

на правах рукописи

Ковалев Сергей Павлович

**ГЕНЕРАЦИЯ И ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕРАГЕРЦОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НАКАЧКЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ
ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Специальность 01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2012

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук,
доцент **Китаева Галия Хасановна.**

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
профессор **Чиркин Анатолий Степанович,**
профессор кафедры общей физики
и волновых процессов физического
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва.

Доктор физико-математических наук,
профессор **Чекалин Сергей Васильевич,**
заведующий лабораторией спектроскопии
сверхбыстрых процессов
Института спектроскопии РАН, Троицк.

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук
«Институт прикладной физики РАН»
(ИПФ РАН, Нижний Новгород).

Защита состоится «19» апреля 2012 года в «15:00» часов на заседании диссертационного совета Д. 501.001.31 при Московском государственном университете по адресу: 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, ул. Академика Хохлова, дом 1, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Автореферат разослан « » марта 2012 года

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 501.001.31, доцент

Т.М. Ильинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В последнее время исследования в терагерцовом диапазоне переживают бурное развитие в связи с многочисленными возможными применениями в таких областях как, астрофизика, спектроскопия, медицина, системы коммуникации, безопасности и др. Спектр излучения чёрного тела при температуре от 4 до 100 К лежит в терагерцовом диапазоне. Так как большая часть Вселенной имеет довольно низкую температуру, то измерение космического фона в терагерцовом диапазоне позволяет изучать процессы Большого взрыва, образования и эволюции галактик и планет. Колебательные и вращательные моды крупных молекул и их ансамблей лежат в терагерцовом диапазоне. Поэтому терагерцовая спектроскопия может быть использована для идентификации как самого вещества, так и его структурных модификаций, что особенно важно в медицине и фармакологии. Такие материалы, как одежда, пластик, дерево, бумага, прозрачны в данном спектральном диапазоне, при этом многие лекарственные средства, наркотики, взрывчатые и ядовитые вещества имеют собственные моды в терагерцовом диапазоне, что является перспективным при использовании в системах безопасности и контроля качества. В работах [1,2] показано, что спектры пропускания биологических объектов, таких как ДНК, РНК, аминокислот, белков и др., имеют характерные “отпечатки” в данном диапазоне, которые могут служить для их анализа.

В настоящее время методы генерации и детектирования импульсов терагерцового диапазона, основанные на принципах нелинейной оптики, находятся в ряду наиболее эффективных [3]. Такие свойства, как комнатная температура функционирования, широкий спектральный диапазон, относительно высокая эффективность преобразования, сделали эти методы распространенными в различных областях. Эффективность преобразования импульсов оптического диапазона в терагерцовый во многом зависит от параметров нелинейной среды: длины когерентности, коэффициента поглощения и величины нелинейной восприимчивости.

Благодаря большой нелинейной восприимчивости второго порядка кристаллы ниобата лития принадлежат к числу наиболее эффективных сред для различных нелинейно-оптических преобразований частоты лазерного излучения. Для эффективных оптико-терагерцовых преобразований необходимо выполнение условий фазового синхронизма между волнами оптического и терагерцового диапазонов. Нормальная дисперсия ограничивает спектральный диапазон и эффективность нелинейно-оптических преобразований. Данные ограничения можно устранить при использовании кристаллов ниобата лития с регулярной доменной структурой. В данных кристаллах нелинейная восприимчивость меняет знак при переходе от од-

