

*На правах рукописи*



**Абрамовский Никита Андреевич**

**Опико-терагерцовые конверторы на основе  
электрооптических кристаллов с неколлинеарным  
распространением импульса накачки и терагерцовых волн**

Специальность 1.3.19. Лазерная физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2023

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:** **Урюпин Сергей Александрович,**  
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник,  
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

**Овчинников Андрей Владимирович,**  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
Объединенный институт высоких температур РАН,  
Москва.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург

Защита состоится 18 октября 2023 г. в 17 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/1369>.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 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

В настоящее время в связи с развитием методов генерации электромагнитного излучения терагерцового диапазона частот все шире становится круг научных и практических приложений терагерцового излучения. Ставшие уже традиционными техники терагерцовой спектроскопии во временной области и терагерцового имиджинга [1, 2] находят применение для решения новых практических задач, например, для неразрушающего контроля композитных материалов и покрытий в автомобильной и авиационной промышленности [3, 4], инспекции почтовых отправок [5], контроля качества продуктов питания [6]. Терагерцовые поля высокой напряженности ( $>1$  МВ/см) используются для ускорения, компрессии и характеристики электронных сгустков [7, 8], управления намагниченностью материалов и динамическими состояниями в веществе [9, 10], перспективны для развития методов нелинейной спектроскопии [11] и других целей.

Одним из наиболее распространенных методов генерации импульсного терагерцового излучения стало оптическое выпрямление фемтосекундных лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона в электрооптических (квадратично нелинейных) кристаллах. По сравнению с другим распространенным методом терагерцовой генерации, основанным на использовании фотопроводящих антенн [12], оптическое выпрямление обеспечивает генерацию более широкополосных и более сильных терагерцовых полей. В методе оптического выпрямления лазерный импульс наводит в электрооптическом кристалле импульс нелинейной поляризации, форма которого повторяет огибающую оптической интенсивности. Нелинейная поляризация движется в кристалле вместе с лазерным импульсом с оптической групповой скоростью и служит источником терагерцовых волн. Необходимым условием эффективной генерации терагерцовых волн является наличие оптико-терагерцового синхронизма: лазерный импульс должен двигаться синхронно с фазовым фронтом терагерцовой волны. В случае коллинеарного распространения это возможно только при равенстве оптического группового индекса и терагерцового показателя преломления, что ограничивает выбор кристалла и длины волны лазера. Избавиться от ограничений позволяют две широко используемые в настоящее время неколлинеарные схемы генерации: одна основана на черенковском излучении терагерцовых волн остро сфокусированными оптическими пучками [13], другая - на генерации терагерцовых волн оптическими импульсами со скошенным (относительно фазовых фронтов) фронтом интенсивности [14].

Оптическое выпрямление скошенных импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) стало в настоящее время основным методом генерации сильных (на уровне МВ/см и Т) квазиоднопериодных электромагнитных полей в низкочастотной ( $\sim 0,1-2$  ТГц) части терагерцового спектра, оптимальных для целого ряда приложений. С помощью данного метода достигнуты высокие энергии терагерцовых импульсов: 0,125 [15], 0,2 [16] и 0,4 мДж [17] при энергиях накачки 45, 70 и 58 мДж соответственно. Криогенное охлаждение кристалла, оптимизация chirpa и спектра импульса накачки позволило достичь рекордных

значений терагерцовой энергии 1,4 мДж при энергии накачки 214 мДж [18] и 13,5 мДж при энергии накачки 1,2 Дж [19].

В стандартной схеме скашивание лазерного импульса достигается за счет дифракции на отражательной решетке, изображение которой переносится в кристалл ниобата лития с помощью линзы или телескопа. Кристалл ниобата лития имеет форму призмы со скошенной под углом  $63^\circ$  (параллельно фронту импульса накачки) выходной гранью, что обеспечивает вывод терагерцового излучения из кристалла по нормали к грани.

Для повышения энергии генерируемых терагерцовых импульсов необходимо увеличивать энергию импульсов накачки, одновременно расширяя оптический пучок, чтобы предотвратить пробой кристалла и снизить вредное влияние нелинейностей высокого порядка [20]. Расширение пучка подразумевает увеличение размера призм. Так, например, в рекордном эксперименте [18] использовались две сложенные вместе призмы со сторонами примерно 6-7 см и суммарной высотой 8 см. Еще большие размеры необходимы для повышения энергии накачки до уровня  $\geq 1$  Дж.

Использование призм  $\text{LiNbO}_3$  неэффективно. Из-за сильной угловой дисперсии скошенный импульс накачки быстро расплывается в кристалле при удалении от плоскости изображения дифракционной решетки, поэтому лишь малая (толщиной  $< 1$  мм при длительности импульса  $< 200$  фс [21, 22]) окрестность этой плоскости дает вклад в генерацию терагерцового излучения. Чтобы ослабить влияние сильного поглощения терагерцовых волн в  $\text{LiNbO}_3$ , плоскость изображения решетки располагают у выходной грани кристалла. При этом значительная часть кристалла, предшествующая плоскости изображения, не используется для генерации и фактически играет роль согласующей призмы для ввода пучка накачки в рабочую область кристалла.

Уменьшить влияние угловой дисперсии и тем самым повысить эффективность использования объема кристалла можно, увеличивая длительность импульса накачки и, за счет этого, длину его дисперсионного расплывания (до размеров кристалла). При этом, однако, возникает проблема сильной поперечной неоднородности генерируемого терагерцового пучка. Терагерцовые волны, генерируемые противоположными краями пучка накачки (у вершины и основания призмы), имеют разные длины оптико-терагерцового взаимодействия. Кроме того, различные части импульса накачки проходят разные расстояния в призме и вследствие этого по-разному искажаются под действием факторов самомодуляции и обратного воздействия генерируемых терагерцовых волн. Все это приводит к поперечной неоднородности интенсивности и даже временной формы поля в терагерцовом пучке.

Для преодоления недостатков стандартной схемы оптического выпрямления скошенных импульсов в призмах из  $\text{LiNbO}_3$  ведется разработка схем на основе плоского слоя  $\text{LiNbO}_3$ . Предложены схемы с гравировкой ступенчатой структуры (эшелона) на входной границе слоя [23-25] и с размещением отражательной дифракционной решетки на задней границе слоя [26]. В диссертации предлагается и исследуется, как теоретически, так и экспериментально, более простая схема, в которой плоский слой  $\text{LiNbO}_3$  размещается между двумя

призмами – диэлектрической, служащей для ввода оптической накачки в слой  $\text{LiNbO}_3$ , и кремниевой, для вывода терагерцового излучения из слоя. По сути, диэлектрическая призма заменяет фронтальную часть призмы  $\text{LiNbO}_3$  стандартной схемы. Кремниевая призма необходима вследствие наклонного падения терагерцового излучения на выходную границу слоя  $\text{LiNbO}_3$  под углом, большим угла полного внутреннего отражения на границе с воздухом. В предлагаемой схеме могут быть использованы коммерчески доступные пластины  $\text{LiNbO}_3$  большого диаметра с накачкой широкоапертурными пучками тераваттных лазеров.

