осцилляторов, основанный на использовании явления полного внутреннего отражения на границе кремний-воздух, а не преломления, как в кремниевых линзах [32-35]. Ключевым элементом дизайна является кремниевый полуконус с углом при вершине, равным половине черенковского угла в кремнии ($\approx 24,5^\circ$), прикрепленный к тонкому слою LiNbO_3 . Выходящее из слоя терагерцовое излучение испытывает полное внутреннее отражение от боковой поверхности полуконуса и выходит через его основание по нормали, формируя в свободном пространстве удобный для практического использования коллимированный пучок. Предложены и апробированы два варианта дизайна – с односторонним выводом излучения из слоя через один полуконус и с двусторонним выводом через полуконусы с каждой стороны слоя. Экспериментально продемонстрирована совместимость разработанных конверторов с лазерами различной длины волны.

Отражение света от движущегося с релятивистской скоростью зеркала рассматривается как способ повышения частоты и компрессии электромагнитных импульсов со времен классической работы Эйнштейна [36]. С появлением в 1990-х годах лазеров, способных генерировать интенсивное короткоимпульсное излучение, в качестве возможной реализации зеркала Эйнштейна привлекли внимание фронты ионизации, создаваемые лазерными импульсами в веществе [37]. По сравнению с другими вариантами реализации релятивистского зеркала, такими, например, как релятивистские электронные пучки [38], фронты ионизации имеют преимущество обеспечения доплеровского сдвига частоты волны без необходимости ускорения вещества [39]. В первых экспериментах фронт ионизации создавался ультрафиолетовым пикосекундным лазером в газе, при этом было достигнуто повышение частоты микроволнового излучения с 34,8 ГГц до более чем 173 ГГц при плотности плазмы за фронтом $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ [40].

Использование полупроводников вместо газов позволяет создавать фронты ионизации с более плотной плазмой, причем менее интенсивными лазерными импульсами [41], что дает возможность продвинуться в область более высоких частот. Хотя первые эксперименты с полупроводниками были направлены на повышение частоты микроволнового излучения [42], в работе [43] уже исследовалась трансформация терагерцового излучения на фронте ионизации с плотностью свободных носителей заряда $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, создаваемом при однофотонной ионизации кремния лазерными импульсами с длиной волны 775 нм. При однофотонной ионизации, однако, лазерный импульс быстро (за время ~ 100 фс) истощается, создавая плазму с экспоненциально спадающим профилем плотности только на малом (~ 10 мкм) расстоянии от границы кристалла, что делает преобразование терагерцовых импульсов, имеющих пикосекундную длительность, неэффективным на таком фронте.

В диссертации (глава 3) для повышения эффективности доплеровского преобразования терагерцовых волн предложено использовать фронты многофотонной ионизации, создаваемые лазерными импульсами в материалах с более широкой, чем у кремния, запрещенной зоной. Показано, что такие фронты способны распространяться на расстояния в сотни микрон. Чтобы замедлить скорость фронта до значений, меньших скорости терагерцовых волн, и обеспечить

тем самым возможность отражения волн от фронта, предложено использовать для ионизации лазерные импульсы со скошенным фронтом интенсивности. Путем изменения угла скоса импульса можно управлять скоростью фронта и, как результат, пространственно-временными характеристиками отраженного терагерцового импульса. Эффективность предложенного подхода продемонстрирована с помощью численного моделирования на примере фронта трехфотонной ионизации, создаваемого импульсами титан-сапфирового лазера с углом скоса $\sim 40^\circ$ и интенсивностью $\sim 50 - 100$ ГВт/см² в кристалле ZnS. Показано, что при отражении от такого фронта терагерцовый импульс может испытывать многократное сжатие и расширение спектра практически без изменения амплитуды.

Детектирование волновой формы терагерцового излучения путем его стробирования фемтосекундными лазерными импульсами представляет собой фактически обратный процесс по отношению к генерации терагерцового излучения. Как и для генерации, для детектирования используют два основных метода – стробирование с помощью фотопроводящих антенн и при нелинейном оптико-терагерцовом взаимодействии в электрооптических кристаллах. В последнем случае зондирующий лазерный импульс распространяется в кристалле вместе с терагерцовым импульсом и испытывает модуляцию поляризации из-за наведенной терагерцовым полем анизотропии (эффект Поккейса). Измеряя изменение поляризации с помощью эллипсометрической схемы как функцию временной задержки между лазерным и терагерцовым импульсами, можно поточечно снять зависимость терагерцового электрического поля от времени. Для эффективного детектирования, как и при генерации, требуется выполнение условия оптико-терагерцового синхронизма, что при коллинеарной схеме взаимодействия снова приводит к необходимости подбора кристалла под длину волны зондирующего лазерного излучения. Дополнительным недостатком здесь является искажение детектируемого сигнала из-за подчеркивания части терагерцового спектра в окрестности частоты синхронизма.

В работе [44] была предложена более гибкая неколлинеарная схема электрооптического детектирования. В этой схеме сильно сфокусированный лазерный пучок распространяется в электрооптическом кристалле под таким углом к слабо сфокусированному терагерцовому пучку, чтобы обеспечить синхронное распространение лазерного импульса и терагерцового волнового фронта в нормальном к фронту направлении. При этом лазерный импульс «скользит» по фронту (смещается вдоль него в тангенциальном направлении), накапливая изменение поляризации. Физически неколлинеарная схема детектирования представляет собой инвертированную схему излучения Черенкова, а угол неколлинеарности равен черенковскому углу.

В работе [44] неколлинеарная схема детектирования была реализована в кристалле LiNbO₃ при длине волны лазера 0,8 мкм. Из-за большого черенковского угла в LiNbO₃ ($\approx 63^\circ$) терагерцовое излучение вводилось в кристалл через его боковую поверхность с помощью кремниевой призмы. Позднее неколлинеарная схема была реализована в кристалле GaAs при длине волны лазера 1,55 мкм [45]. Благодаря значительно меньшему черенковскому углу в этом случае ($\approx 12^\circ - 15^\circ$) и терагерцовый, и лазерный пучки вводились в кристалл через его

фронтальную грань – по нормали и наклонно соответственно. В недавней работе [46] неколлинеарная схема была реализована в кристалле LiNbO_3 в случае распространения лазерного импульса вдоль оптической оси кристалла, что обеспечивало подавление проявления сильной собственной анизотропии кристалла без использования дополнительных оптических элементов, как это было в работе [44].

Кроме возможности избавиться от необходимости подбора кристалла под длину волны лазера неколлинеарная схема дает также возможность использовать кристаллы большой (порядка сантиметра) толщины. Это позволяет выбирать для стробирования широкие (длительностью более 100 пс) временные окна без перекрытия основного электрооптического сигнала с эхо-сигналами, вызванными переотражениями в кристалле, и, как результат, достигать высокого спектрального разрешения детектирования – на уровне нескольких ГГц [45, 46].