ного домена к другому, вследствие чего расстройка фазового синхронизма компенсируется за счёт вектора обратной сверхрешётки. Существует несколько методов создания регулярной доменной структуры. В частности, наиболее актуальными являются методы, такие как наведение доменной структуры кристалла непосредственно в процессе его роста (ростовой метод) и наведение доменной структуры электрическим полем в послеростовой фазе (послеростовой метод). Впервые квазисинхронная генерация импульсов терагерцового излучения наблюдалась при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в периодически поляризованных кристаллах ниобата лития (PPLN) в работе [4]. Было показано, что в кристаллах PPLN имеет место генерация узкополосного терагерцового излучения с возможностью управления частотой как за счёт изменения температуры кристалла, так и за счёт изменения параметров доменной решётки. При этом всегда использовались кристаллы PPLN с доменной структурой, наведённой методом переполаризации внешними электрическими импульсами в послеростовой период [5]. Кристаллы с послеростовой доменной структурой обладают чёткой доменной структурой с разбросом периодов порядка нескольких нанометров. Однако, вследствие большой коэрцитивной силы кристаллов LiNbO_3 , размеры образца вдоль направления спонтанной поляризации доменов не могут быть более 0.5 мм. Длина волны терагерцового излучения ($1\text{ТГц} = 300\text{ мкм}$) сравнима с толщиной образца, что приводит к большой дифракционной расходимости, и, как было выяснено в диссертационной работе, к уменьшению эффективности детектирования терагерцовых импульсов в кристаллах с послеростовой доменной структурой. Кристаллы PPLN с доменной структурой, наведённой в процессе роста, не имеют данного ограничения; поперечные размеры могут достигать нескольких сантиметров. Использование ростовых широкоапертурных кристаллов перспективно в плане дифракционной расходимости, при использовании мощных импульсов накачки, когда дальнейшая фокусировка может разрушить кристалл, и при детектировании.

В диссертационной работе исследовались особенности генерации терагерцовых импульсов при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах PPLN с ростовой и послеростовой доменной структурах.

Одним из наиболее развитых методов детектирования терагерцового излучения является электро-оптическое детектирование. Принцип действия электро-оптического (ЭО) детектирования заключается в изменении поляризации фемтосекундного лазерного импульса при взаимодействии с терагерцовым полем в нелинейной среде [6]. Обычно в качестве электро-оптических кристаллов используются среды с симметрией цинковой обманки, такие как ZnTe , GaAs , GaP , изменение поляризации измеряется методом эллипсометрии. В диссертационной работе был реализован новый метод электро-оптического детектирования, основанный на амплитудной

модуляции лазерного излучения терагерцовым полем, позволивший снять ограничения на тип симметрии ЭО сенсоров и использовать периодически поляризованные кристаллы ниобата лития в качестве нелинейной среды. В ходе работы было впервые осуществлено квазисинхронное ЭО детектирование узкочастотного терагерцового излучения.

Для управления процессами генерации и детектирования терагерцового излучения необходимо иметь точные данные об оптических свойствах нелинейных сред в данном диапазоне. Для этой цели обычно используется такие методы, как Фурье-спектроскопия, спектроскопия когерентного антистоксово рассеяния (КАРС), терагерцовая временная и частотная спектроскопии. До настоящего времени метод спектроскопии спонтанного параметрического рассеяния света эффективно применялся только в видимой и ИК области [8,9]. В диссертационной работе данный метод впервые использовался для исследования дисперсии действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава, номинально чистого и с 5 мол. % примеси Mg в терагерцовом диапазоне спектра.

Целью диссертационной работы являлось:

1. экспериментальное и теоретическое исследование процессов генерации и детектирования импульсов терагерцового излучения, основанных на нелинейно-оптическом преобразовании частоты фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах с регулярной доменной структурой.
2. исследование дисперсионных характеристик кристаллов LiNbO_3 и Mg:LiNbO_3 в терагерцовом диапазоне методом рассеяния света на поляритонах и трёхволновой интерференции

Научная новизна диссертационной работы:

1. Экспериментально исследован характер генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах ниобата лития с ростовой и послеростовой доменной структурой.
2. Разработан и реализован новый метод детектирования импульсов терагерцового излучения, позволивший впервые осуществить электрооптическое детектирование в периодически поляризованных кристаллах.
3. Развита метод фемтосекундной накачки-зондирования для исследования коллинеарной и неколлинеарной генерации терагерцовых волн в толще периодически поляризованных кристаллов.