Метод оптико-терагерцовой конверсии скошенных лазерных импульсов предполагает использование лазеров с большой энергией импульса ( $\geq 1$  мДж), поскольку в этом методе ширина пучка накачки должна быть велика по сравнению с длиной терагерцовой волны и при этом, тем не менее, требуется обеспечить высокую оптическую интенсивность для эффективной нелинейной конверсии. Для конверсии лазерных импульсов меньшей энергии перспективна другая неколлинеарная схема, основанная на эффекте Черенкова. В черенковской схеме пучок накачки должен быть сфокусирован в размер меньше длины терагерцовой волны в одном (фокусировка в линию) или двух (фокусировка в пятно) направлениях. Это позволяет использовать импульсы накачки с энергией на уровне мкДж или нДж соответственно. В частности, черенковская схема перспективна для генерации терагерцового излучения с высокой средней мощностью импульсами иттербиевых лазеров с энергией  $\sim 1-100$  мкДж и высокой (мегагерцовой) частотой повторения.

Эффективным оптико-терагерцовым конвертором черенковского типа является структура, состоящая из тонкого (толщиной  $\sim 30-50$  мкм) слоя ниобата лития, помещенного между двумя кремниевыми призмами с углом при основании  $\approx 41^\circ$ , дополнительном к черенковскому углу в кремнии  $\approx 49^\circ$  (симметричная структура), или между призмой и подложкой (асимметричная структура) [27-32]. Использование кристалла ниобата лития в виде тонкого слоя и призм для поперечного вывода черенковского излучения из слоя позволяет снизить негативное влияние сильного терагерцового поглощения в ниобате лития. Кроме того, тонкий слой кристалла играет роль сверхразмерного диэлектрического волновода для излучения накачки, препятствуя его дифракционному расхождению [27]. Наиболее эффективно конвертор данного типа работает при фокусировке пучка накачки в линию, что обеспечивает генерацию черенковского клина (вместо конуса при фокусировке в пятно), более удобного для практических применений. В первой экспериментальной демонстрации конвертора использовалась структура длиной 8 мм со слоем ниобата лития толщиной 50 мкм, расположенным между подложкой из стекла BK7 и кремниевой призмой, и была достигнута эффективность 0,1% при конверсии импульсов титан-сапфирового лазера с энергией 40 мкДж [28]. Впоследствии в структуре длиной 1 см с более тонким (толщиной 35 мкм) слоем ниобата лития и подложкой из металла была достигнута эффективность 0,25% при конверсии лазерных импульсов с энергией 15-20 мкДж [30]. Недавно увеличение длины волны накачки с 800 до 2100 нм позволило поднять эффективность до 1,3% [32]. Таким образом,

конверторы черенковского типа обеспечивают эффективность, сравнимую с методом конверсии скошенных импульсов, но при гораздо более низких (десятки мкДж) энергиях импульса накачки.

Недостатком асимметричных черенковских конверторов является наличие провала в генерируемом спектре, возникающего в результате деструктивной интерференции терагерцевых волн, выходящих в призму из слоя ниобата лития непосредственно и после отражения от подложки [29-31]. Например, при толщине слоя 30 мкм провал приходится на частоту  $\approx 2$  ТГц в случае металлической подложки и  $\approx 1,4$  ТГц в случае, когда подложка отсутствует (отражение от воздуха) [29]. Устранить провал, в принципе, можно, уменьшая толщину слоя ниобата лития. Данный подход был реализован с помощью структуры со слоем допированного MgO ниобата лития толщиной 3,8 мкм, расположенным между подложкой из недопированного ниобата лития и решеткой кремниевых призм [33]. Структура генерировала излучение на разностной частоте двух лазерных линий с перестройкой в широком диапазоне  $\sim 1-7$  ТГц без каких-либо провалов. Недостатком такой структуры, однако, является низкая эффективность ввода излучения накачки в столь тонкий слой кристалла: только 6% энергии падающего лазерного излучения регистрировались на выходе из структуры [33], что сильно снижает общую эффективность оптико-терагерцевой конверсии. Структуры с гребневым оптическим волноводом из ниобата лития имеют тот же недостаток и к тому же генерируют излучение неудобной для практического использования конической формы [34].

Предложенный еще в пионерской работе [27] симметричный дизайн черенковского конвертора с двумя кремниевыми призмами обеспечивает отсутствие провала в генерируемом спектре. При этом, однако, выходящие терагерцевые пучки, распространяются в почти ортогональных направлениях [27, 35], что затрудняет их совместное использование. В диссертации предлагается и исследуется, как теоретически, так и экспериментально, усовершенствованный дизайн симметричного черенковского конвертора, обеспечивающий генерацию двух параллельно распространяющихся на небольшом расстоянии друг от друга терагерцевых пучков (фактически с единым плоским фронтом), что позволяет использовать всю излученную энергию и в то же время избежать провала в спектре.

Из-за необходимости фокусировки пучка накачки в черенковских конверторах оптическая интенсивность в них достигает  $\sim 1$  ТВт/см<sup>2</sup> при сравнительно небольшой (в несколько десятков мкДж) энергии импульса накачки. Высокая оптическая интенсивность приводит к насыщению эффективности конверсии и, более того, препятствует дальнейшему увеличению энергии импульса накачки из-за опасности пробоя кристалла. Как следствие, черенковские конверторы, хотя и обеспечивают практически такую же эффективность конверсии, что и схема с оптическим выпрямлением скошенных лазерных импульсов ( $\sim 0,1-1\%$ ), но генерируют терагерцевые импульсы меньшей энергии (менее 100 нДж) из-за ограниченности энергии импульса накачки десятками мкДж (вместо мДж в схеме со скошенными лазерными импульсами). В диссертации экспериментально исследована возможность масштабирования генерируемой

черенковскими конверторами терагерцовой энергии путем увеличения поперечного размера конвертора и пучка накачки до нескольких см и увеличения энергии импульса накачки до сотен мкДж. Как результат достигнута энергия терагерцового импульса 1,2 мкДж и напряженность терагерцового поля 0,5 МВ/см.

При высоких интенсивностях оптической накачки, использование которых необходимо для генерации сильных терагерцовых полей, становится существенным многофотонное поглощение оптического излучения, которое сопровождается генерацией свободных носителей в кристалле. Остающиеся позади импульса накачки носители поглощают генерируемое терагерцовое излучение, что считается основным фактором, ограничивающим эффективность оптико-терагерцовой конверсии в коллинеарной схеме, например, при выпрямлении импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле ZnTe [36-38]. При этом также наблюдается смещение генерируемого спектра в область низких частот [39]. Негативное влияние генерации свободных носителей на оптико-терагерцовую конверсию скошенных лазерных импульсов было также продемонстрировано, как экспериментально [40], так и численным моделированием [41].

