

На правах рукописи



Машкович Евгений Александрович

**ЭФФЕКТИВНАЯ ОПТИКО-ТЕРАГЕРЦОВАЯ
КОНВЕРСИЯ В УСЛОВИЯХ НЕКОЛЛИНЕАРНОГО
ФАЗОВОГО СИНХРОНИЗМА**

01.04.21 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Бакунов М.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Гильденбург В. Б.
Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

доктор физико-математических наук
профессор Алешкин В.Я.
Институт физики микроструктур РАН

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт прикладной
физики Российской академии наук

Защита состоится “ 26 ” декабря 2012 г. В 15³⁰ 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.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Разработка эффективных методов генерации когерентного электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот – актуальная проблема современной прикладной физики. Острая потребность в решении этой проблемы вызвана перспективами широких практических приложений терагерцового излучения, среди которых важное место занимают терагерцовые методы биомедицинской диагностики, детектирование опасных веществ по их спектральным «отпечаткам пальцев», разработка систем неразрушающего контроля качества фармакологических препаратов и продуктов питания, интроскопия предметов искусства и археологических артефактов, управление химическими реакциями. Сложность проблемы связана с тем, что в терагерцовом диапазоне, расположенном между инфракрасным и СВЧ диапазонами, не применимы хорошо разработанные к настоящему времени принципы генерации оптического и СВЧ излучений.

В последние два десятилетия в результате развития фемтосекундной лазерной техники произошел существенный прогресс в области создания компактных (настольных и даже переносных) источников терагерцового излучения. Распространенным методом терагерцовой генерации стало воздействие фемтосекундными лазерными импульсами на фотопроводящие антенны, полупроводниковые и электрооптические среды, см., например, недавний обзор M.C. Hoffmann and J.A. Fulop, *J. Phys. D* **44**, 083001 (2011). Огромное число работ направлено на поиск путей повышения эффективности оптико-терагерцового преобразования.

В настоящее время наиболее эффективными являются два метода нелинейно-оптического преобразования фемтосекундных лазерных импульсов в терагерцовое излучение – это черенковское излучение терагерцовых волн лазерным импульсом в сэндвич-структуре с тонкой сердцевиной из электрооптического кристалла LiNbO_3 , отражающей подложкой и призмным элементом вывода излучения, и оптическое выпрямление лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности в специально вырезанных (в форме призмы) кристаллах LiNbO_3 . Общим для этих схем является неколлинеарность распространения лазерного импульса накачки и генерируемой терагерцовой волны, что позволяет обеспечить их синхронизм в кристаллах, типа LiNbO_3 , с сильно (более чем в 2 раза для LiNbO_3) отличающимися значениями оптического группового индекса и показателя преломления терагерцовых волн. Развитию этих передовых методов терагерцовой генерации и посвящена диссертация.

В схеме с сэндвич-структурой лазерный импульс заводится в сердцевину из LiNbO_3 с торца и создает в ней движущуюся область нелинейной поляризации, которая и служит источником терагерцового черенковского

излучения, выводимого через призму из материала (обычно кремния) с малым поглощением на терагерцовых частотах [S.V. Vodrov et al. *J. Appl. Phys.* 104, 093105 (2008)]. Волноводные свойства структуры препятствуют дифракционной расходимости импульса накачки, тем самым, увеличивая эффективную длину оптико-терагерцового взаимодействия. Тонкость сердцевины позволяет устранить негативный фактор сильного поглощения в кристалле LiNbO_3 на терагерцовых частотах. Передовой дизайн сэндвич-структуры включает металлическую подложку, отделенную от сердцевины регулируемым воздушным зазором, что позволяет управлять спектром генерируемого терагерцового излучения [M.I. Vakunov and S.V. Vodrov, *Appl. Phys. B* 98, 1 (2010)]. Использование сэндвич-структур обеспечивает рекордные значения эффективности оптико-терагерцового преобразования фемтосекундных лазерных импульсов с энергией в десятки микроджоулей. Так, в первых экспериментах со структурой $\text{Si-LiNbO}_3\text{-BK7}$ при накачке импульсами титан-сапфирового оптического усилителя с энергией 40 мкДж была достигнута эффективность более 0,1% [S.V. Vodrov et al., *Opt. Express* 17, 1871 (2009)]. В недавнем эксперименте со структурой $\text{Si-LiNbO}_3\text{-воздух-металл}$ эффективность преобразования импульсов титан-сапфирового усилителя с энергией 15-20 мкДж достигла уже 0,25% [S.V. Vodrov et al., *Appl. Phys. Lett.* 100, 201114 (2012)].