4. Впервые применены методы спектроскопии рассеяния света на поляритонах для измерения дисперсионных характеристик нелинейно-оптических сред в терагерцовом диапазоне. Экспериментально реализован метод трёхволновой интерференции при рассеянии света на поляритонах для измерения коэффициента поглощения на терагерцовых частотах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В процессе электро-оптического детектирования терагерцового излучения при взаимодействии оптического лазерного импульса и терагерцового излучения изменяются не только фазовые, но и амплитудные характеристики лазерного импульса. Электро-оптическое детектирование, основанное на измерении амплитудной модуляции, может функционировать на базе более широкого класса нелинейно-оптических кристаллов.
2. Применение метода электро-оптического детектирования, основанного на амплитудной модуляции, позволяет осуществить детектирование терагерцового излучения в режиме квазисинхронизма в широкоапертурных кристаллах с ростовой доменной структурой.
3. Эффективность генерации импульсов терагерцового излучения в широкоапертурных кристаллах Mg:Y:LiNbO_3 с ростовой доменной структурой существенно не отличается от эффективности генерации в кристаллах LiNbO_3 с доменной структурой, созданной методом поляризации в пространственно-неоднородном электрическом поле; различие амплитуд терагерцовых полей составляет 7-10% при плотностях мощности импульсов накачки до 10^{10} Вт/см². Однако, эффективность детектирования в кристаллах с ростовой доменной структурой существенно выше вследствие их широкой апертуры.
4. Метод фемтосекундной накачки-зондирования является эффективным средством исследования условий коллинеарных и неколлинеарных процессов генерации и детектирования терагерцовых волн в объёме протяженных образцов периодически поляризованных кристаллов.
5. Метод спектроскопии рассеяния света на поляритонах позволяет измерять дисперсию действительной части диэлектрической проницаемости нелинейно-оптических кристаллов в терагерцовом диапазоне. Для измерения дисперсии мнимой части диэлектрической проницаемости в терагерцовом диапазоне методом спектроскопии рассеяния света на поляритонах необходимо применение схемы трёхволновой интерференции.

Практическая значимость работы:

1. Результаты проведённого сравнения особенностей генерации терагерцового излучения при преобразовании фемтосекундных лазерных импульсов в периодически поляризованных кристаллах ниобата лития с ростовой и послеростовой доменной структурой может быть использовано при проектировании узкочастотных источников и приёмников терагерцового излучения.
2. Впервые осуществлено электрооптическое детектирование терагерцовых импульсов в квазисинхронном режиме в кристаллах Mg:LiNbO_3 с ростовой доменной структурой.
3. Предложен и впервые экспериментально реализован новый метод электро-оптического детектирования импульсов терагерцового излучения. Показано, что новый метод может функционировать на основе более широкого ряда высокоэффективных нелинейно-оптических кристаллов — без ограничений, накладываемых на тип симметрии кристаллической решётки.
4. Развита методика фемтосекундной накачки-зондирования для исследования условия коллинеарной и неколлинеарной генерации терагерцовых волн в объёме протяженных образцов периодически поляризованных кристаллов.
5. Впервые использованы методы рассеяния света на поляритонах и метод трёхволновой интерференции для измерения дисперсионных характеристик кристаллов в терагерцовом диапазоне спектра. Исследовано влияние примеси магния в кристаллах ниобата лития на дисперсию действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в терагерцовом диапазоне.

Апробация работы:

Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах: «Письма в ЖЭТФ», «Вестник МГУ. Физика. Астрономия.», «Applied Physics B: Lasers and Optics», «Applied Physics Letters», «International Journal of Quantum Information», «Journal of Infrared Millimetre and Terahertz Waves». Результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях, таких как: «Topical Problems of Biophotonics - 2009», VI Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2009», «Оптика-2010», «Фундаментальные проблемы оптики-2010», «Terahertz Radiation: Generation and Application» и другие.

По материалам диссертации было опубликовано 24 работ, из которых 6 - статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК России, 18 – тезисы международных и отечественных научных конференций.

