

На правах рукописи



Сычугин Сергей Александрович

**Эффективные режимы генерации униполярных, биполярных
и многопериодных терагерцовых полей ультракороткими
лазерными импульсами в нелинейных кристаллах**

Специальность 01.04.21 — Лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского».

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

Официальные оппоненты: **Китаева Галия Хасановна**,
доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
профессор кафедры квантовой электроники физического факультета

Назаров Максим Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
начальник лаборатории

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Защита состоится 18 декабря 2019 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/961>.

Автореферат разослан _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.166.07,
канд. физ.-мат. наук, доцент

Клюев Алексей Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В последнее десятилетие достигнут значительный прогресс в технике генерирования импульсов терагерцового излучения с высокими напряженностями электрического и магнитного полей. Наиболее эффективным методом «настошной» (table-top) терагерцовой генерации в настоящее время является оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. Так, например, техника оптического выпрямления лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности в кристалле ниобата лития (LiNbO_3) позволяет получать (при последующей фокусировке) терагерцовые поля с напряженностью электрического поля до 1 МВ/см (индукцией магнитного поля около 0,3 Т) [1]. Использование сильнонелинейных органических кристаллов позволяет добиться еще более высоких напряженностей электрического поля — до нескольких десятков МВ/см [2]. Успехи в генерировании сильных терагерцовых полей инициировали появление новых научных и практических приложений терагерцового излучения, таких как нелинейная терагерцовая спектроскопия [3], ускорение терагерцовым полем электронов [4–8] и пост-ускорение ионов [9], сверхбыстрое управление магнитным порядком, фазовыми переходами и сверхпроводимостью в веществе [10–12], выстраивание и ориентирование молекул [13–15], генерация однопериодных аттосекундных импульсов при томпсоновском рассеянии терагерцовых импульсов [16], терагерцовый стрикинг аттосекундных процессов [17].

Для различных приложений терагерцового излучения, как традиционных (терагерцовая спектроскопия во временной области и терагерцовый имиджинг), так и новейших, оптимальными являются терагерцовые импульсы различного спектрального состава и различной временной формы. Так, например, для целей ускорения электронов в терагерцовых электронных пушках и для терагерцового стрикинга оптимальными считаются биполярные (однопериодные, single-cycle) импульсы с центральной частотой в субтерагерцовом диапазоне (0,1–1 ТГц) [4; 6; 8]. Менее распространенные униполярные (полупериодные, half-cycle) импульсы того же диапазона также перспективны для целей ускорения частиц [5]. Кроме того, униполярные терагерцовые импульсы оптимальны для задач выстраивания и ориентирования молекул [13–15] и позволяют получать новые эффекты при воздействии на вещество [18]. Использование коротких униполярных пиков терагерцового поля позволяет также повысить пространственное разрешение отражательной интроскопии [19; 20]. Многопериодные (multi-cycle) терагерцовые импульсы необходимы для спектроскопических приложений и частотно-селективного воздействия на вещество, перспективны для использования в компактных волноводных ускорителях электронов, в том числе для новейших источников рентгеновского излучения аттосекундной длительности [7; 8; 21].

Биполярные терагерцовые импульсы — наиболее типичный вид волновых форм, генерируемых при оптическом выпрямлении лазерных импульсов. Например, при черенковском излучении терагерцовых волн сфокусированным лазерным импульсом, распространяющимся в электрооптической среде со слабой терагерцовой дисперсией (в частности, ниобате лития), распределение электрического поля поперек черенковского конуса представляет собой производную от огибающей оптической интенсивности импульса накачки [22]. Для типичных гауссово-подобных лазерных импульсов генерируемая волновая форма является, таким образом, биполярной. В распространенной схеме терагерцовой генерации с коллинеарным, синхронизированным по скорости распространением несфокусированного лазерного импульса и терагерцовой волны, например при накачке кристалла теллурида цинка (ZnTe) импульсами титан-сапфирового (Ti:sapphire) лазера, генерация многопериодной фазово-синхронизированной волны может быть подавлена из-за большой длительности лазерного импульса, и генерируется близкая к биполярной волновая форма [23; 24]. Биполярная форма является типичной и для схемы терагерцовой генерации лазерными импульсами со скошенным фронтом в кристалле ниобата лития [25].

Униполярные импульсы электромагнитного излучения являются мало распространенными, недавно даже обсуждалась сама возможность их генерации [26]. Дело в том, что при фокусировке или распространении в дальнюю зону такие импульсы превращаются в биполярные [27]. Униполярные терагерцовые поля для практических применений генерируют, в основном, с помощью фотопроводящих антенн [18]. Генерация униполярных полей путем оптического выпрямления лазерных импульсов также возможна: волновые формы, повторяющие огибающую оптической интенсивности импульса накачки, могут излучаться при пересечении этим импульсом границ электрооптического кристалла [28–30]. Данное переходное излучение является, однако, недостаточно интенсивным для практических приложений. Недавно, была предсказана возможность генерации сильных квазистатических (субтерагерцовых) предвестников — униполярных электрического и магнитного полей, распространяющихся впереди мощных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах [31]. Показано, что даже при умеренных параметрах накачки поля в предвестнике могут достигать значений 0,4 МВ/см и 0,1 Т [32].

Методы генерирования многопериодных терагерцовых импульсов включают в себя оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов в периодически инвертированных электрооптических кристаллах — ниобате лития (PPLN) [33–35] или арсениде галлия (GaAs) [36], нелинейное смешивание двух сдвинутых во времени чирпированных лазерных импульсов [37–39], черенковское излучение от движущихся решеток нелинейной поляризации [40], формирование последовательности реплик однопериодного терагерцового импульса в оптически управляемом волноводе [41] и др.

Несмотря на большое число работ, посвященных разработке методов генерации терагерцовых полей различной волновой формы, многие вопросы

остаются нерешенными. Так, например, отсутствует теория черенковского излучения терагерцовых волн остро сфокусированными лазерными пучками, для которых существенна дифракционная расходимость, что не позволяет определить оптимальные для терагерцовой генерации условия фокусировки. Эффект генерации квазистатических (субтерагерцовых) предвестников предсказан в одномерной модели неограниченно широкого пучка накачки и в пренебрежении истощением импульса накачки [31]. Для экспериментальной проверки эффекта требуется, очевидно, более реалистичное исследование, позволяющее определить наиболее эффективные режимы генерации предвестников. Предложенные методы генерации многопериодных терагерцовых полей во многих случаях не обеспечивают требуемую узость спектральной линии терагерцового излучения или его достаточную интенсивность.