В диссертации предложено применить сэндвич-структуру с сердцевиной из LiNbO_3 для оптико-терагерцового преобразования неусиленных импульсов оптического генератора с энергией в несколько наноджоулей. Физически режимы преобразования усиленных и неусиленных импульсов существенно отличаются. В случае преобразования усиленных импульсов их фокусируют в линию, параллельную плоскости сэндвич-структуры. При этом поля излучения имеют фактически двумерный характер (генерируется черенковский клин). При использовании же в качестве накачки неусиленных импульсов для обеспечения необходимого уровня оптической интенсивности требуется фокусировка в пятно. При этом поле излучения становится расходящимся, картина поля приобретает трехмерный характер (генерируется черенковский конус). Тем не менее, как показано в диссертации, достигающая детектора доля излучения может быть на два порядка больше, чем в стандартной схеме коллинеарного оптико-терагерцового преобразования в кристалле ZnTe .

Выпрямление оптических импульсов со скошенным фронтом интенсивности [J. Hebling et al., *Opt. Express* 10, 1161 (2002)] – наиболее эффективный метод оптико-терагерцового преобразования фемтосекундных лазерных импульсов с энергией в десятки и сотни миллиджоулей. В этом методе путем отражения лазерного импульса от дифракционной решетки формируют оптический импульс со скошенным – под определенным углом α по отношению к волновым фронтам – фронтом интенсивности. Такой

импульс распространяется в электрооптическом кристалле с групповой скоростью V вдоль нормали к волновым фронтам. Проекция скорости V на перпендикулярное к фронту интенсивности направление равна $V\cos\alpha$ и путем выбора угла α может быть сделана равной фазовой скорости терагерцевой волны нужной частоты ω : $V = v_{\text{THz}}(\omega)$. Таким образом достигается фазовый синхронизм импульса накачки с квазиплоской терагерцевой волной частоты ω , распространяющейся в направлении нормали к фронту интенсивности. Достоинством данного метода является возможность повышения генерируемой терагерцевой энергии путем одновременного увеличения энергии оптического импульса накачки и его поперечного размера при сохранении напряженности оптического поля ниже порога пробоя кристалла. Недавно с помощью данной техники удалось генерировать терагерцевые импульсы с энергией 125 мкДж с рекордной эффективностью 0,25% [J.A. Fulop et al., *Opt. Lett.* **37**, 557 (2012)], а также импульсы с рекордным значением терагерцевого поля свыше 1,2 МВ/см [H. Hirogi et al., *Appl. Phys. Lett.* **98**, 091106 (2011)].

Несмотря на рекордные достижения метода оптического выпрямления скошенных лазерных импульсов, его теория остается недостаточно разработанной. В работах J. Hebling et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **25**, B6 (2008) и J.A. Fülöp et al., *Opt. Express* **18**, 12311 (2010) для расчета терагерцевого поля использовались приближенные одномерные модели. Строгая теория излучения терагерцевых волн скошенным лазерным импульсом конечного поперечного размера построена в работе M.I. Vakunov et al., *J. Appl. Phys.* **104**, 073105 (2008), но только для стационарного режима излучения в неограниченном кристалле. В диссертации разработана динамическая теория генерации терагерцевых волн скошенным лазерным импульсом конечного поперечного размера, учитывающая переходные процессы на входной границе кристалла. В рамках теории определены оптимальные режимы генерации при накачке кристалла LiNbO_3 импульсами титан-сапфирового оптического усилителя, предсказана перспективность использования полупроводниковых материалов, типа GaAs, для оптико-терагерцевого преобразования скошенных лазерных импульсов.

Для создания скоса у лазерного импульса накачки обычно используют его отражение от дифракционной решетки с последующим переносом изображения отраженного импульса внутрь электрооптического кристалла. Проекционная оптика вносит при этом искажения в форму импульса, что приводит к неоднородностям поперечного профиля генерируемого терагерцевого пучка и, в конечном итоге, затрудняет его практическое использование. В недавней работе L. Palfalvi et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 171107 (2008) была предложена схема, где проекционная оптика не используется, а скос импульс создается в результате его прохождения через пропускающую дифракционную решетку, помещенную непосредственно на вход-

ную границу кристалла. В диссертации разработана теория данного метода, которая учитывает расплывание импульса накачки в кристалле за счет угловой и материальной дисперсии. Показано, что использование chirпованных импульсов накачки позволяет повысить эффективность метода.

Техника генерации широкополосного терагерцового излучения путем оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов со скошенным фронтом интенсивности распространена в диссертации на случай генерации узкополосного терагерцового излучения. Для этого предложено использовать двухчастотные лазерные пучки со скошенными плоскостями равной амплитуды. Присутствующие в пучке биения интенсивности на разностной частоте наводят в электрооптическом кристалле бегущую волну нелинейной поляризации, которая и является источником терагерцового излучения. Скошенность же пучка обеспечивает фазовый синхронизм волны поляризации с генерируемой терагерцовой волной. Разработанная в диссертации теория нового метода предсказывает его высокую эффективность.