Структура и объём диссертационной работы:

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Полный объём работы 134 страницы, включая 43 рисунка. Библиография содержит 146 публикаций.

Личный вклад:

Все использованные в диссертации результаты являются оригинальными и были получены автором лично или при его непосредственном участии.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики диссертационной работы, изложены основные проблемы рассматриваемого тематического направления, приведены цели, сформулирована научная новизна работы. Затем дан краткий обзор методов генерации, детектирования и спектроскопии в терагерцовом спектральном диапазоне. Изложены основные преимущества нелинейно-оптических методов генерации и детектирования терагерцового излучения и спектроскопии рассеяния света на поляритонах.

Первая глава диссертационной работы посвящена методам генерации терагерцового излучения. В начале главы дан обзор основных методов и устройств генерации терагерцовых полей, причём основное внимание уделено лазерным методам, основанным на принципах нелинейной оптики. Затем теоретически описан процесс генерации импульсов терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов.

При описании использовались приближения заданной накачки и медленно меняющихся амплитуд. В данных приближениях поле терагерцовой волны в “прямом” (f) и “обратном” (b) направлении при генерации методом оптического выпрямления сверхкоротких лазерных импульсов описывается следующим выражением:

$$E_{f,b}(\Omega) = \frac{i2\pi\Omega^2 L}{kc^2} T_{f,b}(\Omega) C(\Omega). \quad (1)$$

Здесь Ω - частота терагерцового поля, c - скорость света в вакууме, k - волновой вектор на оптической частоте, $T_{f,b}(\Omega)$ - функция нелинейной передачи, $C(\Omega)$ - автокорреляционная функция импульсов накачки. Нелинейная

функция передачи $T_{f,b}$ является аппаратной функцией нелинейной среды и несёт информацию о пространственно-неоднородном распределении квадратичной восприимчивости в пределах объёма взаимодействия:

$$T_{f,b}(\Omega) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} dx' \chi^{(2)}(x') e^{i\left(\frac{\Omega}{u_{gr}} \pm k(\Omega)\right)x'}, \quad (2)$$

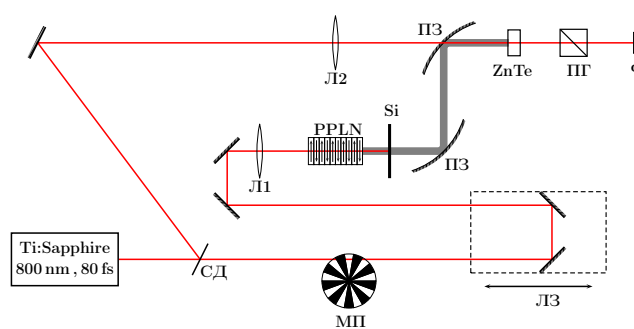
$C(\Omega)$ -фактор характеризует аппаратную функцию импульса накачки и определяется через его огибающую $B_p(t)$ как:

$$C(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E_p(\omega) E_p^*(\omega - \Omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |B_p(t)|^2 e^{i\Omega t} dt, \quad (3)$$