Влияние генерации свободных носителей на черенковское излучение терагерцовых волн ранее не исследовалось. Между тем для черенковской схемы можно ожидать даже положительного эффекта от генерации носителей. Действительно, поскольку черенковское излучение расходится в стороны от создаваемого импульсом накачки плазменного следа, оно не должно испытывать сильного поглощения на носителях. В то же время носители сразу после рождения испытывают ускорение электрическим полем, сопровождающим движущийся вместе с накачкой импульс нелинейной поляризации кристалла. Возникающий при ускорении всплеск тока может генерировать электромагнитные поля дополнительно к черенковскому излучению от нелинейной поляризации. Как недавно было показано, в коллинеарной схеме подобный механизм может приводить к генерации электромагнитных предвестников перед импульсом накачки [42]. В диссертации теоретически и экспериментально исследуется влияние генерации носителей на черенковское излучение терагерцовых волн.

## **Цель и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является развитие нелинейно-оптических методов конверсии фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцовое излучение в электрооптических кристаллах в условиях неколлинеарного распространения лазерного импульса накачки и генерируемых терагерцовых волн.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка и экспериментальная апробация оптико-терагерцового конвертора лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности в виде плоского слоя  $\text{LiNbO}_3$ , размещенного между диэлектрической и кремниевой согласующими призмами;
- разработка и экспериментальная апробация оптико-терагерцового конвертора черенковского типа в виде тонкого слоя ниобата лития, расположенного между двумя кремниевыми призмами полного внутреннего отражения, со

сложением двух генерируемых терагерцовых пучков в один;

- экспериментальное исследование возможностей масштабирования генерируемой терагерцовой энергии в оптико-терагерцовом конверторе черенковского типа путем увеличения размеров конвертора и пучка накачки и увеличения энергии импульса накачки;

- теоретическое и экспериментальное исследование сильнонелинейных режимов генерации черенковского терагерцового излучения высокоинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах в условиях многофотонного поглощения и генерации свободных носителей.

## **Научная новизна работы**

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Предложена новая схема конвертора лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности в терагерцовое излучение, в которой, в отличие от стандартной схемы, используется кристалл ниобата лития в виде плоского слоя, а не призмы. В отличие от других разрабатываемых в настоящее время схем с плоским слоем в предложенной схеме не требуется нанесение решеток на поверхность слоя. По сравнению со стандартной схемой предложенная схема обеспечивает более высокое качество генерируемого терагерцового пучка и перспективна для конверсии лазерных импульсов большой (порядка джоуля) энергии. Работоспособность предложенного конвертора подтверждена экспериментально.

2. Предложена новая схема оптико-терагерцового конвертора черенковского типа в виде тонкого слоя ниобата лития, расположенного между двумя кремниевыми призмами полного внутреннего отражения, которая обеспечивает симметричный двусторонний вывод в свободное пространство генерируемого в слое терагерцового излучения и сложение двух терагерцовых пучков в один. Данная схема позволяет избавиться от провала в терагерцовом спектре, характерного для стандартной асимметричной схемы с односторонним выводом терагерцового излучения, и обеспечивает высокое качество генерируемого терагерцового пучка. Достоинства нового конвертора подтверждены экспериментально.

3. Впервые экспериментально исследована возможность масштабирования генерируемой терагерцовой энергии в оптико-терагерцовом конверторе черенковского типа путем увеличения поперечного размера конвертора и пучка накачки до нескольких сантиметров и увеличения энергии импульса накачки до сотен микроджоулей.

4. Впервые теоретически и экспериментально исследованы сильнонелинейные режимы генерации черенковского терагерцового излучения высокоинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами в электрооптических кристаллах в условиях многофотонного поглощения и генерации свободных носителей.



## Практическая значимость работы

Предложенный в диссертации оптико-терагерцовый конвертор скошенных лазерных импульсов, состоящий из входной диэлектрической призмы, широкоапертурной пластины ниобата лития и выходной кремниевой призмы, перспективен как источник терагерцовых импульсов большой (в несколько мДж) энергии с высоким качеством терагерцового пучка.

Предложенная в диссертации сэндвич-структура в виде тонкого слоя ниобата лития между двумя кремниевыми призмами, позволяющая получать терагерцовое излучение без интерференционного провала в спектре, перспективна для использования в терагерцовой спектроскопии во временной области. Кроме того, как экспериментально продемонстрировано в работе [43], в двухпризменной сэндвич-структуре практически отсутствует временной джиттер выходного терагерцового импульса при дрожаниях пучка накачки, что делает структуру привлекательной для применения к задачам терагерцового ускорения заряженных частиц и управления электронными сгустками фемтосекундной и аттосекундной длительности.

Оптико-терагерцовый конвертор черенковского типа с большим (в несколько см) поперечным размером и накачкой широким лазерным пучком с энергией лазерного импульса в сотни микроджоулей может стать более простой и удобной заменой распространенной технике оптического выпрямления скошенных лазерных импульсов.

Предсказанный и подтвержденный экспериментально в диссертации эффект расширения спектра терагерцового черенковского излучения при оптическом выпрямлении высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах в режиме многофотонной генерации свободных носителей может быть использован для повышения широкополосности оптико-терагерцовых конверторов.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Конвертором фемтосекундных лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности в терагерцовое излучение может служить структура, состоящая из пластины ниобата лития толщиной около 1 мм, диэлектрической призмы для ввода лазерного излучения в слой и кремниевой призмы для вывода терагерцового излучения из слоя. В отличие от стандартной схемы конверсии скошенных лазерных импульсов в вырезанном в виде призмы кристалле ниобата лития схема с плоским слоем позволяет использовать в качестве накачки лазерные пучки большой (в несколько см) апертуры и высокой (тераваттного уровня) мощности без проявления паразитных нелинейно-оптических искажений пучка накачки. Это дает возможность масштабировать энергию генерируемого терагерцового излучения при сохранении хорошего качества терагерцового пучка. В эксперименте с использованием слоя ниобата лития небольшого поперечного размера ( $1 \times 2 \text{ см}^2$ ), входной призмы в виде кюветы с водой и накачки в несколько мДж продемонстрирована эффективность конверсии на том же уровне ( $\sim 0,1\%$ ), что и в стандартной схеме.

2. Структура в виде тонкого (толщиной 30-50 мкм) слоя кристалла ниобата лития, расположенного между двумя кремниевыми призмами полного внутреннего отражения, может служить эффективным конвертором фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцовое излучение с равномерным спектром и коллимированным выходным пучком. Распространяющийся в кристаллическом слое лазерный импульс генерирует в кремниевых призмах терагерцовое черенковское излучение, расходящееся от слоя под черенковским углом. Призмы, имеющие в сечении прямоугольный треугольник с одним из углов, равным половине черенковского угла, обеспечивают полное внутреннее отражение терагерцового излучения от границы кремний-воздух и коллимацию отраженных пучков вдоль лазерного пучка накачки. Вышедшие из призм два терагерцовых пучка формируют единый пучок с плоским волновым фронтом. Симметричный вывод терагерцового излучения из слоя ниобата лития позволяет избавиться от провала в терагерцовом спектре, характерном для стандартных оптико-терагерцовых конверторов черенковского типа с асимметричным (односторонним) выводом терагерцового излучения.