Цель диссертации

Целью диссертационной работы является развитие высокоэффективных методов нелинейной оптико-терагерцовой конверсии, основанных на неколлинеарном синхронизме оптической накачки и терагерцовых волн в условиях эффекта Черенкова и при использовании лазерных импульсов и пучков со скошенными фронтами интенсивности.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые предложено использовать сэндвич-структуры с нелинейной волноведущей сердцевинной для оптико-терагерцовой конверсии неусиленных (с энергией порядка нескольких наноджоулей) лазерных импульсов.
2. Впервые разработана теория черенковского излучения терагерцовых волн сфокусированным лазерным импульсом, распространяющимся в сэндвич-структуре с нелинейной сердцевинной, отражающей подложкой и призмным элементом вывода излучения.
3. При накачке сэндвич-структуры «кремниевая призма – слой ниобата лития – воздух» импульсами титан-сапфирового оптического генератора впервые экспериментально достигнуто рекордное значение эффективности оптико-терагерцового преобразования $0,8 \times 10^{-4}$, что на два порядка превосходит эффективность стандартной коллинеарной схемы преобразования в кристалле ZnTe.
4. Впервые разработана теория генерации терагерцовых волн фемтосекундными лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивно-

сти, учитывающая такие важные факторы, как переходные процессы на входной границе кристалла и конечный поперечный размер лазерного импульса.

5. Для описания динамики формирования терагерцового поля лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности впервые введены такие характеристические длины, как длина нарастания амплитуды и длина формирования пакета синхронизованной терагерцовой волны, длина поперечного выбегания терагерцового поля из области пучка накачки.
6. Впервые разработана приближенная теория оптико-терагерцового преобразования скошенных лазерных импульсов в схеме с дифракционной решеткой, расположенной непосредственно на границе электрооптического кристалла, которая учитывает расплывание импульса в кристалле за счет угловой и материальной дисперсии, конечный поперечный размер импульса, наличие у импульса чирпа.
7. Предложена новая эффективная схема генерации узкополосного терагерцового излучения, основанная на генерации разностной частоты при накачке электрооптического кристалла двухчастотным лазерным пучком со скошенными плоскостями равной амплитуды.

Практическая значимость работы

Предложенная и экспериментально апробированная в диссертации схема высокоэффективного оптико-терагерцового преобразования неусиленных (от оптического генератора) лазерных импульсов на основе сэндвич-структуры с тонким слоем LiNbO_3 может найти широкое применение для целей спектроскопии, микроскопии, (био)сенсорики и имиджинга в терагерцовом диапазоне частот, где не требуются высокие значения напряженности терагерцового поля. Достоинством данной схемы является высокая частота повторения импульсов накачки, а, следовательно, и генерируемых терагерцовых импульсов, что может обеспечить более высокое отношение сигнал/шум. В отличие от широко используемой техники преобразования импульсов титан-сапфирового лазера в кристалле ZnTe предложенная схема может быть реализована при различных длинах волн накачки, в том числе, при использовании в качестве накачки компактных и сравнительно дешевых волоконных лазеров.

Указанные в диссертации способы оптимизации оптико-терагерцовой конверсии скошенных лазерных импульсов в кристаллах ниобата лития могут быть использованы для достижения новых рекордных значений эффективности конверсии.

Найденные в диссертации эффективные режимы оптико-терагерцовой конверсии в кристаллах GaAs могут быть использованы для

разработки новых перестраиваемых источников терагерцового излучения с высокой спектральной интенсивностью на частотах ≥ 1 ТГц.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Сэндвич-структуры с сердцевиной из электрооптического материала, отражающей подложкой и призмным элементом вывода излучения могут служить эффективными преобразователями неусиленных (с энергией порядка нескольких наноджоулей) фемтосекундных лазерных импульсов в широкополосное терагерцовое излучение.
2. Процесс синхронизованной генерации терагерцовой волны фемтосекундным лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности в электрооптическом кристалле имеет две стадии – стадию нарастания амплитуды и стадию формирования пакета волны. Характеристическая длина нарастания амплитуды равна минимальной когерентной длине для генерируемого спектра частот. Длина формирования пакета зависит от разности групповых скоростей оптического и терагерцового импульсов и от терагерцовых потерь. Формированию терагерцовой волны препятствует эффект ее поперечного выбегания из области пучка накачки. Для эффективной генерации необходимо, чтобы характеристическая длина поперечного выбегания и толщина кристалла были больше длины нарастания амплитуды и длины формирования пакета терагерцовой волны.
3. Кристаллы GaAs толщиной $\geq 1,5$ см при накачке импульсами со скошенным фронтом интенсивности на длине волны $\geq 1,8$ мкм перспективны для эффективной перестраиваемой терагерцовой генерации, в том числе, на частотах > 1 ТГц, где широко используемый кристалл LiNbO₃ становится неэффективным из-за высокого терагерцового поглощения.
4. При генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в схеме с дифракционной решеткой, расположенной на границе кристалла, chirпирование лазерного импульса позволяет скомпенсировать влияние угловой и материальной дисперсии и повысить эффективность генерации.
5. Эффективная генерация узкополосного терагерцового излучения может быть достигнута при накачке электрооптического кристалла двухчастотными лазерными пучками со скошенными плоскостями равной амплитуды. Присутствующие в пучке биения интенсивности на разностной частоте наводят в кристалле бегущую волну нелинейной поляризации, которая и является источником терагерцового излучения. Скошенность пучка обеспечивает фазовый синхронизм волны поляризации с генерируемой терагерцовой волной.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных журналах, 1 работа в трудах SPIE и 4 работы в трудах конференций.