Теория электрооптического детектирования терагерцовых волн развивалась в основном для стандартной геометрии коллинеарного распространения терагерцового и лазерного импульсов [47]. Для геометрии неколлинеарного распространения импульсов теория была разработана лишь применительно к неэллипсометрическому методу детектирования, основанному на модуляции интенсивности, а не поляризации, зондирующего лазерного пучка в условиях пространственного разделения вкладов от процессов генерации разностной и суммарной частот [48].

В диссертации (глава 4) впервые разработана теория эллипсометрического метода электрооптического детектирования терагерцовых волн для неколлинеарной геометрии. На основе развитого общего формализма проведен анализ практически важных случаев неколлинеарного детектирования терагерцовых волн импульсами волоконного лазера (с длиной волны 1,55 мкм) в кристалле GaAs и импульсами титан-сапфирового лазера (с длиной волны 0,8 мкм) в кристалле LiNbO_3 .

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является развитие нелинейно-оптических методов генерации, спектрально-временного преобразования и детектирования терагерцового излучения, основанных на неколлинеарном фазовом синхронизме между терагерцовыми волнами и ультракороткими лазерными импульсами в кристаллических средах.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- теоретическое и экспериментальное исследование черенковской схемы генерации терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами применительно к полупроводниковым кристаллам типа цинковой обманки;
- разработка и экспериментальная апробация оптико-терагерцовых конверторов на основе кристалла LiNbO_3 с полуконическими кремниевыми элемен-

тами, обеспечивающими эффективный вывод в свободное пространство и коллимацию терагерцового излучения за счет использования явления полного внутреннего отражения;

– исследование возможностей создания в кристаллах фронтов плазмообразования с регулируемой скоростью движения и большой (в сотни микрон) длиной распространения в условиях многофотонного поглощения скошенных лазерных импульсов и исследование спектрально-временной трансформации терагерцовых импульсов на таких фронтах;

– разработка теории эллипсометрического электрооптического стробирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в режиме неколлинеарного фазового синхронизма.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложена и экспериментально продемонстрирована черенковская схема оптико-терагерцовой конверсии в слое полупроводникового кристалла, не требующая использования согласующих элементов для ввода излучения накачки в слой и вывода терагерцового излучения из слоя и обеспечивающая значительно большую эффективность конверсии по сравнению со стандартной коллинеарной схемой.

2. Разработаны и экспериментально продемонстрированы оптико-терагерцовые преобразователи с полуконическими кремниевыми элементами, обеспечивающими эффективный вывод черенковского конуса терагерцового излучения из кристалла LiNbO_3 в виде удобного для использования коллимированного пучка.

3. Предложен способ создания в кристаллах фронтов ионизации с регулируемой скоростью движения и большой (в сотни микрон) длиной распространения на основе многофотонного поглощения лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности. Впервые исследована трансформация терагерцового импульса при отражении от такого фронта.

4. Разработана теория эллипсометрического электрооптического стробирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в режиме неколлинеарного фазового синхронизма.

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложенная в диссертации эффективная и практически удобная схема генерации терагерцового излучения с накачкой слоя полупроводникового кристалла лазерными импульсами среднего ИК диапазона в условиях эффекта Брюстера и выводом половины черенковского клина терагерцовых волн из слоя по нормали может быть использована в качестве доступного источника терагерцового излучения.

Предложенные в диссертации высокоэффективные оптико-терагерцовые конверторы на основе кристалла LiNbO_3 с полуконическими кремниевыми элементами для вывода и коллимации терагерцового излучения перспективны для

использования в терагерцовых спектрометрах с накачкой излучением оптических осцилляторов в широком диапазоне длин волн (0,8-1,55 мкм).

Предложенный в диссертации способ создания в кристаллах фронтов фотоионизации с регулируемой скоростью движения и длиной распространения в сотни микрон может быть использован для доплеровского преобразования терагерцовых импульсов с целью оптимизации их спектрально-временных характеристиками для конкретных приложений.

Разработанная в диссертации теория эллипсометрического электрооптического стробирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в режиме неколлинеарного фазового синхронизма раскрывает преимущества и ограничения неколлинеарной схемы терагерцового детектирования и может быть использована на практике для оптимизации режима детектирования путем выбора кристалла-детектора, размера зондирующего оптического пучка и угла перекрытия терагерцового и оптического пучков.

Выносимые на защиту основные положения

1. Эффективная и практически удобная схема генерации терагерцового излучения может быть реализована при оптическом выпрямлении лазерных импульсов среднего ИК диапазона, например, с длиной волны 1,54 мкм, в слое полупроводникового кристалла типа цинковой обманки, например, GaP, толщиной в несколько миллиметров. В этой схеме сфокусированный в линию лазерный пучок *p*-поляризации вводится в слой под углом Брюстера ($\sim 72^\circ$) и распространяется в слое под углом к нормали, равном углу черенковского синхронизма с терагерцовыми волнами ($\sim 19^\circ$). При этом половина генерируемого лазерным импульсом черенковского клина выходит из слоя по нормали в виде терагерцового пучка с плоским волновым фронтом.

2. Черенковский конус терагерцовых волн, генерируемый в тонком слое LiNbO_3 фемтосекундным лазерным импульсом, может быть эффективно выведен из слоя в свободное пространство в виде удобного для использования коллимированного пучка при помощи прикрепленного к слою кремниевого полуконуса с углом при вершине $\approx 24,5^\circ$ (или двух полуконусов – с каждой стороны слоя). Терагерцовое излучение испытывает полное внутреннее отражение от боковой поверхности полуконуса и выходит через его основание по нормали. В силу слабой оптической дисперсии в LiNbO_3 схема совместима со всеми распространенными лазерами – с длинами волн 0,8, 1,06 и 1,55 мкм.

3. Эффективными доплеровскими преобразователями терагерцовых импульсов могут служить фронты ионизации с регулируемой скоростью движения и длиной распространения в сотни микрон, создаваемые в кристаллах при многофотонном поглощении лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности, например, при трехфотонном поглощении импульсов титан-сапфирового лазера с углом скоса $\sim 40^\circ$ и интенсивностью $\sim 50 - 100 \text{ ГВт/см}^2$ в кристалле ZnS. Изменение угла скоса импульса позволяет управлять скоростью фронта и, как результат, спектрально-временными характеристиками отраженного от фронта терагерцового импульса.

4. Неколлинеарная схема электрооптического стробирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами имеет свойства фильтра нижних частот с частотой отсечки, определяемой шириной лазерного пучка и углом пересечения терагерцового и лазерного пучков в режиме черенковского синхронизма. При использовании полупроводниковых кристаллов (GaAs, GaP) и лазера с длиной волны 1,55 мкм малость угла синхронизма ($\sim 12^\circ - 15^\circ$) обеспечивает детектирование частот до ~ 3 ТГц. В кристалле LiNbO₃ с углом синхронизма $\sim 63^\circ$ частоты ограничены ~ 2 ТГц.