3. Генерируемая черенковскими оптико-терагерцовыми конверторами терагерцовая энергия может быть масштабирована путем увеличения поперечного размера конвертора до нескольких см, соответствующего расширению в этом направлении пучка накачки телескопом из цилиндрических линз и увеличения энергии импульса накачки до сотен мкДж. При этом может быть достигнута энергия терагерцового импульса более 1 мкДж и напряженность терагерцового поля на суб-МВ/см уровне.

4. Черенковское излучение терагерцового диапазона частот, генерируемое при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах, может испытывать существенное уширение спектра в режиме многофотонного поглощения лазерной накачки. Механизм уширения спектра связан с излучением от тока свободных носителей, генерируемых в кристалле при многофотонном поглощении лазерного импульса и ускоряемых электрическим полем выпрямленного лазерного импульса.

### **Апробация результатов работы и публикации**

Диссертационная работа выполнена на кафедре общей физики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского в 2018-2022 годах. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, [A1–A5], а также 5 работ в сборниках трудов конференций [A6–A10].

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: 5-th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications” (TERA-2023, Москва, 2023), International Conference Laser Optics (ICLO 2022, Санкт-Петербург, 2022), 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021, Чэнду, Китай, 2021), 25 Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2020).

Диссертационная работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 2032-90080.

### **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.

### **Методология и методы исследования**

Применявшиеся экспериментальные установки основаны на апробированной общей методологии терагерцовой спектроскопии во временной области, в соответствии с которой лазерный импульс разделяется на две части: одна используется в качестве импульса накачки для генерации терагерцового излучения, другая – в качестве пробного импульса для детектирования. Источниками оптического излучения служили титан-сапфировые фемтосекундные лазерные системы миллиджоульного уровня энергии с длиной волны 0,8 мкм FemtoPower (FemtoLasers, Австрия), Astrella (Coherent, США) и система ИПФ РАН, а также оптические осцилляторы C-Fiber (Menlo Systems, Германия) с длиной волны 1,56 мкм и Tsunami (Spectra-Physics, США) с длиной волны 0,8 мкм.

Мощность терагерцового излучения измерялась с помощью ячейки Голя GC-1D (Tudex, Россия) и пироэлектрического детектора (Gentec, США). Ширина терагерцового пучка измерялась методом «knife-edge», для измерения ширины оптического пучка использовалась CCD-камера pco.pixelfly usb (Excelitas PCO GmbH, Германия). Длительность оптических импульсов измерялась автокоррелятором Mini TRA (APE, Германия). Использовалось оптомеханическое оборудование компаний Thorlabs (США) и PI (Германия). Спектры измеренных электрооптических сигналов рассчитывались методом быстрого преобразования Фурье.

### **Личный вклад автора**

Все результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка задач и анализ полученных результатов проводились автором совместно с научным руководителем Бакуновым М.И. и другими соавторами опубликованных работ. Экспериментальные исследования по главам 1, 3 проводились совместно с Бодровым С.Б., по главе 2 – с Гореловым С.Д. Расчеты по главе 4 проводились совместно с Ефименко Е.С.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка

литературы и списка публикаций по диссертации. Общий объем диссертации составляет 89 страниц, включая 35 рисунков, список литературы из 80 наименований на 8 страницах и список публикаций по диссертации из 10 наименований на 2 страницах.

## Краткое содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, указываются научная новизна и практическая значимость диссертации, кратко описывается ее содержание, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

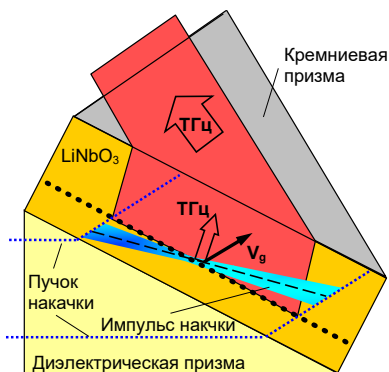


Рис. 1. Опико-терагерцовый конвертер скошенных лазерных импульсов в виде пластины ниобата лития, расположенной между двумя согласующими призмами.

В п. 1.2 проведено теоретическое исследование конверсии. Проанализирована зависимость эффективности конверсии от параметров конвертора. Определены параметры оптической схемы (дифракционной решетки, телескопа), необходимые для формирования нужного угла скоса лазерного импульса в слое ниобата лития.

В п. 1.3 приведена схема эксперимента по апробации конвертора, в котором в качестве входной призмы использовалась кювета с водой, а слой ниобата лития имел толщину

**Первая глава** посвящена разработке и экспериментальному исследованию опико-терагерцового конвертора скошенных фемтосекундных лазерных импульсов в виде структуры из двух согласующих призм и расположенной между ними пластины ниобата лития.

В п. 1.1 приведена схема конвертора (рис. 1), описан принцип его работы, сделан расчёт параметров согласующих призм.

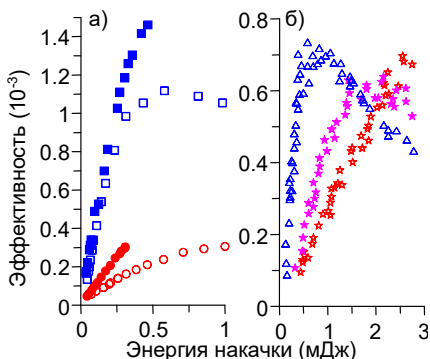


Рис. 2. Эффективность конверсии в зависимости от энергии накачки при различной длительности импульса и ширине пучка накачки: а) 3,7 мм, 60 фс (пустые) и 120 фс (заполненные) и б) 150 фс, 6 мм (пустые) и 4 мм (заполненные). Синие – стандартная схема, красные – новая.

1 мм и поперечные размеры  $1 \times 2 \text{ см}^2$ .

Для накачки использовались две титан-сапфировые лазерные системы: одна – с энергией импульса 5 мДж, длительностью импульса 60 фс и частотой повторения импульсов 1 кГц (Astrella, Coherent), другая – с энергией импульса 10 мДж, длительностью импульса 150 фс и частотой повторения 10 Гц (ИПФ РАН). Приведены и проанализированы экспериментальные зависимости эффективности конверсии от энергии и длительности импульса накачки, ширины пучка накачки (рис. 2). Приведены спектры генерируемого излучения и результаты исследования качества терагерцового пучка.

В п. 1.4 сделаны выводы по первой главе.

**Вторая глава** посвящена разработке и экспериментальному исследованию оптико-терагерцового конвертора черенковского типа с двусторонним выводом терагерцового излучения из слоя ниобата лития через призмы полного внутреннего отражения и формированием единого терагерцового пучка.

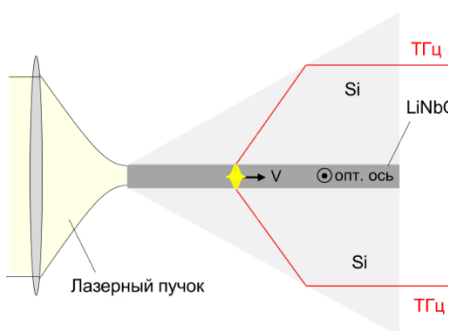


Рис. 3. Оптико-терагерцовый конвертор черенковского типа с двусторонним выводом терагерцового излучения из слоя ниобата лития через призмы полного отражения.