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах кафедры общей физики ННГУ, а также на следующих конференциях:

Photonics West 2010, San Francisco, USA, January 23-28, 2010;

The 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Roma, Italy, September 5-10, 2010;

International Conference "Days on diffraction'2011", Saint Petersburg, Russia, May 30 – June 3, 2011;

The 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRT 2012), Fukui, Japan, March 7-9, 2012;

The 5th EPS-QEOD Europhoton Conference, Stockholm, Sweden, August 26-31, 2012;

XV научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, 10-13 мая 2011.

Личный вклад автора

Экспериментальные работы по главе 1 проводились автором самостоятельно. Постановка задач и анализ полученных результатов в диссертации проводились совместно с научным руководителем Бакуновым М.И. Численные расчёты в главах 2 и 3 проводились совместно с к.ф.-м.н. Бодровым С.Б. и к.ф.-м.н. Царёвым М.В. Численные расчёты в главах 1 и 4 выполнены автором лично.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций по диссертации. Общий объем диссертации составляет 119 страниц, включая 29 рисунков, список литературы из 61 наименования на 8 страницах и список публикаций по диссертации из 8 наименований на 2 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе теоретически и экспериментально показано, что сэндвич-структура типа "кремниевая призма – слой ниобата лития – воздух" (рис. 1) может быть использована как эффективный преобразователь

неусиленных лазерных импульсов в широкополосное терагерцовое излучение.

В п. 1.1 обсуждаются физические различия в оптико-терагерцовом преобразовании неусиленных и усиленных лазерных импульсов в сэндвич-структуре. При преобразовании неусиленных импульсов для обеспечения необходимого уровня оптической интенсивности требуется сфокусировать импульс в пятно размером ≤ 100 мкм в плоскости структуры. При этом картина поля излучения приобретает трехмерный характер: генерируется черенковский конус, в отличие от черенковского клина в случае усиленных импульсов. Сформулирована теоретическая модель процесса преобразования и приведены основные уравнения.

В п. 1.2 рассчитана картина генерируемого терагерцового поля в сэндвич-структуре, а также осциллограмма и спектр терагерцового поля в свободном пространстве вблизи центра выходной грани призмы. Проанализировано спектрально-угловое распределение терагерцовой энергии.

В п. 1.3 описана экспериментальная установка по генерации терагерцового излучения в сэндвич-структуре и (для сравнения) в кристалле ZnTe толщиной 1 мм.

В п. 1.4 приведены результаты проведенных экспериментов – осциллограммы, спектры, эффективности оптико-терагерцового преобразования – и показано их хорошее совпадение с предсказаниями теории.

В п. 1.5 сделаны выводы по первой главе.

Во второй главе разработана теория генерации терагерцовых волн лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности в электрооптическом кристалле специальной (в виде призмы) формы (рис. 2). Проведен анализ двух типичных экспериментальных ситуаций – генерации в кристалле LiNbO_3 импульсами титан-сапфирового лазера (длина волны 0,8 мкм) при комнатной и криогенной (10 К) температурах. Показана перспективность использования кристалла GaAs при накачке импульсами с длиной волны 1,8 мкм или 3,5 мкм для эффективной перестраиваемой генерации терагерцового излучения.

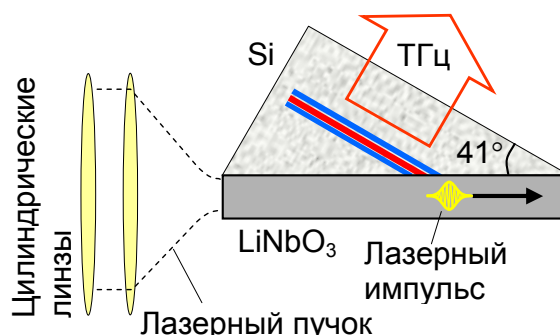


Рис. 1. Схема оптико-терагерцового преобразования в сэндвич-структуре.