Цель диссертации

Целью диссертационной работы является разработка новых и развитие уже известных методов генерации униполярных, биполярных и многопериодных терагерцовых полей на основе оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах с квадратичной нелинейностью.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана теория черенковского излучения терагерцовых волн ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, впервые строго учитывающая изменение поперечного размера сфокусированного лазерного пучка вдоль направления распространения. На основе разработанной теории исследована зависимость энергии терагерцового излучения от условий фокусировки и длительности лазерного импульса для практически важных случаев накачки кристалла LiNbO_3 импульсами титан-сапфирового или иттербиевого лазера. Для сфокусированных в линию пучков исследована применимость предложенного ранее приближенного метода расчета энергии излучения (адиабатического приближения), основанного на суммировании энергий от отдельных участков пучка. Впервые экспериментально исследована зависимость энергии терагерцового черенковского излучения от степени фокусировки лазерного пучка накачки.
2. Предложена новая схема черенковской терагерцовой эмиссионной спектроскопии, в которой лазерный импульс накачки распространяется поперек слоя исследуемого материала, а генерируемое терагерцовое излучение выводится из слоя с помощью кремниевой призмы, прикрепленной к выходной границе слоя. Для предложенной схемы рассчитано терагерцовое излучение от движущейся области магнетизации, наводимой ультракоротким лазерным импульсом в слое магнитооптического

материала за счет обратного эффекта Фарадея. При этом, в отличие от имеющегося в литературе рассмотрения схемы с распространением лазерного импульса вдоль слоя, учтено как черенковское излучение из объема магнитооптического материала, так и переходное излучение от границ слоя. Исследовано влияние переходного излучения на форму и спектр генерируемого терагерцового импульса.

3. Проведено численное моделирование явления генерации квазистатических электромагнитных предвестников мощными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, впервые учитывающее конечность поперечного размера пучка накачки и истощение импульса накачки. Исследовано влияние факторов поперечного размера и истощения накачки на волновую форму генерируемых предвестников и на эффективность их генерации.
4. Предложен метод компенсации негативного влияния истощения накачки на генерацию квазистатических предвестников, основанный на использовании дисперсионной компрессии чирпированных лазерных импульсов при их распространении в кристалле. Эффективность метода продемонстрирована с помощью численного моделирования для практически важных случаев, в том числе с учетом керровской нелинейности кристалла.
5. Предложен новый метод генерации многопериодного (узкополосного) терагерцового излучения на основе нелинейного смешивания импульсов обыкновенной и необыкновенной волн ультракороткой длительности в кристалле LiNbO_3 . Разработана теория такой генерации, исследовано влияние кристаллографической ориентации и толщины кристалла, а также параметров лазерной накачки на характеристики генерируемого излучения.

Практическая значимость работы

Полученные в диссертации зависимости временной формы, спектра и энергии терагерцового черенковского излучения от длительности импульса и условий фокусировки лазерной накачки могут быть использованы для оптимизации режимов терагерцовой генерации в перспективных излучателях, состоящих из пластинки ниобата лития и выводящей кремниевой призмы.

Предложенная схема черенковской терагерцовой эмиссионной спектроскопии оптомагнитных явлений удобна для практической реализации и сравнения экспериментальных данных с теоретическим расчетом.

Предложенный метод компенсации негативного влияния истощения лазерной накачки на генерацию униполярного квазистатического предвестника путем чирпирования импульса накачки может быть использован для управления временной формой полей предвестника.

Предложенный метод генерации многопериодного терагерцового излучения на основе нелинейного смешивания импульсов обыкновенной и необыкновенной волн в кристалле ниобата лития перспективен для создания терагерцовых источников с высокой спектральной яркостью.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Энергия терагерцового черенковского излучения, генерируемого ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, достигает максимума при некоторой оптимальной ширине перетяжки лазерного пучка. При фокусировке лазерного пучка в линию оптимальная ширина перетяжки больше, чем при фокусировке в пятно. В обоих случаях оптимальная ширина возрастает с увеличением длительности лазерного импульса. Для сфокусированных в линию пучков и типичных экспериментальных условий накачки кристалла ниобата лития импульсами титан-сапфирового или иттербиевого лазера хорошо работает адиабатическое приближение, основанное на суммировании энергий от отдельных участков пучка. В распространенной экспериментальной схеме с фокусировкой лазерного пучка в пятно в пластинке ниобата лития, прикрепленной к выводящей кремниевой призме, факторы частотно-зависимого поглощения терагерцовых волн в ниобате лития и дифракционной расходимости генерируемого терагерцового пучка приводят к увеличению оптимальной ширины перетяжки.
2. Для экспериментального исследования явлений сверхбыстрого оптомагнетизма методом черенковской терагерцовой эмиссионной спектроскопии удобной является схема, в которой лазерный импульс накачки распространяется поперек слоя магнитооптического материала, а генерируемое терагерцовое излучение выводится из слоя с помощью кремниевой призмы, прикрепленной к выходной границе слоя. Данная схема допускает простой расчет формы терагерцового импульса с учетом как черенковского излучения из объема слоя, так и переходного излучения от границ слоя, в отличие от использовавшейся ранее схемы с распространением лазерного импульса в слое параллельно его границам. Вклад переходного излучения существенно изменяет форму генерируемого терагерцового импульса — приводит к появлению сильной асимметрии в характерной для черенковского излучения биполярной форме терагерцового импульса. Данное обстоятельство необходимо учитывать при определении константы Верде магнитооптического материала по измерениям терагерцового сигнала.
3. Квазистатический электромагнитный предвестник, генерируемый мощным лазерным импульсом в электрооптическом кристалле, устойчив к уменьшению поперечного размера (двумерного) лазерного пучка. Например, при $1/e$ -ширине пучка титан-сапфирового лазера $\gtrsim 2\text{--}3$ мм

электромагнитное поле предвестника, генерируемого в кристалле GaP толщиной 3 мм, является на оси пучка практически таким же, как и в пределе бесконечно широкого пучка. При ширине пучка менее 2 мм поле предвестника становится меньше, только если фиксирована интенсивность накачки. Если фиксирована мощность накачки, то поле предвестника достигает максимума при ширине пучка около 1 мм.