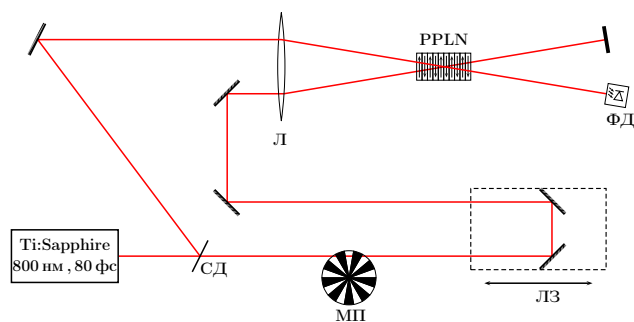
$u_{gr} \equiv \frac{\partial k_{opt}}{\partial \omega}$ - групповая скорость оптических волн. В пространственно-однородных кристаллах эффективность генерации максимальна при выполнении условий фазового синхронизма $\Delta k_{f,b} = \frac{\Omega}{u_{gr}} \pm k(\Omega) = 0$. В кристаллах LiNbO_3 условия фазового синхронизма не выполняются, так как групповая скорость оптического и фазовая скорость терагерцового импульсов отличаются более чем в два раза, что приводит к малой длине когерентности (для 1 ТГц, длина когерентности составляет порядка 50 $\mu\text{м}$) и крайне малой эффективности генерации. В кристаллах PPLN фазовая расстройка компенсируется периодической сменой направления нелинейной восприимчивости. Вследствие этого, в кристаллах PPLN имеет место генерация узкочастотного терагерцового излучения с параметрами, определяющимися свойствами доменной структуры кристалла. При оптическом выпрямлении генерация терагерцового излучения происходит в небольшой области вблизи выходной грани кристалла (~ 1 мм в случае кристаллов ниобата лития). Для исследования процессов генерации во всём объёме кристалла PPLN был разработан метод фемтосекундной накачки-зондирования, позволяющий измерять терагерцовые поля в кристалле как в коллинеарном, так и в неколлинеарном режиме.

Далее даётся описание кристаллов ниобата лития с доменной структурой (PPLN), наведённой в процессе роста, и доменной структурой, наведённой в послеростовой период внешними электрическими импульсами. Приводятся схемы трёх экспериментальных установок для исследования спектров генерации терагерцового излучения периодически поляризованными кристаллами PPLN с ростовой и послеростовой доменной структурой. С помощью экспериментальной установки №1 (Рис. 1) исследовались спектры генерации кристаллов PPLN в условиях, когда область генерации имела диаметр меньше длины волны терагерцового поля и регистрировалось поле, генерируемое в небольшой области вблизи выходной грани кристал-

ла. При таких условиях на спектр генерации влияет продольная неоднородность доменной структуры приповерхностного слоя кристалла. Для исследования эффективности оптико-терагерцовых преобразований во всём объёме кристалла использовался метод фемтосекундной накачки-зондирования (Рис. 1 экспериментальная установка №2). В этом случае исследовались генерируемые терагерцовые поля как в “прямом”, так и в “обратном”, относительно распространения импульса накачки, направлении. Для исследования возможной перестройки частоты генерации терагерцовой волны исследовались кристаллы PPLN с различными периодами доменной структуры от 27 до 80 мкм и различной ориентацией доменных стенок.



№1.



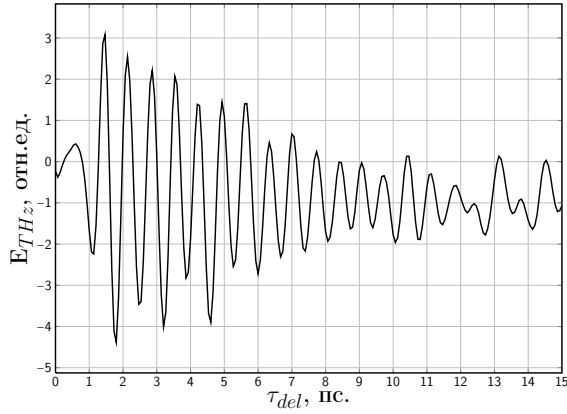
№2.

Рис. 1: Экспериментальные установки. СД - светоделитель, ЛЗ - линия задержки, МП - механический прерыватель, ПЗ - параболические зеркала, ФД - фотодиод, ПГ - призма Глана