В п. 2.3 приведены результаты экспериментального исследования конвертора со слоем ниобата лития толщиной 55 мкм, шириной 1 см и длиной 9 мм при накачке титан-сапфировым усилителем с длительностью импульса 35 фс и энергией импульса до 10 мкДж (FemtoPower, FemtoLasers). Полученные осциллограммы и спектры терагерцовых импульсов (рис. 3) хорошо согласуются с численным расчетом. Приведенная зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от энергии импульса накачки демонстрирует насыщение на уровне 0,35%. Показано хорошее согласие экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных поперечных профилей терагерцового пучка на разных расстояниях от выхода конвертора.

В п. 2.1 дано описание схемы конвертора (рис. 3) с расчетом углов среза призм и приведена система уравнений для численного моделирования генерации терагерцового излучения и его выхода в свободное пространство.

В п. 2.2 приведены результаты численного моделирования конверсии методом конечных разностей во временной области (FDTD) – моментальные снимки пространственного распределения терагерцового поля (рис. 4), а также осциллограммы и спектры поля в различных точках. Показано, что выходящее в свободное пространство терагерцовое излучение имеет однородный фазовый фронт.

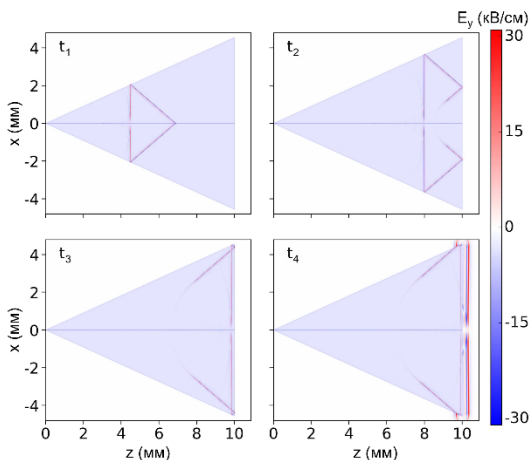


Рис. 4. Моментальные снимки электрического поля  $E_y$  в моменты времени  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ .

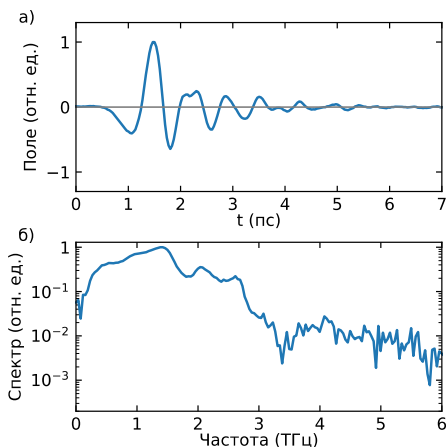


Рис. 5. а) Экспериментальная осциллограмма терагерцового поля и б) ее спектр.

(рис. 6). Особенностью обоих конверторов является большая ширина слоя ниобата лития – 5 см, что позволило расширить пучок накачки в одном направлении и сфокусировать его в ортогональном направлении в линию размером  $\sim 4$  см  $\times$  20 мкм на входной грани кристалла. Расширение фокальной области до  $\sim 4$  см позволило использовать импульсы накачки с энергией до 600 мкДж, что на порядок больше, чем в стандартных черенковских конверторах.

В п. 2.4 экспериментально продемонстрирована работоспособность конвертора при накачке титан-сапфировым оптическим осциллятором с малой (6 нДж) энергией импульса, что требует фокусировки лазерного пучка в пятно (а не линию, как при накачке усилителем) и приводит к генерации терагерцового излучения с коническим (а не клиновидным) фронтом.

В п. 2.5 сделаны выводы по второй главе.

**В третьей главе** экспериментально исследована возможность масштабирования генерируемой терагерцовой энергии в оптико-терагерцовом конверторе черенковского типа путем увеличения поперечного размера конвертора и пучка накачки до нескольких сантиметров и увеличения энергии импульса накачки до сотен микроджоулей.

В п. 3.1 приведено описание экспериментальной установки и двух использовавшихся в экспериментах асимметричных (с односторонним выводом терагерцового излучения) черенковских конверторов – с толщиной слоя ниобата лития 50 мкм и 500 мкм

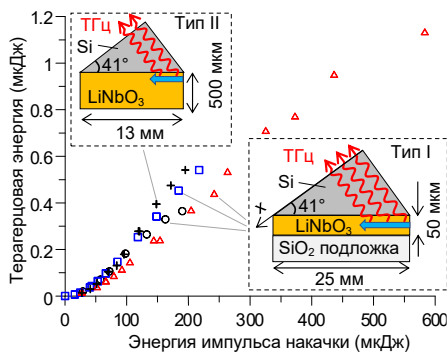


Рис. 6. Энергия терагерцового импульса в зависимости от энергии импульса накачки при длительностях импульса накачки 60 фс (кресты), 240 фс (квадраты) и 450 фс (треугольники) для конверторов двух типов.

В п. 3.2 приведены экспериментальные зависимости генерируемой терагерцовой энергии и эффективности конверсии от энергии импульса накачки (рис. 6), распределения энергии по поперечному сечению терагерцового пучка, а также осциллограммы и спектры терагерцового поля после его фокусировки. Максимальная энергия терагерцового импульса составила 1,2 мкДж (рис. 6), пиковое значение электрического поля в импульсе достигало 0,5 МВ/см. Установлено, что при высоких интенсивностях накачки конверсия происходит в основном на первом сантиметре длины конвертора вследствие трехфотонного поглощения накачки.

В п. 3.3 сделаны выводы по третьей главе.

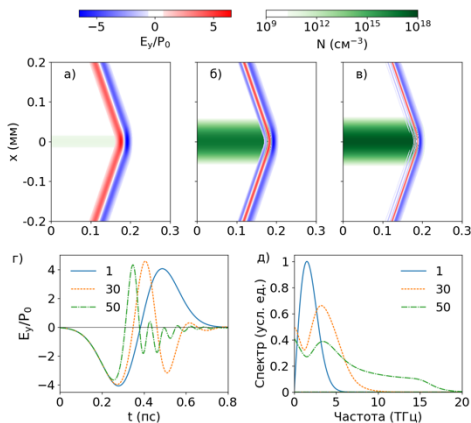


Рис. 7. а)-в) Распределения электрического поля и плотности плазмы при интенсивностях накачки 1, 30 и 50 ГВт/см<sup>2</sup>. г) Осциллограммы и д) спектры поля на черенковском клине.

В четвертой главе теоретически и экспериментально исследованы особенности черенковского излучения терагерцовых волн при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах в режиме многофотонного поглощения высокоинтенсивной лазерной накачки и генерации свободных носителей.