В п. 2.1 сформулирована модель генерации терагерцового излучения движущимся импульсом нелинейной (светоиндуцированной) поляризации и приведены основные уравнения.

В п. 2.2 проведен анализ динамики формирования терагерцового поля в кристалле в предельном случае планарного (с неограниченным поперечным размером) импульса накачки. Рассмотрены два режима терагерцовой генерации – асинхронный (в отсутствие фазового синхронизма между накачкой и терагерцовой волной) и синхронный (в условиях фазового синхронизма волны и накачки), реализуемые при различных значениях угла скоса импульса α (рис. 2).

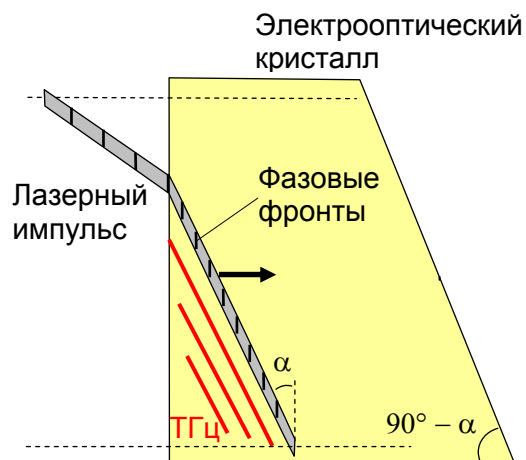


Рис. 2. Схема генерации терагерцовых волн фемтосекундным лазерным импульсом со скошенным фронтом интенсивности.

В п. 2.2.1 исследована динамика терагерцовой генерации в асинхронном режиме. Показано, что терагерцовое поле представляет собой суперпозицию ближнего поля источника (вынужденного решения уравнений поля) и переходного излучения, генерируемого на входной границе кристалла (свободного решения). Вблизи границы эти решения совпадают по времени и практически компенсируют друг друга. При распространении вглубь кристалла ближнее поле и переходное излучение разделяются из-за различия в скорости распространения, и полное терагерцовое поле возрастает. Для описания динамики формирования поля сделано обобщение понятия длины выбегания (walk-off length) на случай импульса накачки со скошенным фронтом интенсивности. Построены моментальные снимки и осциллограммы генерируемого терагерцового поля.

В п. 2.2.2 исследована динамика генерации в синхронном режиме. В этом случае терагерцовое поле состоит из синхронизованной волны, ближнего поля источника и переходного излучения. Показано, что динамика формирования терагерцового поля имеет две стадии. На первой – импульс терагерцового поля растет по амплитуде практически без изменения формы, на второй – происходит удлинение импульса без изменения его амплитуды. Введены характеристические длины: длина нарастания амплитуды (build-up length), равная минимальной когерентной длине для генерируемого спектра частот, и длина формирования волнового пакета (elongation length), зависящая от разности групповых скоростей оптического и терагерцового импульсов и от терагерцовых потерь. Построены моментальные снимки и осциллограммы терагерцового поля.

В п. 2.2.3 произведено сравнение возможностей терагерцовой генерации для трёх случаев: в охлажденном (до 10 К) кристалле LiNbO_3 при накачке на длине волны 0,8 мкм и в кристалле GaAs комнатной температуры при накачке на длинах волн 1,8 и 3,5 мкм. Показано, что при одинаковой интенсивности оптической накачки в GaAs может быть получена большая, чем в стандартно используемом LiNbO_3 , амплитуда генерируемого терагерцового поля. При накачке GaAs на длине волны 1,8 мкм амплитуда поля может быть больше, чем при накачке на 3,5 мкм.

В п. 2.3 исследованы особенности формирования терагерцового поля в кристалле при конечном поперечном размере лазерного пучка.

В п. 2.3.1 показано, что формированию терагерцовой волны препятствует эффект ее поперечного выбегания из области пучка накачки. Для эффективной генерации необходимо, чтобы характеристическая длина поперечного выбегания (transverse walk-off length) и толщина кристалла были больше длины нарастания амплитуды и длины формирования пакета терагерцовой волны.

В п. 2.3.2 проведен анализ структуры терагерцового поля в кристаллах LiNbO_3 и GaAs на основе введенных характеристических длин.