Методология и методы исследования

В главах 1 и 2 использовались экспериментальные установки, основанные на апробированной методологии терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS). Лазерный пучок делился на два – пучок накачки для генерации терагерцового излучения и зондирующий пучок для детектирования терагерцового излучения методом электрооптического стробирования. В качестве источников оптического излучения использовались фемтосекундные осцилляторы – волоконный эрбиевый лазер C-Fiber (Menlo Systems, Германия) с длиной волны 1,55 мкм и титан-сапфировый лазер Tsunami (Spectra-Physics, США) с длиной волны 0,8 мкм, а также иттербиевая лазерная система с усилителем TETA (Авеста, Россия) с длиной волны 1,03 мкм и оптический параметрический усилитель PARUS (Авеста, Россия). Длительность лазерных импульсов измерялась автокоррелятором Mini TPA (APE, Германия). Оптическая мощность контролировалась измерителем мощности PM100A (Thorlabs, США). Мощность терагерцового излучения измерялась ячейкой Голя GC-1D (Тидекс, Россия). Для измерения поперечных профилей оптического и терагерцового пучков использовались CCD-камера pco.pixelply usb (Excelitas PCO GmbH, Германия) и терагерцовая камера IRV-T0831C (NEC, США). Спектры измеренных терагерцовых волновых форм рассчитывались методом быстрого преобразования Фурье.

В главах 1 и 3 для численного моделирования волновых процессов применялся метод конечных разностей во временной области (finite-difference time-domain method, FDTD). Программные коды были написаны на языке программирования MATLAB.

Теоретические исследования в главе 4 основаны на аналитическом решении волнового уравнения с нелинейным источником. При решении применялись методы Фурье и медленно меняющихся амплитуд, а также параксиальное приближение. Расчет преобразования поляризации зондирующего оптического пучка на элементах эллипсометрической схемы проводился с использованием матриц Джонса.

Апробация результатов работы и публикации

Диссертационная работа выполнена на кафедре общей физики радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в 2020-2025 годах. По теме диссертации опубликовано 14 работ,

в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [A1-A6], 1 патент на изобретение [A7] и 7 работ в сборниках трудов конференций [A8-A14].

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: XIII Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн (Нижний Новгород, 2025), 21st International Conference Laser Optics (ICLO 2024, Санкт-Петербург, 2024), XIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2024), 5-й Конференции с международным участием «Терагерцевое и микроволновое излучение: генерация, детектирование и приложения» (TERA-2023, Москва, 2023), VI International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2022, Москва, 2022), 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE-2021, Сендай, Япония, 2021), XXV Нижегородской сессии молодых учёных (Нижний Новгород, 2020).

Работа частично выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (направление «Физика высоких плотностей энергии»).

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных экспериментальных, теоретических и численных методов, согласованием результатов диссертационной работы в частных случаях с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов, а также апробацией результатов на международных конференциях и публикациями в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах.

Личный вклад автора

Постановка задач и анализ полученных результатов проводились автором совместно с научным руководителем Бакуновым М.И. и другими соавторами опубликованных работ. Экспериментальные исследования в главах 1 и 2 проводились автором совместно с Шугуровым А.И., численные расчеты в главе 3 проводились автором лично, теоретические расчеты в главе 4 проводились автором совместно с научным руководителем Бакуновым М.И.

Структура и объем диссертации

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.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, указывается научная новизна, а

также теоретическая и практическая значимость работы, кратко описывается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена исследованию перспективности применения полупроводниковых кристаллов в качестве рабочей среды для черенковской схемы опико-терагерцовой конверсии. Теоретические и экспериментальные исследования проведены на примере кристалла GaP с накачкой на длине волны 1,54 мкм.

В п. 1.1 предложена практически удобная схема терагерцовой генерации (рис. 1), в которой лазерный пучок накачки падает под углом Брюстера ($\approx 72^\circ$) на входную грань кристалла GaP с ориентацией $\langle 110 \rangle$ в плоскости, перпендикулярной оси $[001]$ кристалла. Пучок сфокусирован в линию, перпендикулярную плоскости падения, и имеет p -поляризацию. Падение под углом Брюстера обеспечивает как максимальное прохождение пучка накачки в кристалл, так и его распространение в кристалле под углом к нормали, близком к углу черенковского синхронизма с терагерцовыми волнами ($\approx 19^\circ$). При этом половина генерируемого лазерным импульсом черенковского клина выходит из пластинки по нормали в виде удобного для использования терагерцового пучка с плоским волновым фронтом. Работоспособность схемы подтверждена численным моделированием методом FDTD. В расчетах учитывалось трехфотонное поглощение накачки.

В п. 1.2 дано описание экспериментальной установки и приведены полученные результаты. В качестве накачки в установке использовалось излучение оптического параметрического усилителя с длиной волны 1,54 мкм, длительностью импульсов 140 фс, частотой повторения 1 кГц и энергией импульса 15 мкДж. С помощью ячейки Голя получены зависимости эффективности опико-терагерцовой конверсии от интенсивности накачки для кристаллов различной толщины (рис. 2). Максимальная эффективность составила $\sim 3 \times 10^{-5}$, что по крайней

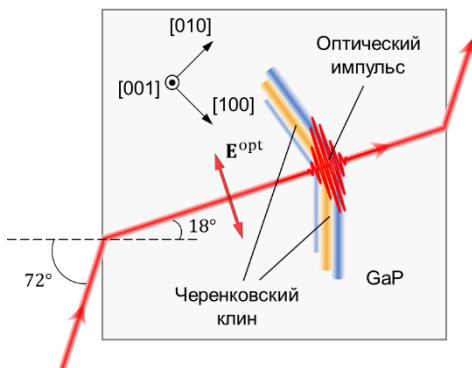


Рис. 1. Схема генерации терагерцового излучения в кристалле GaP.

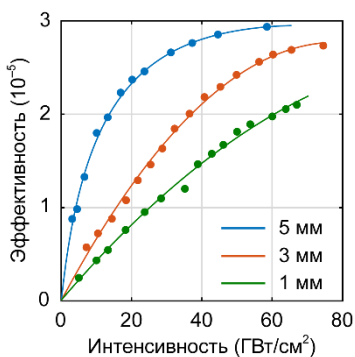


Рис. 2. Эффективность опико-терагерцовой конверсии в зависимости от интенсивности накачки при различной толщине кристалла GaP.

мере на порядок больше, чем для традиционной коллинеарной схемы конверсии. Измеренные методом электрооптического стробирования волновые формы терагерцового излучения имеют характерный для черенковского излучения вид биполярного импульса с шириной спектра $\sim 2,5$ ТГц.

В п. 1.3 сделаны выводы по первой главе.

Вторая глава посвящена разработке и экспериментальной апробации оптико-терагерцовых конверторов на основе кристалла LiNbO_3 , специализированных под накачку фемтосекундными оптическими осцилляторами за счет использования кремниевых полуконусов полного внутреннего отражения для вывода терагерцового излучения из кристалла.