В п. 4.1 приведена система исходных уравнений и представлены результаты ее прямого численного интегрирования методом FDTD в идеализированном случае стационарного распространения лазерного импульса накачки (с длиной волны 1,7 мкм) в неограниченной электрооптической среде (кристалле GaP). Показано, что

мкм) в неограниченной электрооптической среде (кристалле GaP). Показано, что

при высоких интенсивностях накачки, когда за лазерным импульсом (вследствие четырехфотонного поглощения) остается плазменный канал с высокой плотностью свободных носителей, черенковское излучение испытывает значительное спектральное уширение. Механизм уширения спектра отнесен к излучению от тока фотогенерируемых свободных носителей при их ускорении электрическим полем выпрямленного лазерного импульса.

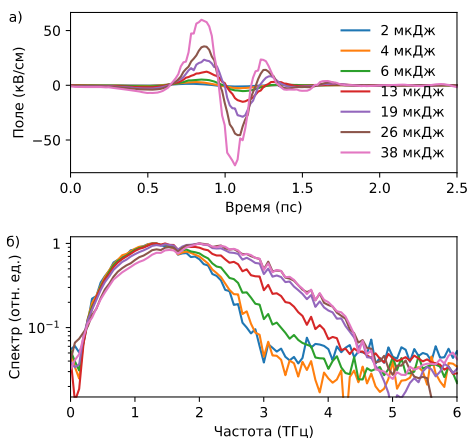


Рис. 8. а) Экспериментальные осциллограммы и б) их спектры при различных энергиях накачки.

В п. 4.2 путем численного моделирования показано, что эффект уширения спектра сохраняется при учете истощения накачки и переходных процессов в кристалле конечной толщины (с согласующей кремниевой призмой на его выходной границе).

В п. 4.3 приведены результаты экспериментального исследования влияния трехфотонного поглощения титан-сапфировой накачки на черенковское излучение в кристалле ниобата лития (рис. 8). Подтвержден эффект уширения спектра и его связь с генерацией свободных носителей.

В п. 4.4 сделаны выводы по четвертой главе.

**В заключении** представлены основные результаты диссертации.



## Основные результаты

1. Предложена новая схема нелинейно-оптической конверсии скошенных фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцовое излучение на основе структуры, состоящей из пластины ниобата лития толщиной несколько мм, диэлектрической призмы для ввода лазерного излучения в слой и кремниевой призмы для вывода терагерцового излучения из слоя. Получена теоретическая зависимость эффективности конверсии от параметров структуры (угла среза и показателя преломления диэлектрической призмы, толщины слоя ниобата лития). Определены параметры оптической схемы для формирования нужного угла скола лазерного импульса в слое ниобата лития. Для структуры со слоем ниобата лития небольшого поперечного размера ( $1 \times 2 \text{ см}^2$ ), входной призмы в виде кюветы с водой и накачки с энергией импульса в несколько мДж экспериментально достигнута эффективность конверсии на том же уровне ( $\sim 0,1\%$ ), что и в распространенной схеме с призмой из ниобата лития. Сделан вывод о перспективности новой схемы для конверсии лазерных пучков большой (в несколько см) апертуры и высокой (тераваттного уровня) мощности в высокоэнергетичное терагерцовое излучение с хорошим качеством пучка.

2. Предложена новая схема оптико-терагерцового конвертора черенковского типа в виде тонкого слоя ниобата лития, расположенного между двумя кремниевыми призмами полного внутреннего отражения, которая обеспечивает симметричный двусторонний вывод в свободное пространство генерируемого в слое терагерцового излучения и сложение двух терагерцовых пучков в один. Экспериментально продемонстрировано высокое качество генерируемого терагерцового пучка, а также отсутствие провала в терагерцовом спектре, характерного для стандартной асимметричной схемы с односторонним выводом терагерцового излучения.

3. Экспериментально продемонстрирована возможность масштабирования генерируемой терагерцовой энергии в оптико-терагерцовом конверторе черенковского типа путем увеличения поперечного размера конвертора и пучка накачки до нескольких сантиметров и увеличения энергии импульса накачки до сотен микроджоулей. Достигнута энергия терагерцового импульса более 1 мкДж и напряженность терагерцового поля около 0,5 МВ/см.

4. На основе прямого численного моделирования черенковского излучения терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 1,7 мкм при оптическом выпрямлении в кристалле GaP предсказан эффект уширения генерируемого терагерцового спектра в режиме, когда существенно четырехфотонное поглощение лазерной накачки. Предложен механизм уширения спектра, связанный с излучением от тока фотогенерируемых свободных носителей при их ускорении электрическим полем выпрямленного лазерного импульса.

## Список литературы

1. J. Neua and C.A. Schmuttenmaer, "Tutorial: An introduction to terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS)," *J. Appl. Phys.* **124**, 231101 (2018).
2. Q. Wang, L. Xie, and Y. Ying, "Overview of imaging methods based on terahertz time-domain spectroscopy," *Appl. Spectrosc. Rev.* **57**, 249 (2022).
3. S. Zhong, "Progress in terahertz nondestructive testing: A review," *Front. Mech. Eng.* **14**, 273 (2019).
4. F. Ellrich, M. Bauer, N. Schreiner, A. Keil, T. Pfeiffer, J. Klier, S. Weber, J. Jonuscheit, F. Friederich, and D. Molter, "Terahertz Quality Inspection for Automotive and Aviation Industries," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **41**, 470 (2020).
5. D. Molter, D. Hübsch, T. Sprenger, K. Hens, K. Nalpantidis, F. Platte, G. Torosyan, R. Beigang, J. Jonuscheit, G. von Freymann, and F. Ellrich, "Mail Inspection Based on Terahertz Time-Domain Spectroscopy," *Appl. Sci.* **11**, 950 (2021).
6. X. Fu, Y. Liu, Q. Chen, Y. Fu. and T. J. Cui, "Applications of Terahertz Spectroscopy in the Detection and Recognition of Substances," *Front. Phys.* **10**, 869537 (2022).
7. D. Zhang, A. Fallahi, M. Hemmer, H. Ye, M. Fakhari, Y. Hua, H. Cankaya, A.-L. Calendron, L.E. Zapata, N.H. Matlis, and F.X. Kärtner, "Femtosecond phase control in high-field terahertz-driven ultrafast electron sources," *Optica* **6**, 872 (2019).
8. H. Xu, L. Yan, Y. Du, W. Huang, Q. Tian, R. Li, Y. Liang, S. Gu, J. Shi, and C. Tang, "Cascaded high-gradient terahertz-driven acceleration of relativistic electron beams," *Nat. Photon.* **15**, 426 (2021).
9. P. Salén, M. Basini, S. Bonetti, J. Hebling, M. Krasilnikov, A.Y. Nikitin, G. Shamuilov, Z. Tibai, V. Zhaunerchyk, and V. Goryashko, "Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology," *Phys. Rep.* **836-837**, 1 (2019).
10. E.A. Mashkovich, K.A. Grishunin, R.M. Dubrovin, A.K. Zvezdin, R.V. Pisarev, and A.V. Kimel, "Terahertz light-driven coupling of antiferromagnetic spins to lattice," *Science* **374**, 1608 (2021).
11. J. Shan, A. Nahata, and T.F. Heinz, "Terahertz time-domain spectroscopy based on nonlinear optics," *J. Nonlinear Opt. Phys. Mater.* **11**, 31 (2002).
12. D.R. Bacon, J. Madéo, and K.M. Dani, "Photoconductive emitters for pulsed terahertz generation," *J. Opt.* **23**, 064001 (2021).
13. D.H. Auston, K.P. Cheung, J.A. Valdmanis, and D.A. Kleinman, "Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media," *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1555 (1984).
14. J. Hebling, G. Almási, I.Z. Kozma, and J. Kuhl, "Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation," *Opt. Express* **10**, 1161 (2002).
15. J. A. Fülöp, L. Pálfalvi, S. Klingebiel, G. Almási, F. Krausz, S. Karsch, and J. Hebling, "Generation of sub-mJ terahertz pulses by optical rectification," *Opt. Lett.* **37**, 557 (2012).
16. X.-J. Wu, J.-L. Ma, B.-L. Zhang, S.-S. Chai, Z.-J. Fang, C.-Y. Xia, D.-Y. Kong, J.-G. Wang, H. Liu, C.-Q. Zhu, X. Wang, C.-J. Ruan, and Y.- T. Li, "Highly