В п. 2.3.3 рассчитана эффективность оптико-терагерцовой конверсии с учётом потерь на отражение терагерцового излучения на выходной грани кристалла для LiNbO_3 при комнатной и криогенной (10 К) температурах (длина волны накачки 0,8 мкм) и для GaAs при комнатной температуре (длина волны накачки 1,8 мкм). Исследована зависимость эффективности конверсии от угла скоса импульса накачки и длины кристалла. Показано, что охлаждение LiNbO_3 до криогенных температур увеличивает эффективность в 20 раз. GaAs обеспечивает перестройку генерируемого излучения в более широком частотном интервале путем изменения угла скоса импульса накачки. Исследовано влияние на эффективность конверсии расплывания импульса накачки из-за угловой и материальной дисперсии.

В п. 2.4 сделаны выводы по второй главе.

В третьей главе теоретически исследована генерация терагерцовых волн импульсами со скошенным фронтом интенсивности в схеме с дифракционной решёткой, расположенной на входной границе электрооптического кристалла (рис. 3).

В п. 3.1 разработано приближенное описание расплывания оптического импульса со скошенным фронтом интенсивности при его распространении в кристалле вследствие угловой (зависимости угла дифракции от частоты) и материальной дисперсии. В результате сравнения результатов приближенного описания и точного численного расчета определены границы применимости приближенной аналитической зависимости длительности импульса от пройденного импульсом расстояния в кристалле.

В п. 3.2 предложено использовать chirпированные импульсы накачки для повышения эффективности генерации терагерцового излучения в кристаллах LiNbO_3 с сильным поглощением на частотах ≥ 1 ТГц. При соответствующем выборе chirпа падающий (растянутый) импульс сжимается до минимальной длительности вблизи выходной границы кристалла. Излученные сжатым импульсом высокочастотные терагерцовые волны достигают границы без существенного затухания. Низкочастотные волны, излученные импульсом до его сжатия, испытывают слабое затухание и также достигают выходной границы кристалла. Проанализирована зависимость длительности импульса от пройденного расстояния в кристалле для нескольких значений chirпа и первоначальной (до chirпирования) длительности импульса. Исследована зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от длины кристалла при выборе оптимального chirпа.

В п. 3.4 сделаны выводы по третьей главе.

В четвертой главе предложен метод генерации узкополосного терагерцового излучения, основанный на генерации разностной частоты при накачке электрооптического кристалла двухчастотным лазерным пучком со скошенными плоскостями равной амплитуды (рис. 4). Разработана теория метода и проведен анализ его эффективности для двух случаев – при накачке LiNbO_3 наносекундными лазерными импульсами с длиной волны около 1,3 мкм и при накачке GaAs импульсами той же длительности с длиной волны около 1,55 мкм.

В п. 4.1 разработано удобное приближенное описание двухчастотного оптического пучка со скошенными плоскостями равной амплитуды, полу-

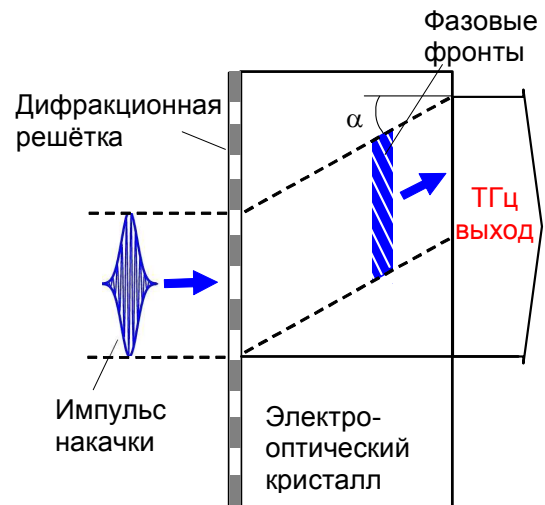


Рис. 3. Схема оптико-терагерцового преобразования с дифракционной решёткой, расположенной на границе кристалла.

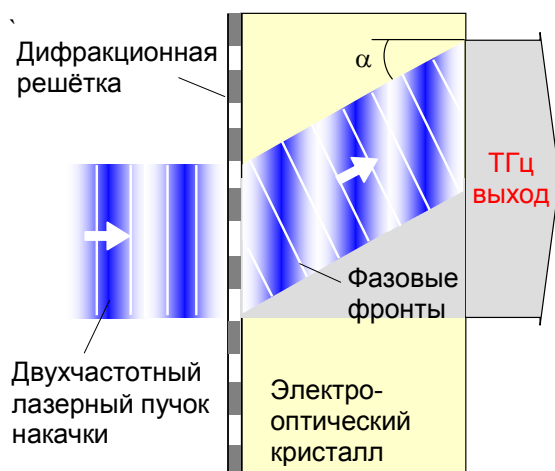


Рис. 4. Схема терагерцовой генерации двухчастотным лазерным пучком со скошенными плоскостями равной амплитуды.