В п. 2.1 проведен теоретический анализ и экспериментальное исследование возможностей использования оптико-терагерцового конвертора с кремниевыми призмами полного внутреннего отражения, разработанного ранее под накачку сфокусированного в линию излучения лазерного усилителя [21], для преобразования сфокусированного в пятно излучения оптического осциллятора. На основе рассмотрения хода терагерцовых лучей показано, что значительная часть генерируемого терагерцового излучения не может выйти из призм из-за полного внутреннего отражения на их выходных гранях, а вышедшая часть имеет вид расходящегося пучка. Неоптимальность работы призмленного конвертора в режиме сферической фокусировки накачки оценена экспериментально путем сравнения с известными результатами для режима цилиндрической фокусировки. Несмотря на неоптимальность работы конвертора продемонстрирована эффективность преобразования, в 6 раз превышающая эффективность распространенной коллинеарной схемы на основе кристалла ZnTe при одинаковой накачке.

В п. 2.2 предложена и экспериментально апробирована схема конвертора (рис. 3), состоящего из тонкого (в нашем эксперименте – толщиной 20 мкм) слоя кристалла LiNbO_3 на подложке из плавного кварца и прикрепленного к слою с другой стороны кремниевому усеченному полуконусу, предназначенного для вывода терагерцового излучения из слоя в свободное пространство. Угол при

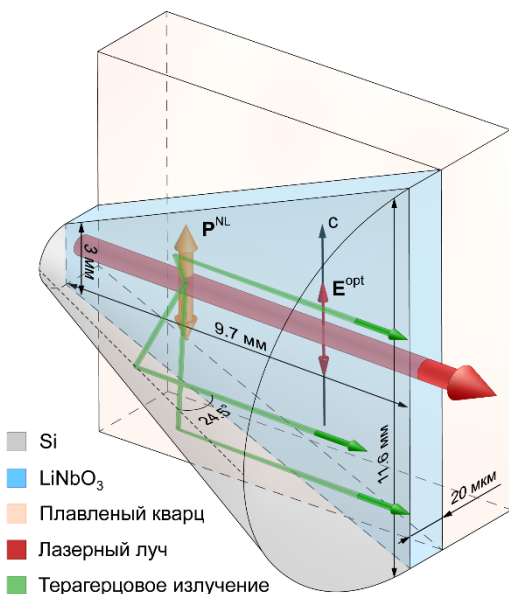


Рис. 3. Оптико-терагерцовый конвертор с кремниевым полуконусом для вывода терагерцового излучения.

вершине кремниевого полуконуса выбран таким ($\approx 24,5^\circ$), что полуконус черенковского излучения, выходящего в кремний из кристалла, испытывает полное внутреннее отражение от боковой поверхности кремниевого полуконуса и выходит через его основание в свободное пространство в виде параллельного пучка.

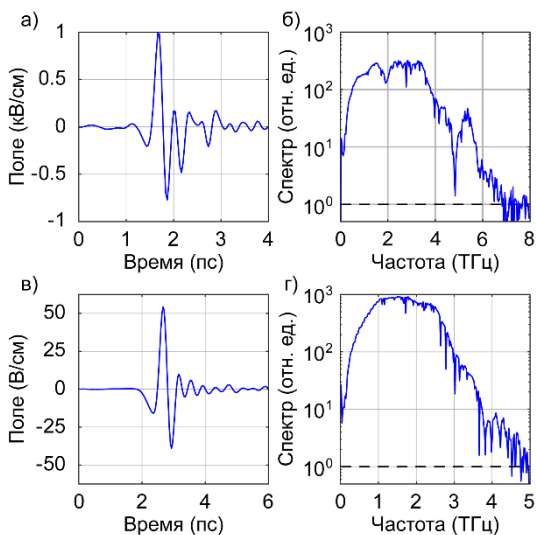


Рис. 4. Временные формы (а, в) и спектры (б, г) терагерцевых импульсов, генерируемых при накачке импульсами титан-сапфирового лазера конверторов с односторонним (а, б) и двусторонним (в, г) выводом излучения.

Конвертора титан-сапфировым осциллятором достигнута рекордная (для осцилляторов) эффективность конверсии 0,06%. Временная форма терагерцевых импульсов содержит несколько осцилляций, ширина спектра импульсов достигает 6 ТГц (рис. 4а, б).

В п. 2.3 предложена и экспериментально апробирована схема конвертора с двусторонним выводом излучения из слоя кристалла LiNbO_3 через два кремниевых полуконуса, прикрепленных к слою с обеих сторон. Данная схема позволяет генерировать терагерцевые импульсы (рис. 4в) без интерференционного провала в спектре (ср. рис. 4г с 4б).

Экспериментально продемонстрирована эффективная работа конвертора при накачке фемтосекундными осцилляторами с различной длиной волны (титан-сапфировым лазером с длиной волны 800 нм и волоконным лазером с длиной волны 1,55 мкм).

В п. 2.4 сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена исследованию возможностей создания в кристаллах фронтов плазмообразования с регулируемой скоростью движения и большой (в сотни микрон) длиной распространения в условиях многофотонного

Теоретически и экспериментально показано, что поляризация терагерцевого поля на выходе является преимущественно линейной (вертикальной на рис. 3): эллиптичность составляет $\sim 10\%$. Профиль выходного терагерцевого пучка является серповидным с размерами $\sim 1 \text{ мм} \times 4 \text{ мм}$. Для фокусировки такого пучка предложено использовать комбинацию цилиндрического и сферического параболических зеркал (вместо обычно используемых двух сферических), что обеспечивает фокусировку в пятно субмиллиметрового размера.

При накачке конвер-

тора титан-сапфировым осциллятором достигнута рекордная (для осцилляторов) эффективность конверсии 0,06%. Временная форма терагерцевых импульсов содержит несколько осцилляций, ширина спектра импульсов достигает 6 ТГц (рис. 4а, б).

В п. 2.3 предложена и экспериментально апробирована схема конвертора с двусторонним выводом излучения из слоя кристалла LiNbO_3 через два кремниевых полуконуса, прикрепленных к слою с обеих сторон. Данная схема позволяет генерировать терагерцевые импульсы (рис. 4в) без интерференционного провала в спектре (ср. рис. 4г с 4б).

Экспериментально продемонстрирована эффективная работа конвертора при накачке фемтосекундными осцилляторами с различной длиной волны (титан-сапфировым лазером с длиной волны 800 нм и волоконным лазером с длиной волны 1,55 мкм).

В п. 2.4 сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена исследованию возможностей создания в кристаллах фронтов плазмообразования с регулируемой скоростью движения и большой (в сотни микрон) длиной распространения в условиях многофотонного

поглощения скошенных лазерных импульсов, а также исследованию спектрально-временной трансформации терагерцовых импульсов при отражении от таких фронтов.

