

ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
РАЕВСКОГО АЛЕКСЕЯ СЕРГЕЕВИЧА
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»

1. Актуальность диссертации

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного излучения в настоящее время привлекает внимание многих исследователей в связи с всё более широким применением этого излучения в научных и практических приложениях. Ведутся работы по созданию настольных терагерцовых ускорителей частиц, использованию терагерцовых полей для сверхбыстрого управления намагниченностью материалов и мониторинга квантовых переходов в веществе. Техника терагерцовой спектроскопии применяется для обнаружения дефектов в композитных материалах, контроля качества и толщины покрытий в автомобильной и фармацевтической промышленности, измерения напряжений в теплоизолирующих покрытиях авиационных двигателей и контроля качества продуктов питания. Терагерцовая спектроскопия применяется при досмотре перевозимых грузов с целью обнаружения взрывчатых и наркотических веществ, а также в медицине для диагностики заболеваний путём анализа спектров поглощения выдыхаемого воздуха. Субтерагерцовый и терагерцовый диапазоны перспективны в области инфокоммуникаций для создания беспроводных сетей связи новых поколений с рекордными скоростями передачи информации.

Развитие терагерцовой техники невозможно без разработки методов генерации, временного и спектрального преобразования, а также детектирования терагерцового излучения.

В связи с этим диссертационная работа Курникова М.А., целью которой 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, безусловно, является актуальной.

2. Научная новизна и достоверность основных выводов и результатов диссертации

Научная новизна диссертации заключается: в создании черенковской схемы оптико-терагерцовой конверсии в слое полупроводникового кристалла, имеющей неоспоримые преимущества по сравнению со стандартной коллинеарной схемой; в разработке оптико-терагерцовых преобразователей с полуконическими кремниевыми элементами, обеспечивающими эффективный вывод терагерцового излучения из кристалла LiNbO_3 ; в предложении способа создания в кристаллах фронтов ионизации с регулируемой скоростью движения и большой длиной распространения на основе многофотонного поглощения лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности; в разработке теории эллипсометрического электрооптического стробирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в режиме неколлинеарного фазового синхронизма.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечиваются применением апробированных экспериментальных, теоретических и численных методов, согласованием результатов диссертационной работы в частных случаях с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов, а так-

же апробацией результатов на международных конференциях и публикациями в высокорейтинговых международных рецензируемых журналах.

3. Ценность для науки и практики проделанной работы

Научная ценность работы заключается в развитии неколлинеарных методов генерации и детектирования терагерцового излучения, позволяющих существенно расширить набор используемых при этом нелинейных сред и источников оптического излучения.

Практическая значимость работы заключается в создании: эффективной и практически удобной схемы 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, которая может быть использована в качестве доступного источника терагерцового излучения; высокоэффективных оптико-терагерцовых конверторов на основе кристалла LiNbO_3 с полуконическими кремниевыми элементами для вывода и коллимации терагерцового излучения, перспективных для использования в терагерцовых спектрометрах. Способ создания в кристаллах фронтов фотоионизации с регулируемой скоростью движения и длиной распространения имеет перспективу использования для доплеровского преобразования терагерцовых импульсов с целью оптимизации их спектрально-временных характеристик. Теория эллипсометрического электрооптического стробирования терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами в режиме неколлинеарного фазового синхронизма может быть использована для оптимизации режима детектирования путем выбора кристалла-детектора, размера зондирующего оптического пучка и угла перекрытия терагерцового и оптического пучков.

4. Оценка содержания диссертации, ее завершенности

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* обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации, кратко описано ее содержание, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* диссертации на примере кристалла GaP с накачкой на длине волны 1,54 мкм приведены результаты исследования перспективности применения полупроводниковых кристаллов в качестве рабочей среды для черенковской схемы оптико-терагерцовой конверсии. Предложена практически удобная схема терагерцовой генерации, работоспособность которой подтверждена численным моделированием методом FDTD. Дано описание экспериментальной установки и приведены полученные результаты. Измеренные методом электрооптического стробирования волновые формы терагерцового излучения имеют характерный для черенковского излучения вид биполярного импульса с шириной спектра $\sim 2,5$ ТГц. Достигнутая максимальная эффективность оптико-терагерцовой конверсии оказалась на порядок больше, чем для традиционной коллинеарной схемы конверсии.