- efficient generation of 0.2 mJ terahertz pulses in lithium niobate at room temperature with sub-50 fs chirped Ti:sapphire laser pulses,” *Opt. Express* **26**, 7107 (2018).
17. J. A. Fülöp, Z. Ollmann, C. Lombosi, C. Skrobol, S. Klingebiel, L. Pálfalvi, F. Krausz, S. Karsch, and J. Hebling, “Efficient generation of THz pulses with 0.4 mJ energy,” *Opt. Express* **22**, 20155 (2014).
  18. B. Zhang, Z. Ma, J. Ma, X. Wu, C. Ouyang, D. Kong, T. Hong, X. Wang, P. Yang, L. Chen, Y. Li, and J. Zhang, “1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates,” *Laser Photonics Rev.* **15**, 2000295 (2021).
  19. X. Wu, D. Kong, S. Hao, M. Dai, S. Liu, J. Wang, and Z. Ren, “13.5-mJ THz Radiation from Lithium Niobates,” 2022 47th Int. Conf. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz) Delft, Netherlands, 2022, p. 1, doi: 10.1109/IRMMW-THz50927.2022.9895887.
  20. C. Lombosi, G. Polónyi, M. Mechler, Z. Ollmann, J. Hebling, and J. A. Fülöp, “Nonlinear distortion of intense THz beams,” *New J. Phys.* **17**, 083041 (2015).
  21. S.B. Bodrov, A.N. Stepanov, and M.I. Bakunov, “Generalized analysis of terahertz generation by tilted-pulse-front excitation in a LN prism,” *Opt. Express* **27**, 2396 (2019).
  22. M.I. Bakunov and S.B. Bodrov, “Full 3D+1 modeling of tilted-pulse-front setups for single-cycle terahertz generation: comment,” *J. Opt. Soc. Am. B* **38**, 2587 (2021).
  23. L. Pálfalvi, G. Tóth, L. Tokodi, Z. Márton, J. A. Fülöp, G. Almási, and J. Hebling, “Numerical investigation of a scalable setup for efficient terahertz generation using a segmented tilted-pulse-front excitation,” *Opt. Express* **25**, 29560 (2017).
  24. P. S. Nugraha, G. Krizsán, C. Lombosi, L. Pálfalvi, G. Tóth, G. Almási, J. A. Fülöp, and J. Hebling, “Demonstration of a tilted-pulse-front pumped plane-parallel slab terahertz source,” *Opt. Lett.* **44**, 1023 (2019).
  25. G. Krizsán, Z. Tibai, G. Tóth, P. S. Nugraha, G. Almási, J. Hebling, and J. Fülöp, “Uniformly scalable lithium niobate THz pulse source in transmission geometry,” *Opt. Express* **30**, 4434 (2022).
  26. G. Tóth, L. Pálfalvi, Z. Tibai, L. Tokodi, J. A. Fülöp, Z. Márton, G. Almási, and J. Hebling, “Single-cycle scalable terahertz pulse source in reflection geometry,” *Opt. Express* **27**, 30681 (2019).
  27. S.B. Bodrov, M.I. Bakunov, and M. Hangyo, “Efficient Cherenkov emission of broadband terahertz radiation from an ultrashort laser pulse in a sandwich structure with nonlinear core,” *J. Appl. Phys.* **104**, 093105 (2008).
  28. S.B. Bodrov, A.N. Stepanov, M.I. Bakunov, B.V. Shishkin, I.E. Ilyakov, and R.A. Akhmedzhanov, “Highly efficient optical-to-terahertz conversion in a sandwich structure with LiNbO<sub>3</sub> core,” *Opt. Express* **17**, 1871 (2009).
  29. M.I. Bakunov and S.B. Bodrov, “Si–LiNbO<sub>3</sub>–air–metal structure for concentrated terahertz emission from ultrashort laser pulses,” *Appl. Phys. B* **98**, 1 (2010).
  30. S.B. Bodrov, I.E. Ilyakov, B.V. Shishkin, and A.N. Stepanov, “Efficient terahertz generation by optical rectification in Si–LiNbO<sub>3</sub>–air–metal sandwich structure with variable air gap,” *Appl. Phys. Lett.* **100**, 201114 (2012).