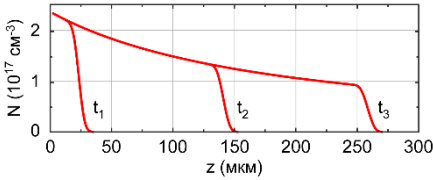


Рис. 5. Моментальные снимки распределения концентрации плазмы $N(z)$, создаваемой в кристалле ZnS импульсами титан-сапфирового лазера с углом скоса 45° , длительностью 100 фс, и пиковой интенсивностью 100 ГВт/см².

Скорость фронта определяется формулой $V = (c/n_g) \cos \alpha$, где c – скорость света, n_g – оптический групповой индекс, а α – угол скоса фронта интенсивности лазерного импульса по отношению к его фазовым фронтам. Чтобы фронт ионизации двигался медленнее терагерцовых волн (они могли отражаться от фронта), угол скоса должен удовлетворять условию $\alpha > 34^\circ$.

В п. 3.2 путем прямого численного интегрирования уравнений Максвелла методом FDTD проведено моделирование отражения терагерцового импульса от фронта ионизации в кристалле ZnS. Исследовано влияние параметров лазерного импульса (интенсивности, угла скоса) на временную форму и спектр отраженного терагерцового импульса (рис. 6). Определены оптимальные значения параметров: $I_0 \sim 100$ ГВт/см² и $\alpha > 40^\circ$.

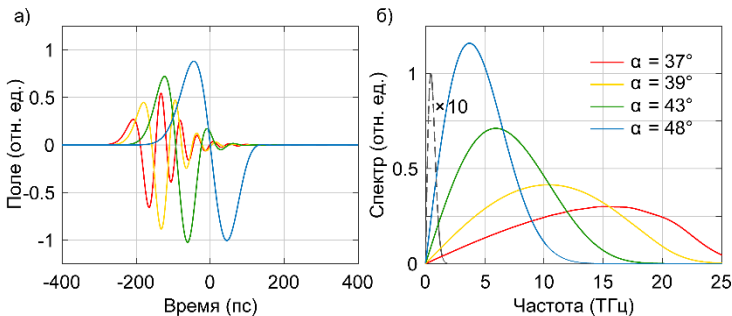


Рис. 6. Осциллограммы (а) и спектры (б) отраженного терагерцового импульса при пиковой интенсивности накачки 200 ГВт/см² и различных значениях угла скоса. Пунктирной линией показан спектр падающего терагерцового импульса (нужно умножить на 10).

В п. 3.3 сделаны выводы по третьей главе.

Четвертая глава посвящена разработке теории эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в условиях неколлинеарного распростране-

ния измеряемого терагерцового и зондирующего лазерного импульсов в электрооптическом кристалле. Теория аналитически описывает модуляцию поляризации фемтосекундного зондирующего импульса как результат его нелинейного взаимодействия с терагерцовым полем.

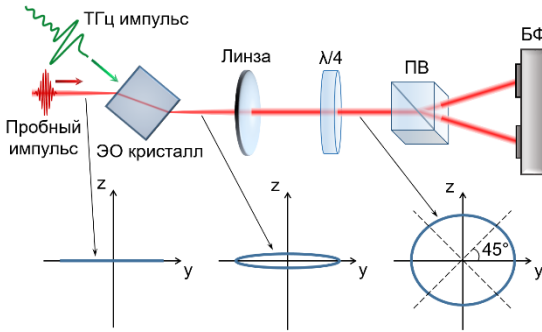


Рис. 7. Схема неколлинеарного детектирования с эллиптическими элементами: пластинкой $\lambda/4$, призмой Волластона (ПВ) и балансным фотодетектором (БФ). Показана поляризация зондирующего импульса в разных местах схемы.

На входе поляризация зондирующего пучка совпадает с поляризацией терагерцового, на выходе в результате нелинейного оптико-терагерцового взаимодействия у зондирующего пучка появляется ортогональная компонента. В результате решения волнового уравнения с нелинейным источником для ортогональной компоненты и последующего применения матриц Джонса для описания преобразования поляризации зондирующего пучка в оптических элементах получено выражение для выходного сигнала детектирующей схемы.

Исходя из полученного выражения, установлено, что неколлинеарная схема детектирования имеет свойства фильтра нижних частот с частотой отсечки, определяемой шириной лазерного пучка и углом пересечения терагерцового и лазерного пучков в режиме черенковского синхронизма.

В п. 4.2 на основе развитого общего формализма проведен анализ практически важных случаев неколлинеарного детектирования терагерцовых волн импульсами волоконного лазера (с длиной волны 1,55 мкм) в кристалле GaAs и импульсами титан-сапфирового лазера (с длиной волны 0,8 мкм) в кристалле LiNbO₃. Установлено влияние

В п. 4.1 сформулирована теоретическая модель процесса электрооптического детектирования и развит формализм, позволяющий рассчитывать выходной сигнал эллипсометрической схемы. Зондирующий лазерный пучок считается осесимметричным с гауссовым поперечным профилем, терагерцовый пучок имеет равномерное распределение поля по ширине и наклонен по отношению к зондирующему пучку (рис. 7).

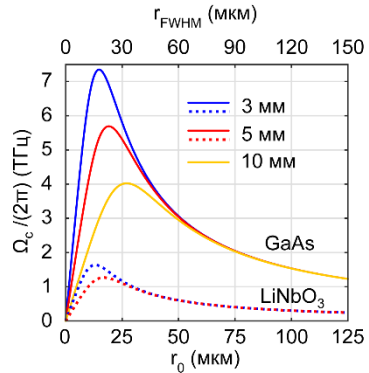


Рис. 8. Зависимость частота отсечки детектирования от радиуса зондирующего пучка при различных значениях длины оптико-терагерцового взаимодействия.

длины оптико-терагерцового взаимодействия и радиуса оптического пучка на частоту отсечки детектирования (рис. 8) и на форму выходного сигнала. Указаны оптимальные значения параметров для эффективного детектирования. Показано влияние дисперсии на спектр выходного сигнала.

В п. 4.3 сделаны выводы по четвертой главе.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

Основные результаты

1. Предложена эффективная и практически удобная схема генерации терагерцового излучения с накачкой слоя полупроводникового кристалла типа цинковой обманки лазерными импульсами среднего ИК диапазона в условиях эффекта Брюстера и выводом половины черенковского клина терагерцовых волн из слоя по нормали. Экспериментально продемонстрировано преобразование лазерных импульсов с длиной волны 1,54 мкм, длительностью 140 фс и энергией 11 мкДж в терагерцовое излучение с шириной спектра $\sim 2,5$ ТГц с эффективностью 0,003% в кристалле GaP.

2. Разработан и экспериментально продемонстрирован преобразователь импульсов фемтосекундных оптических осцилляторов в коллимированное терагерцовое излучение, представляющий собой тонкий слой кристалла LiNbO_3 , расположенный между кварцевой подложкой и кремниевым полуконусом полного отражения с углом при вершине $24,5^\circ$. Импульсы титан-сапфирового лазера с длиной волны 0,8 мкм, длительностью 90 фс и энергией 7 нДж преобразованы в терагерцовое излучение с шириной спектра ~ 6 ТГц 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. Хорошее качество коллимации терагерцового пучка подтверждено его фокусировкой в пятно субмиллиметровых размеров.