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. При накачке конвертора титан-сапфировым осциллятором достигнута рекордная (для осцилляторов) эффективность конверсии 0,06%, ширина спектра импульсов достигает 6 ТГц. Предложенная схема конвертора с двусторонним выводом излучения из слоя кристалла LiNbO_3 через

два кремниевых полуконуса, прикрепленных к слою с обеих сторон, позволяет генерировать терагерцовые импульсы без интерференционного провала в спектре.

В *третьей главе* приведены результаты исследования возможностей создания в кристаллах ZnS фронтов плазмообразования с регулируемой скоростью движения и большой (в сотни микрон) длиной распространения в условиях многофотонного поглощения скошенных лазерных импульсов. Исследована спектрально-временная трансформация терагерцовых импульсов при отражении от таких фронтов.

Четвертая глава посвящена разработке теории эллипсометрического детектирования терагерцовых волн в условиях неколлинеарного распространения 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. Проведен анализ практически важных случаев неколлинеарного детектирования терагерцовых волн импульсами эрбиевого волоконного лазера в кристалле GaAs и импульсами титан-сапфирового лазера в кристалле LiNbO₃.

В *Заключении* автор подытожил результаты диссертационной работы.

Содержание диссертации изложено последовательно, методически правильно и достаточно полно раскрывает решение поставленных научных задач. Диссертация является завершенным научно-квалификационным исследованием поставленной научной задачи. Работа написана грамотно. Оформление работы соответствует установленным нормам.

По результатам исследований опубликовано 14 научных работ, в том числе: 6 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК по специальности 1.3.19 и приравненных к ним, один патент и 7 публикаций в материалах международных и Всероссийских конференций. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертации.

5. Замечания и вопросы по работе

1. В тексте диссертации недостаточно подробно описаны математические постановки решаемых задач, в частности, не приведены граничные и начальные условия, используемые при решении численными методами дифференциальных уравнений.
2. Непонятно, как определялись мощности лазера и усилителя, указанные на рис. 1.4.
3. Стр. 30: непонятно, как в модели учитывалось насыщение эффективности оптико-терагерцовой конверсии?
4. Стр. 37: говорится про «накачку импульсами оптического усилителя», но не сказано, что является генератором этих импульсов.
5. Глава 2: как учитывались волноводные свойства слоя кристалла LiNbO_3 , представляющего собой планарный оптический волновод?
6. Имеет ли практическое применение «раздвоенный» терагерцовый пучок, получаемый при двустороннем выводе излучения?
7. Некоторые терминологические замечания:
 - стр. 72: не понятно, что означает «В-интеграл»;
 - стр. 78: термин «скинирующий», очевидно, является жаргонизмом.

ВЫВОДЫ

1. Диссертационная работа Курникова Михаила Александровича посвящена актуальной теме и является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, содержащей решение важной научной проблемы – развития 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. Научные положения и выводы являются обоснованными.

2. Указанные в данном отзыве недостатки имеют частный характер и не снижают в целом положительной оценки работы.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ (включая п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Курников Михаил Александрович – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика».

Официальный оппонент,

Заведующий кафедрой «Физика и техника оптической связи»
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ),
доктор физико-математических наук, профессор.

Научная специальность: 01.04.03 – Радиофизика

Я, Раевский Алексей Сергеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя учёной степени кандидата физико-математических наук Курникова Михаила Александровича и их дальнейшую обработку.

А.С. Раевский

02 июня 2026 г.

Раевский Алексей Сергеевич. ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Тел.: +7(831) 436-82-33. E-mail: raevsky_as@mail.ru

Подпись заверяю:

Учёный секретарь Ученого совета НГТУ

к.т.н., доцент



И.Н. Мерзляков