4. Истощение лазерного импульса накачки вследствие многофотонного поглощения в кристалле приводит к искажению платообразной волновой формы генерируемого квазистатического предвестника — спаданию поля в его задней части, а также к снижению эффективности генерации предвестника при высоких интенсивностях накачки. Негативное влияние истощения накачки на генерацию предвестника можно компенсировать, применяя в качестве накачки чирпированные лазерные импульсы. При правильно выбранном значении параметра чирпирования дисперсионная компрессия лазерного импульса в кристалле обеспечивает поддержание высокой интенсивности накачки и, как результат, сохранение платообразной формы предвестника даже в условиях сильного многофотонного поглощения. При высоких интенсивностях накачки и значительной толщине кристалла фазовая самомодуляция лазерного импульса, вызванная керровской нелинейностью кристалла, может приводить к дополнительному сжатию лазерного импульса, что необходимо учитывать при выборе параметра чирпирования.
5. При нелинейном смешивании двух ультракоротких оптических импульсов, распространяющихся в кристалле LiNbO_3 в виде обыкновенной и необыкновенной волн, может создаваться движущийся импульс нелинейной поляризации, полярность которого периодически меняется в процессе движения. Пространственно-временное распределение нелинейной поляризации при этом эквивалентно виртуальной PPLN-структуре, созданной в однородном кристалле. Как и в реальных PPLN-структурах, импульс нелинейной поляризации может генерировать многопериодную терагерцовую волну на частоте квазисинхронизма. Для эффективной генерации оптическая ось кристалла должна быть ориентирована под углом $\approx 60^\circ - 70^\circ$ к входной грани кристалла. В частности, импульс иттербиевого усилителя длительностью 600 фс с пиковой интенсивностью 100 ГВт/см^2 может генерировать терагерцовое излучение на частоте 0,5 ТГц (1 ТГц) с шириной полосы всего лишь 3,6 ГГц (32,2 ГГц) с эффективностью $\sim 10^{-5}$. Частоту генерируемого терагерцового излучения можно перестраивать небольшим изменением угла ввода лазерного пучка накачки в кристалл.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, [A1—A5], а также 18 работ в сборниках трудов конференций [A6—A23].

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах кафедры общей физики ННГУ, а также на следующих конференциях: The 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018, Нагойя, Япония), The 7th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2018, Йокогама, Япония), 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications» (TERA-2018, Нижний Новгород), International Conference on Microwave & THz Technologies and Wireless Communications (IRPhE' 2018, Агреван, Армения), International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018, Москва), The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2017 and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (IW-FIRT 2017 и DHP-TST 2017, Фукуи, Япония), Progress In Electromagnetics Research Symposium 2017 (PIERS 2017, Санкт-Петербург), 16th International Conference on Laser Optics 2014 (LO'14, Санкт-Петербург), 8th UK, Europe, China conference on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT 2015, Кардифф, Великобритания), VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике (ФИО 2017, Москва), 11th International Young Scientist conference «Development in Optics and Communications 2015» (DOC 2015, Рига, Латвия), XVII научной школе «Нелинейные волны — 2016» (Нижний Новгород, 2016), XI научно-технической конференции «Высокие технологии в атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе» (Нижний Новгород, 2016), XVII, XVIII научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2013–2014), XIX Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2014), Российских чтениях-конкурсе памяти нижегородских ученых (Нижний Новгород, 2013), Форуме молодых ученых (Нижний Новгород, 2013).

Диссертационная работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (проектная часть госзадания, № 3.3854.2017/4.6).

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных аналитических, численных и экспериментальных методов, а также подтверждается согласованием результатов диссертации в частных случаях с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад автора

Постановка задач и анализ полученных результатов в главах 1, 2, 3 и 4 проводились совместно с научным руководителем Бакуновым М. И. Экспериментальные исследования в главе 1 проводились совместно с Машковичем Е. А. Численный FDTD код в главе 3 разработан совместно с Ефименко Е. С. Аналитические выкладки в главе 4 проводились совместно с Машковичем Е. А.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и списка публикаций по диссертации. Общий объем диссертации составляет 85 страниц, включая 20 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 142 наименований на 11 страницах и список публикаций по диссертации из 23 наименований на 3 страницах.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется её цель, указывается научная новизна, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена разработке теории черенковского излучения терагерцевых волн ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, строго учитывающей изменение поперечного размера сфокусированного лазерного пучка вдоль направления распространения. Рассмотрение проведено для двух типов фокусировки — в линию и пятно. Разработанная общая теория применяется к практически важному случаю — генерации терагерцевого излучения в кристалле LiNbO_3 импульсами фемтосекундного лазера ближнего инфракрасного диапазона. Исследована зависимость генерируемой терагерцевой энергии и терагерцевого спектра от условий фокусировки при различных длительностях лазерного импульса. Приведены результаты экспериментальной проверки теоретических расчетов.

В п. 1.1 дан обзор теоретических и экспериментальных работ по черенковской генерации терагерцевого излучения ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах. Указано место проводимого в диссертации рассмотрения в ряду этих работ.

В п. 1.2 введена модель нелинейного источника, сделаны и обоснованы необходимые приближения, записана система уравнений для терагерцевого поля.

В п. 1.3 описана процедура отыскания общего вида решений уравнений Максвелла с заданным нелинейным источником для случаев фокусировки лазерного пучка в линию (п. 1.3.1) и пятно (п. 1.3.3). Используются методы преобразования Фурье и функции Грина. На основе найденных решений для терагерцевых полей получены выражения для полной энергии черенковского

излучения. В п. 1.3.2 для случая фокусировки в линию введен приближенный (адиабатический) способ расчета полной терагерцовой энергии, основанный на суммировании энергий от участков пучка.

В п. 1.4 разработанная общая теория применяется к практически важному случаю — генерации терагерцового излучения в кристалле LiNbO_3 импульсами фемтосекундного лазера ближнего инфракрасного диапазона. Для случаев фокусировки пучка накачки в линию (п. 1.4.1) и пятно (п. 1.4.2) рассчитаны картины поля излучения, осциллограммы и спектры терагерцового поля, излученного различными участками пучка накачки.

Построены зависимости полной терагерцовой энергии от размера перетяжки пучка накачки при различных длительностях лазерного импульса (рис. 1). Показано наличие оптимального размера перетяжки, при котором терагерцовая энергия достигает максимума. Для фокусировки в линию показано хорошее совпадение значений энергии, рассчитанных в рамках адиабатического приближения, с точным расчетом (рис. 1).