3. Экспериментально показано, что двусторонний вывод терагерцового излучения из слоя LiNbO_3 через два кремниевых полуконуса полного отражения обеспечивает формирование единого коллимированного терагерцового пучка и подавление интерференционного провала в генерируемом спектре. Демонстрирована работоспособность конвертора с двусторонним выводом излучения при накачке лазерами различной длины волны. Импульсы титан-сапфирового лазера с длиной волны 0,8 мкм, длительностью 90 фс и энергией 7 нДж преобразованы в терагерцовое излучение с эффективностью 0,05%, а импульсы волоконного лазера с длиной волны 1,55 мкм, длительностью 90 фс и энергией 2,5 нДж – с эффективностью 0,003%.

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 тера-

герцового импульса при его отражении от фронта трехфотонной ионизации, создаваемого в кристалле ZnS импульсами титан-сапфирового лазера с интенсивностью $\sim 50 - 100$ ГВт/см². Показано, что большая длина распространения фронта (несколько сотен микрон) и высокая концентрация создаваемой на фронте плазмы ($\sim 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³) обеспечивают многократную временную компрессию и уширение спектра терагерцового импульса при отражении с сохранением его амплитуды. Преобразованием терагерцового импульса можно управлять путем изменения угла скоса лазерного импульса, определяющего скорость фронта.

5. Разработана теория терагерцового детектирования, описывающая модуляцию поляризации зондирующего лазерного пучка при неколлинеарном нелинейном взаимодействии с терагерцовой волной в электрооптическом кристалле. Теория учитывает конечную ширину терагерцового и зондирующего пучков. Установлено, что неколлинеарная схема имеет свойства терагерцового фильтра нижних частот, что может приводить к искажению детектируемого сигнала. Показано, что при использовании полупроводниковых кристаллов (GaAs, GaP) и лазера с длиной волны 1,55 мкм схема обеспечивает детектирование частот до ~ 3 ТГц. В кристалле LiNbO₃ детектируемые частоты ограничены ~ 2 ТГц.

Список литературы

1. **Ying, J.** High gradient terahertz-driven ultrafast photogun / J. Ying, X. He, D. Su [et al.] // *Nat. Photonics*. – 2024. – Vol. 18. – № 7. – P. 758–765.
2. **Baierl, S.** Nonlinear spin control by terahertz-driven anisotropy fields / S. Baierl, M. Hohenleutner, T. Kampfrath [et al.] // *Nat. Photonics*. – 2016. – Vol. 10. – № 11. – P. 715–718.
3. **Luo, L.** Ultrafast terahertz snapshots of excitonic Rydberg states and electronic coherence in an organometal halide perovskite / L. Luo, L. Men, Z. Liu [et al.] // *Nat. Commun.* – 2017. – Vol. 8. – № 1. – P. 15565.
4. **Strag, M.** Non-destructive inspection of military-designated composite materials with the use of terahertz imaging / M. Strag, W. Świdorski // *Compos. Struct.* – 2023. – Vol. 306. – P. 116588.
5. **Li, H.** Application of terahertz detection technology in non-destructive thickness measurement / H. Li, Z. Zhang, H. Nian [et al.] // *Photonics*. – 2025. – Vol. 12. – № 12. – P. 1191.
6. **Zhang, P.** Measurement of stress in thermal barrier coatings using terahertz time domain spectroscopy / P. Zhang, Z. Wang, K. Tan [et al.] // *Opt. Lasers Eng.* – 2025. – Vol. 191. – P. 109021.
7. **Yu, P.** Recent developments and applications of terahertz spectroscopy in food analysis / P. Yu, C. Shen, W. Zhu [et al.] // *Biosensors*. – 2025. – Vol. 15. – № 10. – P. 677.
8. **Bacon, D. R.** Photoconductive emitters for pulsed terahertz generation / D. R. Bacon, J. Madéo, K. M. Dani // *J. Opt.* – 2021. – Vol. 23. – P. 064001.

9. **Fülöp, J. A.** Laser-driven strong-field terahertz sources / J. A. Fülöp, S. Tzortzakis, T. Kampfrath // *Adv. Opt. Mater.* – 2020. – Vol. 8. – P. 1900681.
10. **Blanchard, F.** Generation of 1.5 μJ single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture ZnTe crystal / F. Blanchard, L. Razzari, H.-C. Bandulet [et al.] // *Opt. Express.* – 2007. – Vol. 15. – № 20. – P. 13212–13220.
11. **Polónyi, G.** High-energy terahertz pulses from semiconductors pumped beyond the three-photon absorption edge / G. Polónyi, B. Monoszlai, G. Gäumann [et al.] // *Opt. Express.* – 2016. – Vol. 24. – № 21. – P. 23872–23882.
12. **Jazbinsek, M.** Organic crystals for THz photonics / M. Jazbinsek, U. Puc, A. Abina, A. Zidansek // *Appl. Sci.* – 2019. – Vol. 9. – № 5. – P. 882.
13. **Tóth, G.** Tilted pulse front pumping techniques for efficient terahertz pulse generation / G. Tóth, G. Polónyi, J. Hebling // *Light: Sci. Appl.* – 2023. – Vol. 12. – № 1. – P. 256.
14. **Wu, X.** Generation of 13.9-mJ terahertz radiation from lithium niobate materials / X. Wu, D. Kong, S. Hao [et al.] // *Adv. Mater.* – 2023. – Vol. 35. – P. 2208947.
15. **Auston, D. H.** Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media / D. H. Auston, K. P. Cheung, J. A. Valdmanis, D. A. Kleinman // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – Vol. 56. – P. 506–508.
16. **Askar'yan, G. A.** Cherenkov radiation from optical pulses / G. A. Askar'yan // *Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 57. – № 19. – P. 2470.
17. **Avetisyan, Y.** Analysis of THz-wave surface-emitted difference-frequency generation in periodically poled lithium niobate waveguide / Y. Avetisyan, Y. Sasaki, H. Ito // *Appl. Phys. B.* – 2001. – Vol. 73. – № 5. – P. 511–514.
18. **Theuer, M.** Efficient generation of Cherenkov-type terahertz radiation from a lithium niobate crystal with a silicon prism output coupler / M. Theuer, G. Torosyan, C. Raue [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 88. – № 7. – P. 071122.
19. **Stepanov, A. G.** THz generation via optical rectification with ultrashort laser pulse focused to a line / A. G. Stepanov, J. Hebling, J. Kuhl // *Appl. Phys. B.* – 2005. – Vol. 81. – № 1. – P. 23–26.
20. **Bodrov, S. B.** Efficient Cherenkov emission of broadband terahertz radiation from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core / S. B. Bodrov, M. I. Bakunov, M. Hangyo // *J. Appl. Phys.* – 2008. – Vol. 104. – № 9. – P. 093105.
21. **Bakunov, M. I.** Efficient Cherenkov-type optical-to-terahertz converter with terahertz beam combining / M. I. Bakunov, E. S. Efimenko, S. D. Gorelov [et al.] // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45. – № 13. – P. 3533–3536.
22. **Abramovsky, N. A.** Generation of sub-MV/cm terahertz fields with large-size Cherenkov-type optical-to-terahertz converters / N. A. Abramovsky, S. B. Bodrov, A. I. Korytin, A. N. Stepanov, M. I. Bakunov // *Opt. Lett.* – 2023. – Vol. 48. – № 12. – P. 3203–3206.
23. **Bodrov, S. B.** Highly efficient Cherenkov-type terahertz generation by 2- μm wavelength ultrashort laser pulses in a prism-coupled LiNbO₃ layer / S. B. Bodrov, I. E. Ilyakov, B. V. Shishkin, M. I. Bakunov // *Opt. Express.* – 2019. – Vol. 27. – № 25. – P. 36059–36065.