ченного при дифракции обычного пучка на решетке, размещенной на входной границе кристалла. Рассмотрены два типа решеток: концентрирующие и голографические. Дано выражение для наводимой пучком в кристалле нелинейной поляризации.

В п. 4.2 с помощью метода медленно меняющихся амплитуд получено общее выражение для генерируемого в кристалле терагерцового поля.

В п. 4.3 проведен анализ динамики формирования терагерцового поля в кристалле и эффективности оптико-терагерцовой конверсии для кристаллов LiNbO_3 (длина волны накачки около 1,3 мкм) и GaAs (длина волны накачки около 1,55 мкм).

В п. 4.3.1 вначале рассмотрен предельный случай оптического пучка неограниченного поперечного размера. Показано, что в этом случае динамика формирования терагерцового поля определяется потерями в кристалле: нарастание амплитуды поля с расстоянием вглубь кристалла насыщается на длине, равной длине затухания терагерцовой волны в кристалле. Далее рассмотрен случай пучка конечного поперечного размера. В этом случае рост амплитуды терагерцового поля ограничивается также и эффектом поперечного выбегания терагерцовой волны из области пучка накачки. В результате, рост амплитуды волны насыщается на меньшей из двух длин – затухания и поперечного выбегания. Сделана оценка возможного диапазона перестройки частоты генерируемого излучения: 0-5 ТГц для LiNbO_3 и 0-2 ТГц для GaAs.

В п. 4.3.2 исследована картина терагерцового поля в кристалле LiNbO_3 для двух поперечных размеров пучка накачки (5 и 0,5 мм), как в схеме с концентрирующей, так и с голографической решёткой. Построена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от толщины кристалла для нескольких значений поперечного размера пучка накачки. Показано, что оптимальная толщина кристалла составляет около 2 мм. Максимальная эффективность оптико-терагерцовой конверсии для поперечного размера пучка 0,1–1 мм составляет около 8×10^{-6} , что примерно в 200 раз больше, чем в ранее использовавшихся схемах при тех же параметрах накачки.

В п. 4.3.3 исследована картина терагерцового поля в кристалле GaAs для двух поперечных размеров пучка накачки (5 и 0,5 мм), как в схеме с концентрирующей, так и с голографической решёткой. Построена зависимость эффективности оптико-терагерцовой конверсии от толщины кристалла для нескольких значений поперечного размера пучка накачки. Показано, что оптимальная толщина кристалла составляет около 5 см. Достижимая при этом эффективность конверсии на порядок больше, чем в кристалле LiNbO_3 .

В п. 4.4 сделаны выводы по четвертой главе.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана теория черенковского излучения терагерцовых волн сфокусированным лазерным импульсом, распространяющимся в сэндвич-структуре с нелинейной сердцевиной, отражающей подложкой и призмным элементом вывода излучения. Предсказана возможность эффективной конверсии неусиленных (с энергией порядка нескольких наноджоулей) фемтосекундных импульсов титан-сапфирового оптического генератора в широкополосное терагерцовое излучение в сэндвич-структуре с сердцевиной из ниобата лития, воздушной подложкой и кремниевой призмой.
2. При накачке сэндвич-структуры с сердцевиной из ниобата лития толщиной 35 мкм и длиной 1 см импульсами титан-сапфирового оптического генератора с энергией 8 нДж и длительностью 100 фс экспериментально достигнута рекордная эффективность оптико-терагерцового преобразования $0,8 \times 10^{-4}$, что на два порядка превосходит эффективность стандартной коллинеарной схемы преобразования в кристалле ZnTe.
3. Разработана теория генерации терагерцовых волн фемтосекундными оптическими импульсами со скошенным фронтом интенсивности в электрооптических кристаллах. Выделены две стадии в процессе генерации терагерцовой волны – стадия нарастания амплитуды и стадия формирования пакета волны. Показана важность эффекта поперечного выбегания терагерцовой волны из области пучка накачки. Введены характеристические длины формирования терагерцового поля в кристалле и на их основе найдены оптимальные режимы генерации при накачке кристалла LiNbO₃ импульсами титан-сапфирового усилителя и кристалла GaAs импульсами с длиной волны 1,8 и 3,5 мкм. Показана перспективность кристаллов GaAs для перестраиваемой генерации в широком интервале терагерцовых частот.
4. Разработана приближенная теория генерации терагерцового излучения фемтосекундными оптическими импульсами со скошенным фронтом интенсивности в схеме с дифракционной решеткой, расположенной непосредственно на границе кристалла. Получена удобная формула для описания расплывания оптического импульса в кристалле из-за угловой и материальной дисперсии. Показано, что chirpирование импульса позволяет скомпенсировать влияние дисперсии и повысить эффективность генерации.