В п. 1.5 проводится сравнение теоретических расчетов с результатами эксперимента по измерению энергии черенковского излучения при различных размерах перетяжки лазерного пучка накачки. Обнаруженное расхождение в значении оптимального размера перетяжки объясняется влиянием частотно-зависимого поглощения терагерцовых волн в LiNbO_3 и дифракционной расходимости генерируемого терагерцового пучка. Показано, что модифицированная путем учета этих факторов теория хорошо согласуется с экспериментом.

В п. 1.6 сделаны выводы по первой главе.

Во второй главе предложена новая схема черенковской терагерцовой эмиссионной спектроскопии, предназначенная для исследования сверхбыстрых оптомагнитных явлений. Для предложенной схемы рассчитано поле излучения от движущейся области намагниченности, создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом в слое магнитооптического материала за счет обратного эффекта Фарадея. Показана существенность учета переходного излучения от границ материала наряду с черенковским излучением из объема материала.

В п. 2.1 дан краткий обзор литературы, показывающий актуальность исследований сверхбыстрых оптомагнитных явлений, и указана новизна данной работы по сравнению с предшествующими работами по черенковской терагерцовой эмиссионной спектроскопии оптомагнитных явлений.

В п. 2.2 дано описание предлагаемой схемы генерации и вывода терагерцового излучения (рис. 2), введена модель нелинейного источника.

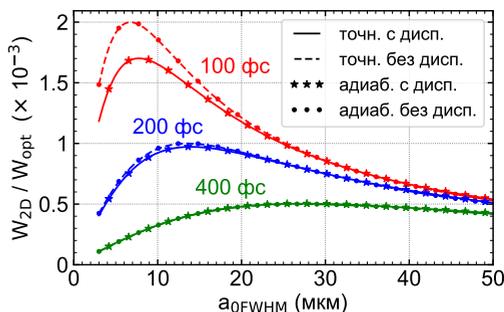


Рис. 1. Зависимость терагерцовой энергии, нормированной на энергию оптического импульса, от размера перетяжки.

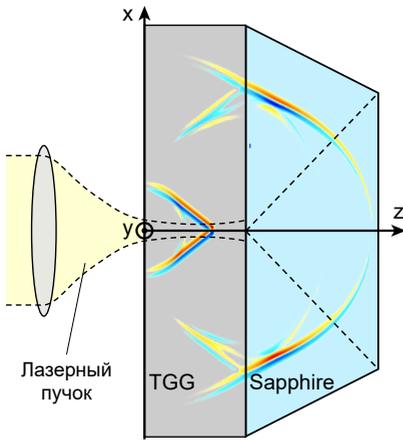


Рис. 2. Схема генерации и вывода терагерцового черенковского излучения. Моментальные снимки генерируемого электрического поля в два момента времени.

тербий-галлиевого граната, но и переходным излучением от границ слоя.

В п. 2.5 сделаны выводы по второй главе.

Третья глава посвящена исследованию влияния ширины лазерного пучка накачки и истощения импульса накачки на эффект генерации квазистатических предвестников мощными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах. Исследуется возможность компенсации негативного влияния истощения накачки на генерацию предвестников путем использования chirпированных импульсов накачки.

В п. 3.1 вначале обсуждаются общепринятые представления о негативном влиянии двухфотонного поглощения накачки и связанной с ним фотогенерации носителей на эффективность генерации терагерцового излучения методом оптического выпрямления лазерных импульсов. Затем дается краткое описание недавно предсказанного позитивного эффекта, связанного с фотогенерацией носителей, – генерации квазистатического предвестника, распространяющегося впереди импульса накачки. Ставится задача выяснения влияния ширины пучка накачки и истощения импульса накачки на генерацию предвестника.

В п. 2.3 описана процедура аналитического решения уравнений Максвелла с заданным нелинейным источником для рассматриваемой схемы.

В п. 2.4 на основе полученных общих формул исследован практически интересный случай генерации терагерцового излучения импульсами титан-сапфирового лазера в структуре, состоящей из слоя тербий-галлиевого граната (TGG) и согласующей сапфировой призмы. Рассчитаны картина поля генерируемого терагерцового черенковского излучения в структуре (рис. 2), а также осциллограмма терагерцового поля на выходе из структуры и соответствующий спектр (рис. 3). Показано, что вид осциллограммы определяется не только черенковским излучением из объема слоя

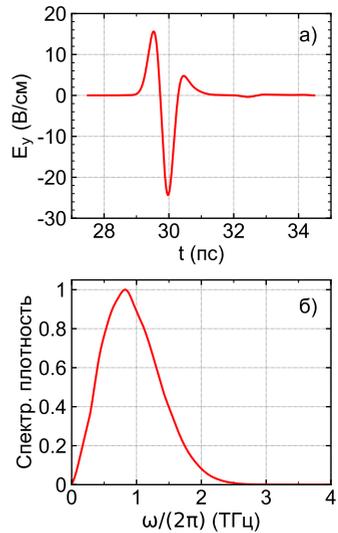


Рис. 3. Осциллограмма (а) и спектр (б) поля излучения из кристалла TGG.

В п. 3.2 вводится теоретическая модель генерации предвестника мощным лазерным импульсом в ЭО кристалле (рис. 4), обосновываются используемые приближения, записывается система уравнений для нахождения генерируемого терагерцового поля.

В п. 3.3 с помощью численно-го моделирования исследовано влияние ширины лазерного пучка на формирование квазистатического предвестника. Показано, что уменьшение ширины пучка до $\sim 2-3$ мм не разрушает формирование предвестника. Уменьшение ширины пучка до меньших значений (при фиксированной оптической интенсивности) приводит к уменьшению амплитуды предвестника.

В п. 3.4 исследовано влияние истощения накачки вследствие ее двух-фотонного поглощения на генерацию квазистатического предвестника. Показано, что истощение накачки приводит к ослаблению полей в задней части предвестника (рис. 5).

В п. 3.5 показано, что негативное влияние истощения накачки на генерацию квазистатического предвестника можно компенсировать дисперсионным сжатием импульса накачки при его предварительном чирпировании (рис. 5). Указана также возможность управления формой предвестника путем изменения параметра чирпирования.

В п. 3.6 исследовано влияние керровской нелинейности на генерацию квазистатического предвестника. Показано, что это влияние можно также в значительной степени компенсировать подбором параметра чирпирования.

В п. 3.7 сделаны выводы по третьей главе.