24. **Fülöp, J. A.** Design of high-energy terahertz sources based on optical rectification / J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, G. Almási, J. Hebling // *Opt. Express*. – 2010. – Vol. 18. – P. 12311–12327.
25. **Bakunov, M. I.** Terahertz generation with tilted-front laser pulses in a contact-grating scheme / M. I. Bakunov, S. B. Bodrov // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2014. – Vol. 31. – P. 2549–2557.
26. **Blanchard, F.** Terahertz pulse generation from bulk GaAs by a tilted-pulse-front excitation at 1.8 μm / F. Blanchard, B. Schmidt, X. Ropagnol [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 105. – № 24. – P. 241106.
27. **Fülöp, J.** Highly efficient scalable monolithic semiconductor terahertz pulse source / J. Fülöp, G. Polónyi, B. Monoszlai [et al.] // *Optica*. – 2016. – Vol. 3. – № 10. – P. 1075–1078.
28. **Fu, X.** Applications of terahertz spectroscopy in the detection and recognition of substances / X. Fu, Y. Liu, Q. Chen [et al.] // *Front. Phys.* – 2022. – Vol. 10. – P. 869537.
29. **Allerbeck, J.** Efficient and continuous carrier-envelope phase control for terahertz lightwave-driven scanning probe microscopy / J. Allerbeck, J. Kuttruff, L. Bobzien [et al.] // *ACS Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – P. 3888–3895.
30. **Bakunov, M. I.** Efficient Cherenkov-type terahertz generation in Si-prism-LiNbO₃-slab structure pumped by nanojoule-level ultrashort laser pulses / M. I. Bakunov, E. A. Mashkovich, M. V. Tsarev, S. D. Gorelov // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – № 15. – Art. 151102.
31. **Carnio, B. N.** Nonlinear photonic waveguides: A versatile platform for terahertz radiation generation (a review) / B. N. Carnio, O. Moutanabbir, A. Y. Elezzabi // *Laser Photonics Rev.* – 2023. – Vol. 17. – № 4. – P. 2200138.
32. **Takeya, K.** Wide spectrum terahertz-wave generation from nonlinear waveguides / K. Takeya, K. Suizu, H. Sai [et al.] // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2012. – Vol. 19. – № 1. – P. 8500212.
33. **Takeya, K.** Enhanced Cherenkov phase matching terahertz wave generation via a magnesium oxide doped lithium niobate ridged waveguide crystal / K. Takeya, T. Minami, H. Okano [et al.] // *APL Photonics*. – 2017. – Vol. 2. – P. 016102.
34. **Kitaeva, G. K.** Prism couplers with convex output surfaces for nonlinear Cherenkov terahertz generation / G. K. Kitaeva, D. A. Markov, D. A. Safronenkov [et al.] // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – P. 450.
35. **Kitaeva, G. K.** An improvement of the Cherenkov THz generation scheme using convex silicon prism-lens adapters / G. K. Kitaeva, D. A. Safronenkov, N. V. Starkova // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – P. 1145.
36. **Einstein, A.** Zur Elektrodynamik bewegter Körper / A. Einstein // *Annalen der Physik*. – 1905. – Vol. 322. – № 10. – P. 891–921.
37. **Kapteyn, H. C.** Relativistic pulse compression / H. C. Kapteyn, M. M. Murnane // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 1991. – Vol. 8. – № 8. – P. 1657–1662.
38. **Kiefer, D.** Relativistic electron mirrors from nanoscale foils for coherent frequency upshift to the extreme ultraviolet / D. Kiefer, M. Yeung, T. Dzelzainis [et al.] // *Nat. Commun.* – 2013. – Vol. 4. – № 1. – P. 1763.

39. **Semenova, V. I.** Reflection of electromagnetic waves from an ionization front / V. I. Semenova // Radiophys. Quantum Electron. – 1967. – Vol. 10. – № 8. – P. 599–604.
40. **Savage, R.** Frequency upshifting and pulse compression via underdense relativistic ionization fronts / R. Savage, R. Brogle, W. Mori, C. Joshi // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1993. – Vol. 21. – № 1. – P. 5–19.
41. **Berezhiani, V. I.** Multiple reflections: cascaded upshifting of laser pulses by semiconductors / V. I. Berezhiani, S. M. Mahajan, R. Miklaszewski // J. Opt. Soc. Am. B. – 2001. – Vol. 18. – № 5. – P. 617–622.
42. **Bae, J.** Doppler frequency up conversion of electromagnetic waves in a slotline on an optically excited silicon substrate / J. Bae, Y. J. Xian, S. Yamada, R. Ishikawa // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 94. – № 9. – P. 091120.
43. **Meng, F.** Relativistic Doppler frequency up-conversion of terahertz pulses reflecting from a photoinduced plasma front in silicon / F. Meng, M. D. Thomson, H. G. Roskos // Phys. Rev. B. – 2014. – Vol. 90. – № 15. – P. 155207.
44. **Tani, M.** Efficient electro-optic sampling detection of terahertz radiation via Cherenkov phase matching / M. Tani, K. Horita, T. Kinoshita [et al.] // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19. – P. 19901–19906.
45. **Mashkovich, E. A.** Noncollinear electro-optic sampling of terahertz waves in a thick GaAs crystal / E. A. Mashkovich, A. I. Shugurov, S. Ozawa [et al.] // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2015. – Vol. 5. – P. 732–736.
46. **Shugurov, A. I.** Noncollinear electro-optic sampling detection of terahertz pulses in a LiNbO₃ crystal while avoiding the effect of intrinsic birefringence / A. I. Shugurov, S. B. Bodrov, E. A. Mashkovich [et al.] // Opt. Express. – 2022. – Vol. 30. – P. 3741–3748.
47. **Gallot, G.** Electro-optic detection of terahertz radiation / G. Gallot, D. Grischkowsky // J. Opt. Soc. Am. B. – 1999. – Vol. 16. – P. 1204–1212.
48. **Bakunov, M. I.** Nonellipsometric noncollinear electrooptic sampling of terahertz waves: A comprehensive theory / M. I. Bakunov, S. D. Gorelov, M. Tani // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. – 2016. – Vol. 6. – P. 473–479.