5. Предложен новый метод генерации узкополосного терагерцового излучения волной биений интенсивности двухчастотного лазерного пучка со скошенными плоскостями равной амплитуды в электрооптическом кристалле. Разработана теория метода, предсказывающая его высокую эффективность – до $0,8 \times 10^{-5}$ при накачке кристалла LiNbO_3 импульсами с длиной волны 1,3 мкм, длительностью 15 нс и энергией 2 мДж и до 5×10^{-5} при накачке кристалла GaAs импульсами с длиной волны 1,55 мкм и теми же значениями длительности и энергии.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Bakunov M.I., Mashkovich E.A., Tsarev M.V., Gorelov S.D. Efficient Cherenkov-type terahertz generation in Si-prism- LiNbO_3 -slab structure pumped by nanojoule-level ultrashort laser pulses // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. P. 151102.
2. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Mashkovich E.A. Terahertz generation with tilted-front laser pulses: dynamic theory for low-absorbing crystals // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2011. Vol. 28. P. 1724–1734.
3. Машкович Е.А., Бакунов М.И. Дисперсионное расплывание ультракороткого лазерного импульса со скошенным фронтом интенсивности // *Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, спецвыпуск "Радиофизика"*. 2011. Т. 5(3). С. 75–79.
4. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Mashkovich E.A. Terahertz generation with tilted-front laser pulses: Dynamical theory // *Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications X*, edited by Konstantin L. Vodopyanov, Proceedings of SPIE. Vol. 7917 (SPIE, Bellingham, WA, 2011) 79170J.
5. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Mashkovich E.A. Terahertz generation with tilted-front laser pulses: 2D analysis // *Proceedings of the 4th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2012 (IW-FIRT 2012)*, Fukui, Japan, March 7-9, 2012. Paper 8a-1.
6. Mashkovich E.A., Bakunov M.I. Tilted-front laser pulses for efficient terahertz generation: Effects of diffraction and dispersion // *Abstracts of the International Conference "Days on diffraction'2011"*, Saint Petersburg, Russia, May 30 – June 3, 2011. P. 75-76.

7. Bakunov M.I., Bodrov S.B., Tsarev M.V., Mashkovich E.A. Terahertz generation with tilted-front laser pulses: Dynamical theory predicts the ways to higher terahertz yield // Proceedings of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Roma, Italy, September 5-10, 2010. Paper We-P.79.

8. Бакунов М.И., Бодров С.Б., Машкович Е.А. Теория генерации терагерцового излучения скошенными лазерными импульсами в слабопоглощающих электрооптических кристаллах // Труды XV научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, 10-13 мая 2011 /Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова. Нижний Новгород: ННГУ, 2011. С. 164–166.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Черенковская генерация терагерцовых волн в структуре Si-призма/слой LiNbO₃/воздух при накачке фемтосекундными лазерными импульсами наноджоульной энергии

- 1.1. Схема генерации и теоретическая модель
- 1.2. Расчет поля излучения и эффективности оптико-терагерцовой конверсии
- 1.3. Описание экспериментальной установки
- 1.4. Экспериментальные результаты
- 1.5. Выводы

Глава 2. Динамическая теория генерации терагерцового излучения фемтосекундными лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности

- 2.1. Модель и основные уравнения
- 2.2. Предельный случай планарного импульса накачки
 - 2.2.1. Асинхронный режим генерации
 - 2.2.2. Синхронный режим генерации
 - 2.2.3. Сравнение генерации в GaAs и LiNbO₃
- 2.3. Генерация импульсом накачки конечного поперечного размера
 - 2.3.1. Эффект поперечного выбегания
 - 2.3.2. Структура терагерцового поля
 - 2.3.3. Эффективность оптико-терагерцовой конверсии
- 2.4. Выводы

Глава 3. Терагерцовая генерация фемтосекундными лазерными импульсами со скошенным фронтом интенсивности в схеме с контактной дифракционной решёткой

- 3.1. Модель и приближения
- 3.2. Анализ эффективности оптико-терагерцовой конверсии
- 3.3. Выводы

Глава 4. Генерация узкополосного терагерцового излучения двухчастотными лазерными пучками со скошенными плоскостями равной амплитуды

- 4.1. Схема генерации и модель
- 4.2. Основные уравнения, общий вид решения
- 4.3. Анализ динамики генерации и эффективности конверсии в кристаллах LiNbO_3 и GaAs
 - 4.3.1. Углы скоса и характеристические длины
 - 4.3.2. Генерация в LiNbO_3 при накачке на длине волны 1,3 мкм
 - 4.3.3. Генерация в GaAs при накачке на длине волны 1,55 мкм
- 4.4. Выводы

Заключение

Литература

Список публикаций по диссертации

Подписано в печать 23.11.12. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Тир. 100. Зак. 893.

Отпечатано в Центре цифровой печати
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.