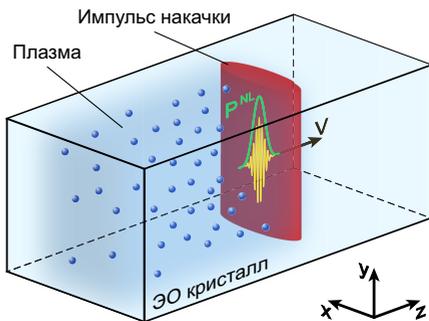


Рис. 4. Сфокусированный в линию лазерный импульс индуцирует нелинейную поляризацию P^{NL} и создает плазму свободных носителей в электрооптическом (ЭО) кристалле.

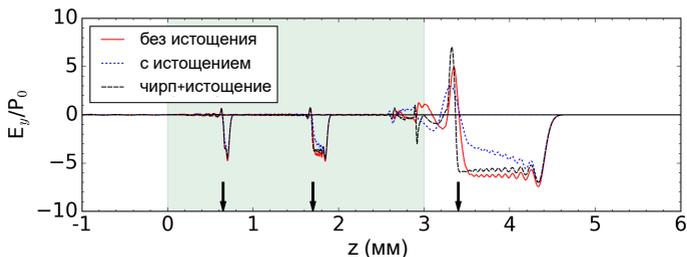


Рис. 5. Моментальные снимки электрического поля, генерируемого в кристалле GaP ($0 < z < 3$ мм) чирпированным лазерным импульсом, в сравнении с накачкой нечирпированным импульсом и с приближением отсутствия истощения накачки. Поле нормировано на максимум нелинейной поляризации. Стрелки показывают положение лазерного импульса в три момента времени.

В четвертой главе предложен метод генерации узкополосного терагерцового излучения ультракоротким лазерным импульсом, распространяющимся в кристалле LiNbO_3 в виде суперпозиции обыкновенной (o) и необыкновенной (e) волн. Разработана теория метода, сделаны оценки применительно к случаю накачки кристалла LiNbO_3 импульсами иттербиевого усилителя.

В п. 4.1 дан краткий обзор предложенных ранее методов генерации многопериодного (узкополосного) терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами в нелинейных кристаллах. Отмечены недостатки этих методов. Кратко изложена суть предлагаемого метода генерации.

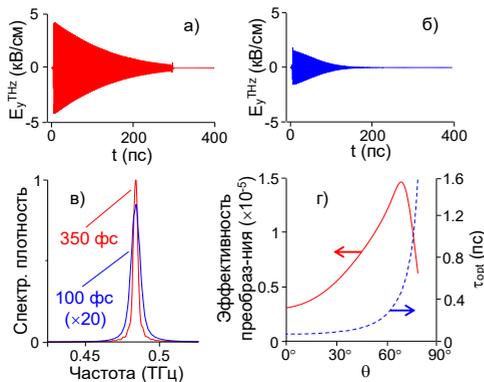


Рис. 7. а, б) Терагерцовое поле, излученное из кристалла LiNbO_3 толщиной 1 см во встречном направлении, при интенсивности накачки 100 ГВт/см^2 и длительности импульса накачки а) 350 фс и б) 100 фс. в) Соответствующие спектры мощности. г) Эффективность преобразования и оптимальная длительность импульса накачки как функции угла θ (рис. 6).

к входной грани кристалла (рис. 7г).

В п. 4.4 анализируется излучение из кристалла в попутном (по отношению к направлению распространения лазерного импульса) направлении. Построены осциллограммы и спектры терагерцового поля при различных значениях параметров. Проведено сравнение ширины спектров и эффективности преобразования со случаем излучения во встречном направлении. Даны рекомендации по увеличению эффективности преобразования. Обсуждается возможность

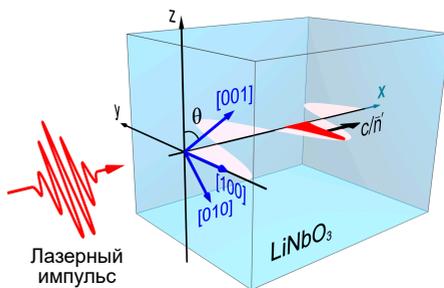


Рис. 6. Ориентация кристаллографических осей и осей координат в кристалле LiNbO_3 . Структура нелинейной поляризации.

В п. 4.2 дано описание схемы генерации (рис. 6), сделаны необходимые приближения и разработана теория предлагаемого метода генерации.

В п. 4.3 на основе разработанной теории анализируется излучение из кристалла во встречном (по отношению к направлению распространения лазерного импульса) направлении. Построены осциллограммы и спектры терагерцового поля при различной длительности импульса накачки (рис. 7а-в). Рассчитана ширина спектров. Исследована зависимость эффективности преобразования и оптимальной длительности импульса накачки от угла наклона оптической оси

перестройки частоты генерации путем небольшого изменения направления распространения лазерного пучка в кристалле.

В п. 4.5 сделаны выводы по четвертой главе.

В п. 4.6 приведен тензор квадратичной нелинейной восприимчивости ниобата лития, с его помощью записаны компоненты нелинейной поляризации, получено выражение для используемого эффективного нелинейного коэффициента.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Разработана теория черенковского излучения терагерцовых волн ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических кристаллах, строго учитывающая изменение поперечного размера сфокусированного лазерного пучка вдоль направления распространения. Для практически важных случаев накачки кристалла LiNbO_3 импульсами титан-сапфирового или иттербиевого лазера найдены оптимальные (обеспечивающие максимальную энергию излучения) размеры перетяжки пучка в зависимости от длительности импульса и типа фокусировки (в пятно, линию). Для сфокусированных в линию пучков обоснована применимость адиабатического приближения, основанного на суммировании энергий от отдельных участков пучка. Для часто используемой схемы черенковского излучения терагерцовых волн в пластинке LiNbO_3 с выводом излучения через кремниевую призму экспериментально продемонстрировано, что факторы частотно-зависимого поглощения терагерцовых волн в LiNbO_3 и дифракционной расходимости генерируемого терагерцового пучка приводят к увеличению оптимального размера перетяжки лазерного пучка.
2. Предложена схема черенковской терагерцовой эмиссионной спектроскопии, в которой лазерный импульс накачки распространяется поперек слоя исследуемого материала, а генерируемое терагерцовое излучение выводится из слоя с помощью кремниевой призмы, прикрепленной к выходной границе слоя. Для данной схемы рассчитано терагерцовое излучение от движущейся области магнетизации, наводимой ультракоротким лазерным (Ti:sapphire) импульсом в слое магнитооптического материала (тербий-галлиевого граната) за счет обратного эффекта Фарадея. Показано, что учет переходного излучения от границ кристалла, наряду с черенковским излучением из объема кристалла, приводит к существенной асимметрии в характерной для черенковского излучения биполярной форме терагерцового импульса.
3. С помощью прямого численного моделирования методом FDTD показано, что квазистатический электромагнитный предвестник,

генерируемый мощным лазерным (Ti:sapphire) импульсом в электрооптическом кристалле (GaP), устойчив к уменьшению поперечного размера (двумерного) лазерного пучка. При $1/e$ -ширине пучка $\gtrsim 2\text{--}3$ мм электромагнитное поле предвестника на оси пучка является практически таким же, как и в пределе бесконечно широкого пучка. При ширине пучка менее 2 мм поле предвестника становится меньше, только если фиксирована интенсивность накачки. Если фиксирована мощность накачки, то поле предвестника достигает максимума при ширине пучка около 1 мм.