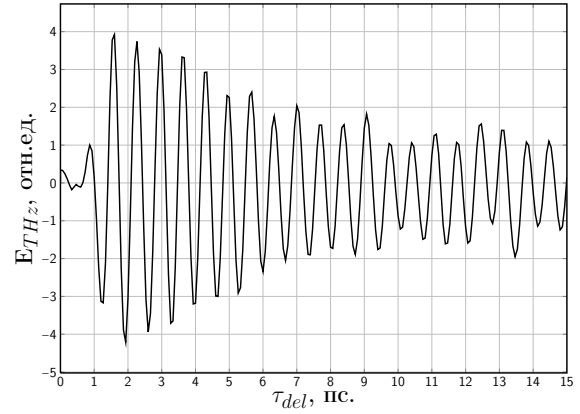
На Рис. 2 представлены измеренные временные зависимости терагерцовых полей, которые генерировались методом оптического выпрямления фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах ниобата лития с ростовой и послеростовой доменной структурой с периодом 70 мкм. Генерируемые терагерцовые поля являются узкочастотными с временным периодом равным 0.67 пс, что соответствует частоте генерации 1.5 ТГц. Различия во временной динамике терагерцовых полей связаны с большей неоднородностью ростовой доменной структуры по сравнению с послеростовой доменной структурой.

Сравнивая особенности генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в кристаллах ниобата лития с регулярной доменной структурой, выращенной в процессе роста, и наведённой электрическим полем в послеростовой период, можно заключить, что применение широкоапертурных

кристаллов с ростовой доменной структурой не приводит к заметному изменению эффективности генерации по сравнению с кристаллами с послеростовой доменной структурой, различие амплитуд терагерцовых полей составляет 7-10 % при плотности мощности импульсов накачки порядка 10^{10}



Ростовая доменная структура.



Послеростовая доменная структура.

Рис. 2: Временная динамика терагерцового поля при генерации методом оптического выпрямления фемтосекундных импульсов в кристаллах PPLN.

Вт/см². Однако, как это будет показано во второй главе, использование кристаллов с ростовой доменной структурой является ключевым условием при пробно-энергетическом детектировании терагерцового излучения в режиме квазисинхронизма.

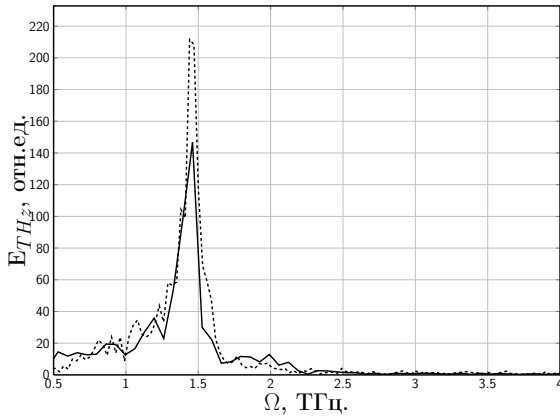


Рис. 3: Спектры генерации терагерцового излучения кристаллами PPLN с ростовой доменной структурой (сплошная линия) и с послеростовой доменной структурой (штрихованная линия).

в пределах 0.5 - 1.5 ТГц при изменении периода доменной структуры от 27 мкм до 80 мкм. Также показано, что за счёт изменения ориентации кристалла Mg:Y:LiNbO₃ с периодом 27 мкм возможна перестройка частот в диапазоне от 1.4 ТГц до 2.5 ТГц.

Методом фемтосекундной накачки-зондирования исследовались условия генерации и детектирования терагерцовых волн в объёме протяжённых образцов периодически поляризованных кристаллов. Определены полосы частот генерации и детектирования в ряде кристаллов Mg:Y:LiNbO₃ с ростовой доменной структурой. В направлении, совпадающем с направлением накачки, частоты варьируются в диапазоне 1.3 - 1.8 ТГц при изменении периода доменной структуры кристаллов в пределах от 60 мкм до 80 мкм, частоты генерации и детектирования в обратном направлении -

Вторая глава диссертационной работы посвящена методам детектирования терагерцового излучения. В начале главы дан обзор основных методов детектирования терагерцового излучения, известных на момент начала работы над диссертацией. Затем проведён теоретический анализ нелинейно-оптического взаимодействия терагерцового поля с фемтосекундными лазерными импульсами в процессе электро-оптического детектирования. Показано, что возможен не только стандартный метод эллипсометрии, основанный на измерении наведённой фазовой модуляции лазерного импульса, но и пробно-энергетический подход, основанный на амплитудной модуляции лазерного импульса терагерцовым полем.