31. M.I. Bakunov, E.A. Mashkovich, M.V. Tsarev, and S.D. Gorelov, "Efficient Cherenkov-type terahertz generation in Si-prism-LiNbO<sub>3</sub>-slab structure pumped by nanojoule-level ultrashort laser pulses," *Appl. Phys. Lett.* **101**, 151102 (2012).
32. S.B. Bodrov, I.E. Ilyakov, B.V. Shishkin, and M.I. Bakunov, "Highly efficient Cherenkov-type terahertz generation by 2- $\mu$ m wavelength ultrashort laser pulses in a prism-coupled LiNbO<sub>3</sub> layer *Opt. Express* **27**, 36059 (2019).
33. K. Suizu, K. Koketsu, T. Shibuya, T. Tsutsui, T. Akiba, and K. Kawase, "Extremely frequency-widened terahertz wave generation using Cherenkov-type radiation," *Opt. Express* **17**, 6676 (2009).
34. K. Takeya, T. Minami, H. Okano, S.R. Tripathi, and K. Kawase, "Enhanced Cherenkov phase matching terahertz wave generation via a magnesium oxide doped lithium niobate ridged waveguide crystal," *APL Photon.* **2**, 016102 (2016).
35. B.N. Carnio and A.Y. "Elezzabi, Investigation of ultra-broadband terahertz generation from sub-wavelength lithium niobate waveguides excited by few cycle femtosecond laser pulses," *Opt. Express* **25**, 20573 (2017).
36. F. G. Sun, W. Ji, and X.-C. Zhang, "Two-photon absorption induced saturation of THz radiation in ZnTe," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, edited by S. Brueck, R. Fields, M. Fejer, and F. Leonberger, OSA Technical Digest (Optical Publishing Group, San Francisco, CA, 2000), Paper CThM43.
37. T. Löffler, T. Hahn, M. Thomson, F. Jacob, and H.G. Roskos, "Large-area electro-optic ZnTe terahertz emitters," *Opt. Express* **13**, 5353 (2005).
38. F. Blanchard, L. Razzari, H.-C. Bandulet, G. Sharma, R. Morandotti, J.-C. Kieffer, T. Ozaki, M. Reid, H.F. Tiedje, H.K. Haugen, and F.A. Hegmann, "Generation of 1.5  $\mu$ J single-cycle terahertz pulses by optical rectification from a large aperture ZnTe crystal," *Opt. Express* **15**, 13212 (2007).
39. S. Vidal, J. Degert, M. Tondusson, J. Oberlé, and E. Freysz, "Impact of dispersion, free carriers, and two-photon absorption on the generation of intense terahertz pulses in ZnTe crystals," *Appl. Phys. Lett.* **98**, 191103 (2011).
40. X. Wu, S. Carbajo, K. Ravi, F. Ahr, G. Cirmi, Y. Zhou, O. D. Mücke, and F.X. Kärtner, "Terahertz generation in lithium niobate driven by Ti:sapphire laser pulses and its limitations," *Opt. Lett.* **39**, 5403 (2014).
41. S.-C. Zhong, Z.-H. Zhai, J. Li, L.-G. Zhu, J. Li, K. Meng, Q. Liu, L.-H. Du, J.-H. Zhao, and Z.-R. Li, "Optimization of terahertz generation from LiNbO<sub>3</sub> under intense laser excitation with the effect of three-photon absorption," *Opt. Express* **23**, 31313 (2015).
42. M.I. Bakunov, A.V. Maslov, and M.V. Tsarev, "Optically generated terahertz pulses with strong quasistatic precursors," *Phys. Rev. A* **95**, 063817 (2017).
43. J. Kuttruff, M.V. Tsarev, and P. Baum, "Jitter-free terahertz pulses from LiNbO<sub>3</sub>," *Opt. Lett.* **46**, 2944 (2021).

## Список публикаций по диссертации

- [A1] Bakunov M.I., Efimenko E.S., Gorelov S.D., Abramovsky N.A., Bodrov N.A., Efficient Cherenkov-type optical-to-terahertz converter with terahertz beam combining // *Opt. Lett.* 2020. V. 45, No. 13. P. 3533–3536.
- [A2] Shugurov A.I., Bodrov S.B., Mashkovich E.A., Kitahara H., Abramovsky N.A., Tani M., Bakunov M.I. Noncollinear electro-optic sampling detection of terahertz pulses in a LiNbO<sub>3</sub> crystal while avoiding the effect of intrinsic birefringence // *Opt. Express.* 2022. Vol. 30, No. 3. P. 3741–3748.
- [A3] Bodrov S.B., Abramovsky N.A., Shugurov A.I., Burova E.A., Stepanov A.N., Bakunov M.I. Scalable optical-to-terahertz converter with a prism-coupled plane-parallel lithium niobate plate // *Opt. Express.* 2022. Vol. 30, No. 20. P. 35978–35987.
- [A4] Efimenko E.S., Abramovsky N.A., Bakunov M.I., Strong spectral broadening of Cherenkov-type terahertz radiation by free carrier generation // *Phys. Rev. B.* 2023. V. 107, 013526.
- [A5] Abramovsky N.A., Bodrov S.B., Korytin A.I., Stepanov A.N., Bakunov M.I., Generation of sub-MV/cm terahertz fields with large-size Cherenkov-type optical-to-terahertz converters // *Opt. Lett.* 2023. V. 48, No. 12. P. 3203–3206.
- [A6] Bodrov S.B., Abramovsky N.A., Burova E.A., Stepanov A.N., Bakunov M.I., Tilted-Pulse-Front Terahertz Generation in a Plane-Parallel LiNbO<sub>3</sub> Plate // *The 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2021)*, Aug. 29 – Sep. 3, 2021, Chengdu, China, pp. 1-2. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567046.
- [A7] Абрамовский Н.А., Бакунов М.И. Черенковский оптико-терагерцовый конвертор со сложением терагерцовых пучков // 25 Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, гуманитарные науки): материалы тезисов и докладов / Отв. за вып. Савельева М.А. – Нижний Новгород: НРЛ. 2020. С. 226–228.
- [A8] Abramovsky N.A., Shugurov A.I., Bakunov M.I. Efficient Cherenkov-Type Optical-to-Terahertz Conversion of nJ-Energy Femtosecond Laser Pulses // *20th International Conference Laser Optics (ICLO 2022)*, June 20-24, 2022, Saint Petersburg, Russian Federation, pp. 1-1. IEEE Xplore. DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840153.
- [A9] Bodrov S.B., Abramovsky N.A., Korytin A.I., Stepanov A.N., Bakunov M.I. High energy Cherenkov-type terahertz emission from a large-size Si-LiNbO<sub>3</sub> structure pumped by a Ti:sapphire laser // 5th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications (TERA-2023),” 27 February – 2 March 2023, Moscow, Russia. Abstract book, p. 83.
- [A10] Abramovsky N. A., Bodrov S. B., Bakunov M. I. Frequency upshifting of Cherenkov-type terahertz radiation by free-carrier generation in lithium niobate // 5th International Conference “Terahertz and Microwave Radiation: Generation,

## ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Введение

#### **Глава 1. Оптико-терагерцовый конвертор скошенных лазерных импульсов на основе плоского слоя $\text{LiNbO}_3$**

- 1.1. Схема конвертора и расчет параметров согласующих призм
- 1.2. Теоретический анализ конверсии
- 1.3. Схема эксперимента и анализ экспериментальных результатов
- 1.4. Выводы по главе 1

#### **Глава 2. Оптико-терагерцовый конвертор черенковского типа с симметричным выводом и сложением двух терагерцовых пучков**

- 2.1. Схема конвертора и теоретическая модель
- 2.2. Результаты численного моделирования
- 2.3. Экспериментальные результаты и их анализ
- 2.4. Режим накачки оптическим осциллятором
- 2.5. Выводы по главе 2

#### **Глава 3. Масштабирование оптико-терагерцового конвертора черенковского типа с односторонним выводом терагерцового пучка**

- 3.1. Схема конвертора и экспериментальной установки
- 3.2. Экспериментальные результаты и их анализ
- 3.3. Выводы по главе 3

#### **Глава 4. Черенковское излучение терагерцовых волн ультракоротким лазерным импульсом в режиме многофотонной ионизации электрооптического кристалла**

- 4.1. Стационарный режим излучения при четырехфотонной ионизации кристалла GaP
- 4.2. Учет переходных эффектов и истощения накачки в слое GaP с выходной призмой
- 4.3. Экспериментальное исследование оптико-терагерцовой конверсии в режиме трехфотонной ионизации кристалла  $\text{LiNbO}_3$
- 4.4. Выводы по главе 4

### Заключение

### Список литературы

### Список публикаций по диссертации

Подписано в печать \_\_.\_\_.\_\_\_\_ г. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Уч.-изд. л. 1. Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ННГУ им. Н.И. Лобачевского.  
63000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37