4. С помощью прямого численного моделирования методом FDTD выяснено, что истощение лазерного (Ti:sapphire) импульса накачки вследствие многофотонного поглощения в электрооптическом кристалле (GaP) приводит к искажению платообразной волновой формы генерируемого квазистатического электромагнитного предвестника — спаданию поля в его задней части, а также к снижению эффективности генерации предвестника при высоких интенсивностях накачки. Показано, что негативное влияние истощения накачки на генерацию предвестника можно компенсировать, применяя в качестве накачки чирпированные лазерные импульсы. При этом указано, что для оптимального выбора параметра чирпирования необходимо учитывать эффект самомодуляции лазерного импульса за счет керровской нелинейности.
5. Предложен метод генерации многопериодного (узкополосного) терагерцового излучения на основе нелинейного смешивания импульсов обыкновенной и необыкновенной волн ультракороткой длительности в кристалле LiNbO_3 . Разработана теория такой генерации, в частности раскрыт механизм генерации как формирование виртуальной PPLN-структуры в однородном кристалле. Показано, что для эффективной генерации оптическая ось кристалла должна быть ориентирована под углом $\approx 60^\circ\text{--}70^\circ$ к входной грани кристалла. При этом, например, импульс иттербиевого усилителя длительностью 600 фс с пиковой интенсивностью 100 ГВт/см^2 может генерировать терагерцовое излучение на частоте 0,5 ТГц (1 ТГц) с шириной полосы 3,6 ТГц (32,2 ТГц) с эффективностью $\sim 10^{-5}$. Показано также, что частоту генерируемого терагерцового излучения можно перестраивать небольшим изменением угла ввода лазерного пучка накачки в кристалл.

Список литературы

- [1] Hirori H., Doi A., Blanchard F., Tanaka K. Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃ // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 98, no. 9. P. 091106.
- [2] Vicario C., Ovchinnikov A. V., Ashitkov S. I., et al. Generation of 0.9-mJ THz pulses in DSTMS pumped by a Cr:Mg₂SiO₄ laser // *Opt. Lett.* 2014. Vol. 39, no. 23. P. 6632—6635.
- [3] Hwang H. Y., Fleischer S., Brandt N. C., et al. A review of non-linear terahertz spectroscopy with ultrashort tabletop-laser pulses // *J. Mod. Opt.* 2015. Vol. 62, no. 18. P. 1447—1479.
- [4] Nanni E. A., Huang W. R., Hong K.-H., et al. Terahertz-driven linear electron acceleration // *Nat. Commun.* 2015. Vol. 6. P. 8486.
- [5] Huang W. R., Nanni E. A., Ravi K., et al. Toward a terahertz-driven electron gun // *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5. P. 14899.
- [6] Huang W. R., Fallahi A., Wu X., et al. Terahertz-driven, all-optical electron gun // *Optica*. 2016. Vol. 3, no. 11. P. 1209—1212.
- [7] Kärtner F., Ahr F., Calendron A.-L., et al. AXSIS: Exploring the frontiers in attosecond X-ray science, imaging and spectroscopy // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. 2016. Vol. 829. P. 24—29.
- [8] Matlis N., Ahr F., Calendron A.-L., et al. Acceleration of electrons in THz driven structures for AXSIS // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*. 2018. Vol. 909. P. 27—32.
- [9] Pálfalvi L., Fülöp J. A., Tóth G., Hebling J. Evanescent-wave proton postaccelerator driven by intense THz pulse // *Phys. Rev. ST Accel. Beams*. 2014. Vol. 17, no. 3. P. 031301.
- [10] Kubacka T., Johnson J. A., Hoffmann M. C., et al. Large-amplitude spin dynamics driven by a THz pulse in resonance with an electromagnon // *Science*. 2014. Vol. 343, no. 6177. P. 1333—1336.
- [11] Nicoletti D., Cavalleri A. Nonlinear light–matter interaction at terahertz frequencies // *Adv. Opt. Photonics*. 2016. Vol. 8, no. 3. P. 401—464.
- [12] Baierl S., Hohenleutner M., Kampfrath T., et al. Nonlinear spin control by terahertz-driven anisotropy fields // *Nat. Photonics*. 2016. Vol. 10. P. 715—718.
- [13] Fleischer S., Zhou Y., Field R. W., Nelson K. A. Molecular orientation and alignment by intense single-cycle THz pulses // *Phys. Rev. Lett.* 2011. Vol. 107, no. 16. P. 163603.
- [14] Sajadi M., Wolf M., Kampfrath T. Transient birefringence of liquids induced by terahertz electric-field torque on permanent molecular dipoles // *Nat. Commun.* 2017. Vol. 8. P. 14963.