Список публикаций по диссертации

- [A1] **Bakunov, M. I.** Broadband highly efficient source of collimated terahertz radiation driven by an ultrafast optical oscillator / M. I. Bakunov, M. A. Kurnikov, A. I. Shugurov, S. B. Bodrov // Optics Letters. – 2025. – Vol. 50. – № 2. – P. 586–589.
- [A2] **Bakunov, M. I.** Femtosecond oscillator driven terahertz emitter with conical totally internally reflective radiation extractor / M. I. Bakunov, M. A. Kurnikov, A. I. Shugurov, S. B. Bodrov // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2024. – Vol. 15. – № 1. – P. 84–90.
- [A3] **Kurnikov, M. A.** Efficient Cherenkov-type optical-to-terahertz conversion of femtosecond oscillator pulses / M. A. Kurnikov, N. A. Abramovsky, A. I. Shugurov, S. B. Bodrov, M. I. Bakunov // Photonics. – 2024. – Vol. 11. – № 1. – P. 62.

- [A4] **Kurnikov, M. A.** Noncollinear electro-optic detection of terahertz waves: advantages and limitations / M. A. Kurnikov, M. I. Bakunov // *Journal of Applied Physics*. – 2024. – Vol. 135. – № 16. – P. 163102.
- [A5] **Bodrov, S. B.** Cherenkov-type terahertz generation by long-wavelength ultrafast laser excitation of a GaP Crystal / S. B. Bodrov, A. I. Shugurov, E. S. Efimenko, M. A. Kurnikov, I. E. Ilyakov, B. V. Shishkin, M. I. Bakunov // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10. – № 12. – P. 1309.
- [A6] **Kurnikov, M. A.** Long propagating velocity-controlled Einstein’s mirror for terahertz light conversion / M. A. Kurnikov, A. L. Novokovskaya, E. S. Efimenko, M. I. Bakunov // *Optics Express*. – 2020. – Vol. 28. – № 22. – P. 33084–33093.
- [A7] **Патент № 2836612 Российская Федерация, МПК G02F 2/02, G02F 1/35.** Оптико-терагерцовый преобразователь с полуконическими элементами вывода терагерцового излучения: № 2024128282 : заявл. 30.10.2024 : опубл. 18.03.2025, Бюл. № 8 / Бакунов М. И., Бодров С. Б., Шугуров А. И., Курников М. А. ; заявитель Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (Госкорпорация «Росатом»), Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). – 11 с. : ил.
- [A8] **Курников, М. А.** Эффективный преобразователь импульсов фемтосекундного оптического осциллятора в коллимированное терагерцовое излучение / М. А. Курников, А. И. Шугуров, С. Б. Бодров, М. И. Бакунов // XIII Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн: сборник тезисов, Нижний Новгород, Россия, 24–28 февраля, 2025. – С. 81.
- [A9] **Kurnikov, M. A.** Fiber laser driven terahertz generation in a LiNbO₃ layer sandwiched between Si prisms / M. A. Kurnikov, A. I. Shugurov, M. I. Bakunov // 2024 International Conference Laser Optics (ICLO 2024), Saint Petersburg, Russia, 1–5 July, 2024. IEEE. – P. 293.
- [A10] **Курников, М. А.** Черенковская схема генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении в полупроводниковых кристаллах / М. А. Курников, А. И. Шугуров, С. Б. Бодров, М. И. Бакунов // XIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник трудов конференции, Москва, Россия, 24–26 января, 2024. – Т. 24. – С. 55–56.
- [A11] **Kurnikov, M. A.** Noncollinear ellipsometric detection of terahertz waves: a comprehensive study / M. A. Kurnikov, A. I. Shugurov, M. I. Bakunov // 5th Conference with International participation «Terahertz and microwave radiation: generation, detection and application»: abstract book, Moscow, Russia, 27 February – 2 March, 2023. – P. 86–87.
- [A12] **Kurnikov, M. A.** Terahertz light conversion at a photoionization front in ZnS / M. A. Kurnikov, A. L. Novokovskaya, E. S. Efimenko, M. I. Bakunov // VI

International Conference «UltrafastLight-2022»: book of abstracts, Moscow, Russia, 3–7 October, 2022. – P. 82.

- [A13] **Kurnikov, M. A.** Multiphoton ionization fronts in ZnS for terahertz light conversion / M. A. Kurnikov, A. L. Novokovskaya, E. S. Efimenko, M. I. Bakunov // 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium in Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies: book of abstracts, Sendai, Japan, 1–4 November, 2021. – P. 54–55.
- [A14] **Курников, М. А.** Преобразование терагерцевых импульсов на фронте ионизации в кристалле ZnS / М. А. Курников, А. Л. Новоковская, Е. С. Ефименко, М. И. Бакунов // XXV Нижегородская сессия молодых учёных (технические, естественные, гуманитарные науки): сборник 25 сессии молодых ученых, Нижний Новгород, Россия, 10–13 ноября, 2020. – С. 235–237.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Черенковская генерация терагерцового излучения при оптическом выпрямлении импульсов параметрического усилителя в слое GaP

- 1.1. Схема генерации и численное моделирование
- 1.2. Экспериментальная установка и анализ экспериментальных результатов
- 1.3. Выводы по главе 1

Глава 2. Оптико-терагерцовые конверторы импульсов фемтосекундных осцилляторов с коллимирующими элементами на основе явления полного внутреннего отражения

- 2.1. Анализ работы конвертора с призмными коллимирующими элементами в режиме накачки осциллятором
- 2.2. Оптико-терагерцовый конвертор с односторонним выводом терагерцового излучения через полуконический элемент
 - 2.2.1. Устройство и принцип работы конвертора
 - 2.2.2. Анализ поляризации и поперечного профиля терагерцового пучка
 - 2.2.3. Экспериментальные результаты при накачке импульсами титан-сапфирового лазера
- 2.3. Оптико-терагерцовый конвертор с двусторонним выводом терагерцового излучения через полуконические элементы
 - 2.3.1. Устройство и принцип работы конвертора
 - 2.3.2. Экспериментальные результаты при накачке импульсами титан-сапфирового лазера
 - 2.3.3. Экспериментальные результаты при накачке импульсами волоконного лазера
- 2.4. Выводы по главе 2

Глава 3. Спектрально-временное преобразование терагерцовых импульсов на фронте фотоионизации в кристалле ZnS

- 3.1. Эволюция фронта трехфотонной ионизации в кристалле ZnS
- 3.2. Трансформация терагерцового импульса на фронте ионизации
- 3.3. Выводы по главе 3

Глава 4. Теория неколлинеарного эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в электрооптических кристаллах

- 4.1. Теоретический формализм, передаточная функция неколлинеарной схемы
- 4.2. Анализ детектирования терагерцовых волн в кристаллах GaAs и LiNbO₃
- 4.3. Выводы по главе 4

Заключение

Список литературы

Список публикаций по диссертации