- [15] Zalden P., Song L., Wu X., et al. Molecular polarizability anisotropy of liquid water revealed by terahertz-induced transient orientation // *Nat. Commun.* 2018. Vol. 9, no. 1. P. 2142.
- [16] Tóth G., Tibai Z., Sharma A., et al. Single-cycle attosecond pulses by Thomson backscattering of terahertz pulses // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2018. Vol. 35, no. 5. A103—A109.
- [17] Zhao L., Wang Z., Lu C., et al. Terahertz Streaking of Few-Femtosecond Relativistic Electron Beams // *Phys. Rev. X.* 2018. Vol. 8, no. 2. P. 021061.
- [18] Chai X., Ropagnol X., Raais-Zadeh S. M., et al. Subcycle terahertz nonlinear optics // *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 121, no. 14. P. 143901.
- [19] Kawase K., Ichino S., Suizu K., Shibuya T. Half cycle terahertz pulse generation by prism-coupled Cherenkov phase-matching method // *J. Infrared Millim. Terahertz Waves.* 2011. Vol. 32, no. 10. P. 1168—1177.
- [20] Zhong S. Progress in terahertz nondestructive testing: A review // *Front. Mech. Eng.* 2018. P. 1—9.
- [21] Wong L. J., Fallahi A., Kärtner F. X. Compact electron acceleration and bunch compression in THz waveguides // *Opt. Express.* 2013. Vol. 21, no. 8. P. 9792—9806.
- [22] Bakunov M. I., Bodrov S. B., Maslov A. V., Hangyo M. Theory of terahertz generation in a slab of electro-optic material using an ultrashort laser pulse focused to a line // *Phys. Rev. B.* 2007. Vol. 76, no. 8. P. 085346.
- [23] Löffler T., Hahn T., Thomson M., et al. Large-area electro-optic ZnTe terahertz emitters // *Opt. Express.* 2005. Vol. 13, no. 14. P. 5353—5362.
- [24] Blanchard F., Razzari L., Bandulet H.-C., et al. Generation of 1.5 μJ single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture ZnTe crystal // *Opt. Express.* 2007. Vol. 15, no. 20. P. 13212—13220.
- [25] Hebling J., Yeh K., Hoffmann M. C., Nelson K. A. High-power THz generation, THz nonlinear optics, and THz nonlinear spectroscopy // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2008. Vol. 14, no. 2. P. 345—353.
- [26] Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., et al. Generation of unipolar pulses in nonlinear media // *JETP Lett.* 2017. Vol. 105, no. 6. P. 408—418.
- [27] You D., Bucksbaum P. H. Propagation of half-cycle far infrared pulses // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1997. Vol. 14, no. 7. P. 1651—1655.
- [28] Zinov'ev N. N., Nikoghosyan A. S., Chamberlain J. M. Terahertz radiation from a nonlinear slab traversed by an optical pulse // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98, no. 4. P. 044801.
- [29] Bakunov M. I., Maslov A. V., Bodrov S. B. Fresnel formulas for the forced electromagnetic pulses and their application for optical-to-terahertz conversion in nonlinear crystals // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 99, no. 20. P. 203904.

- [30] Bakunov M. I., Tsarev M. V., Bodrov S. B., Tani M. Strongly subluminal regime of optical-to-terahertz conversion in GaP // *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, no. 8. P. 083111.
- [31] Bakunov M. I., Maslov A. V., Tsarev M. V. Optically generated terahertz pulses with strong quasistatic precursors // *Phys. Rev. A.* 2017. Vol. 95, no. 6. P. 063817.
- [32] Tsarev M. V., Bakunov M. I. Tilted-pulse-front excitation of strong quasistatic precursors // *Opt. Express.* 2019. Vol. 27, no. 4. P. 5154–5164.
- [33] Lee Y.-S., Meade T., Perlin V., et al. Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 76, no. 18. P. 2505–2507.
- [34] Ravi K., Schimpf D. N., Kärtner F. X. Pulse sequences for efficient multi-cycle terahertz generation in periodically poled lithium niobate // *Opt. Express.* 2016. Vol. 24, no. 22. P. 25582–25607.
- [35] Ahr F., Jolly S. W., Matlis N. H., et al. Narrowband terahertz generation with chirped-and-delayed laser pulses in periodically poled lithium niobate // *Opt. Lett.* 2017. Vol. 42, no. 11. P. 2118–2121.
- [36] Vodopyanov K. L. Optical THz-wave generation with periodically-inverted GaAs // *Laser Photonics Rev.* 2008. Vol. 2, no. 1/2. P. 11–25.
- [37] Weling A. S., Auston D. H. Novel sources and detectors for coherent tunable narrow-band terahertz radiation in free space // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1996. Vol. 13, no. 12. P. 2783–2792.
- [38] Chen Z., Zhou X., Werley C. A., Nelson K. A. Generation of high power tunable multicycle terahertz pulses // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99, no. 7. P. 071102.
- [39] Lu J., Hwang H. Y., Li X., et al. Tunable multi-cycle THz generation in organic crystal HMQ-TMS // *Opt. Express.* 2015. Vol. 23, no. 17. P. 22723–22729.
- [40] Stepanov A. G., Hebling J., Kuhl J. Generation, tuning, and shaping of narrow-band, picosecond THz pulses by two-beam excitation // *Opt. Express.* 2004. Vol. 12, no. 19. P. 4650–4658.
- [41] Gingras L., Cooke D. G. Direct temporal shaping of terahertz light pulses // *Optica.* 2017. Vol. 4, no. 11. P. 1416–1420.

Список публикаций по диссертации

- [A1] Sychugin S. A., Mashkovich E. A., Maslov A., Bakunov M. I. Terahertz Cherenkov radiation from a tightly focused ultrashort laser pulse in an electro-optic medium // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2019. Vol. 36, no. 4. P. 1101—1107.
- [A2] Efimenko E. S., Sychugin S. A., Tsarev M. V., Bakunov M. I. Quasistatic precursors of ultrashort laser pulses in electro-optic crystals // *Phys. Rev. A*. 2018. Vol. 98, no. 1. P. 013842.
- [A3] Mashkovich E. A., Sychugin S. A., Bakunov M. I. Generation of narrowband terahertz radiation by an ultrashort laser pulse in a bulk LiNbO_3 crystal // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2017. Vol. 34, no. 9. P. 1805—1810.
- [A4] Sychugin S. A., Anisimov E. A., Bakunov M. I. Cherenkov-type terahertz emission from ultrafast magnetization in a slab of magneto-optic material // *J. Opt.* 2015. Vol. 17, no. 3. P. 035507.
- [A5] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Генерация терагерцового черенковского излучения импульсом оптонамагниченности // *Вестник ННГУ*. 2014. Т. 1(2). С. 196—200.
- [A6] Bakunov M. I., Efimenko E. S., Tsarev M. V., Sychugin S. A. Terahertz pulses with strong dc precursors // Technical program The 43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2018), Nagoya, Japan, September 9-14, 2018. Tu-A2-1c—4.
- [A7] Bakunov M. I., Maslov A. V., Tsarev M. V., et al. Strong dc precursors of intense laser pulses in electro-optic crystals // Conference Program And Proceedings The 7th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS 2018), Yokohama, Japan, April 24-27, 2018. ALPS16-F2—1.
- [A8] Efimenko E. S., Sychugin S. A., Tsarev M. V., Bakunov M. I. Generation of dc fields ahead of ultrashort laser pulses in electro-optic crystals // Proceedings of 3rd International Conference «Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications» (TERA-2018), Nizhny Novgorod, Russia, October 22-25, 2018. Section 3. P. 13—14.
- [A9] Bakunov M. I., Efimenko E. S., Tsarev M. V., Sychugin S. A. Terahertz pulses with dc precursors // Program & Abstract book. International Conference on Microwave & THz Technologies and Wireless Communications (IRPhE' 2018), Aghveran, Armenia, September 19-21, 2018. TH—2.
- [A10] Bakunov M. I., Efimenko E. S., Tsarev M. V., Sychugin S. A. Quasistatic fields propagating ahead of ultrashort laser pulses in electro-optic crystals // Book of Abstracts International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2018), Moscow, Russia, October 1-5, 2018. P. 182—183.

- [A11] Bakunov M. I., Mashkovich E. A., Sychugin S. Narrowband terahertz generation by an ultrashort laser pulse in bulk LiNbO_3 // Program and abstracts of The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2017 (IW-FIRT 2017) and The 2nd International Symposium on Development of High Power Terahertz Science and Technology (DHP-TST 2017), Fukui, Japan, March 7-9, 2017. 8a–4.
- [A12] Mashkovich E. A., Sychugin S. A., Bakunov M. I. Narrow-band terahertz emission from an ultrashort laser pulse in a bulk lithium niobate crystal // Abstracts. Progress In Electromagnetics Research Symposium 2017 (PIERS 2017), St. Petersburg, Russia, May 22-25, 2017. P. 1370.
- [A13] Машкович Е. А., Сычугин С. А., Бакунов М. И. Преобразование ультракоротких лазерных импульсов в узкополосное терагерцовое излучение в кристалле ниобата лития // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ. 2017. С. 40–41.
- [A14] Sychugin S. A., Bakunov M. I. Terahertz emission from a tightly focused ultrashort laser pulse in an electro-optic crystal // Conference program, 8th UK, Europe, China conference on Millimetre Waves and Terahertz Technologies, Cardiff, United Kingdom, September 14-16, 2015. P. 101.
- [A15] Sychugin S. A., Bakunov M. I. Terahertz Cherenkov radiation from focused laser pulses // Book of Abstracts, 11th International Young Scientist conference «Development in Optics and Communications 2015», Riga, Latvia, April 8–10, 2015. P. 2.
- [A16] Sychugin S. A., Bakunov M. I. Terahertz Cherenkov radiation from a focused laser beam in an electro-optic medium // Technical Program, 16th International Conference on Laser Optics 2014, Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 4, 2014. P. 45.
- [A17] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Черенковское излучение терагерцовых волн остросфокусированными ультракороткими лазерными импульсами // Тезисы докладов молодых ученых, XVII научная школа «Нелинейные волны – 2016», Нижний Новгород, Россия, 27 февраля - 4 марта, 2016. С. 142.
- [A18] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Оптико-терагерцовый преобразователь на эффекте Черенкова // Программа XI научно-технической конференции «Высокие технологии в атомной отрасли. Молодежь в инновационном процессе», Нижний Новгород, Россия, 22-24 сентября, 2016.

- [A19] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Генерация терагерцового излучения сфокусированными ультракороткими лазерными импульсами в электрооптических средах // Труды XVIII научной конференции по радиофизике, посвященной Дню радио (Нижний Новгород, 12-16 мая 2014 г.) 2014. С. 177—178.
- [A20] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Генерация терагерцового черенковского излучения сфокусированными лазерными импульсами // XIX Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки. 2014. С. 66—67.
- [A21] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Черенковское излучение терагерцовых волн релятивистски движущейся областью оптонамагниченности // Труды XVII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения В.С. Троицкого (Нижний Новгород, 13-17 мая 2013 г.) 2013. С. 167—169.
- [A22] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Черенковское излучение терагерцовых волн импульсом оптонамагниченности // Российские чтения-конкурс памяти нижегородских ученых: сборник научных статей и тезисов исследовательских работ. (Посвящается 100-летию со дня рождения В.С. Троицкого). Том 1. 2013. С. 244—247.
- [A23] Сычугин С. А., Бакунов М. И. Генерация терагерцового черенковского излучения импульсом оптонамагниченности // Форум молодых ученых. Тезисы докладов. Том 1. 2013. С. 209—210.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Черенковское излучение терагерцовых волн при оптическом выпрямлении сфокусированных лазерных импульсов

- 1.1 Введение
- 1.2 Модель и основные уравнения
- 1.3 Формализм решения
 - 1.3.1 Фокусировка в линию
 - 1.3.2 Адиабатическое приближение
 - 1.3.3 Фокусировка в пятно
- 1.4 Анализ и результаты: LiNbO_3 с ИК накачкой
 - 1.4.1 Двумерный случай
 - 1.4.2 Трёхмерный случай
- 1.5 Экспериментальная проверка
- 1.6 Выводы

Глава 2. Терагерцовое излучение от движущейся области магнетизации в слое магнитооптического материала

- 2.1 Введение
- 2.2 Схема генерации и модель
- 2.3 Формализм решения
- 2.4 Расчет для кристалла TGG
- 2.5 Выводы

Глава 3. Квазистатические предвестники мощных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах

- 3.1 Введение
- 3.2 Модель и основные уравнения
- 3.3 Влияние ширины лазерного пучка
- 3.4 Влияние истощения накачки
- 3.5 Накачка chirпированными лазерными импульсами
- 3.6 Влияние керровской нелинейности
- 3.7 Выводы

Глава 4. Генерация узкополосного терагерцового излучения при нелинейном смешивании ультракоротких импульсов o, e -волн в кристалле LiNbO_3 .

- 4.1 Введение
- 4.2 Схема генерации и ее теоретическое описание
- 4.3 Излучение из кристалла во встречном направлении
- 4.4 Излучение из кристалла в попутном направлении
- 4.5 Выводы
- 4.6 Приложение. Эффективный нелинейный коэффициент LiNbO_3

Заключение

Список литературы

Список публикаций по диссертации

Сычугин Сергей Александрович

Эффективные режимы генерации униполярных, биполярных и многопериодных терагерцовых полей ультракороткими лазерными импульсами в нелинейных кристаллах

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография Нижегородского госуниверситета им. Н. И. Лобачевского.
603000, Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37.