Результаты теоретического анализа можно кратко сформулировать следующим образом: при ЭО детектировании любого типа взаимодействие терагерцового излучения с оптическим излучением лазерной накачки в нелинейно-оптической среде может быть представлено как набор элементарных процессов генерации суммарной и разностной частоты, протекающих с участием отдельных частотных компонент оптического и терагерцового импульсов. Уравнение, описывающее изменение спектральных компонент оптического импульса $\vec{A}(x, \omega)$ в нелинейной среде в приближении медленно меняющихся амплитуд, будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_i(x, \omega)}{\partial x} = & \frac{2\pi i \omega}{c\sqrt{\varepsilon'}} \chi_{ijk}^{(2)}(x) \int d\Omega \left(A_j(x, \omega - \Omega) e^{ik(\omega - \Omega)x} A_{THz,k}(\Omega) e^{ik_{THz}(\Omega)x} + \right. \\ & \left. + A_j(\omega + \Omega) e^{-ik(\omega + \Omega)x} A_{THz,k}^*(\Omega) e^{ik_{THz}(\Omega)x} \right) e^{-ik^s(\omega)x} \end{aligned} \quad (4)$$

для каждой компоненты $i, j, k = 1, 2, 3$ поляризации оптического ($\vec{A}(x, \omega)$) и терагерцового ($\vec{A}_{THz}(x, \Omega)$) полей. ε' - действительная часть диэлектрической проницаемости кристалла на оптической частоте, $\chi_{ijk}^{(2)}$ - тензор нелинейной восприимчивости. Поле оптического импульса после прохождения кристалла-детектора одновременно с терагерцовым полем будет иметь вид: $A_i(x, t) = A_i(0, t) e^{\alpha_i(x, t)} e^{i\sigma_i(x, t)}$, где

$$\begin{aligned} \alpha_i(x, t) & \sim \int_{-L/2}^{L/2} dx \chi_{i,j,k}^{(2)}(x) \int d\Omega \Omega \Im m \left(A_{THz,k}(\Omega) e^{i\Delta k(\Omega)x} e^{-i\Omega t} \right), \\ \sigma_i(x, t) & \sim \int_{-L/2}^{L/2} dx \chi_{i,j,k}^{(2)}(x) \int d\Omega \omega \Re e \left(A_{THz,k}(\Omega) e^{i\Delta k(\Omega)x} e^{-i\Omega t} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Полученное решение показывает, что взаимодействие с терагерцовым полем приводит к модуляции и фазы, и амплитуды поляризационных компонент оптического импульса. Как фазовая, так и амплитудная модуляции линейно пропорциональны терагерцовому полю. Каждый из этих двух видов модуляции несёт информацию о спектре терагерцового излучения и может быть положен в основу соответствующего метода ЭО детектирования.

Далее рассмотрены возможные схемы детектирования, когда принимаются во внимание как модуляция фазы, так и модуляция амплитуды фемтосекундного лазерного импульса. Спектральные чувствительности фазового, амплитудного и электро-оптического детектирования смешанного типа описываются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} S_{ph}(\Omega) &= \frac{L\bar{\omega}}{\sqrt{\varepsilon'}} C(\Omega) T(\Omega), \\ S_{en}(\Omega) &= \frac{2L\bar{\omega}}{\sqrt{\varepsilon'}} C(\Omega) T(\Omega), \\ S_{\perp}(\Omega) &= \frac{L}{\sqrt{\varepsilon'}} \sqrt{\Gamma_0^2 \bar{\omega}^2 + 4\psi^2 \Omega^2} \times \\ &\times C(\Omega) T(\Omega). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $C(\Omega)$ - автокорреляционная функция импульсов накачки детектора. Γ_0 - остаточное двулучепреломление кристалла-детектора, ψ - угол между осью поляризатора, расположенного перед фотоприёмником, и нормалью к A_{in} .

На Рис. 4а представлена экспериментальная установка, на которой было впервые реализовано пробно-энергетическое квазисинхронное детектирование импульсов терагерцового излучения в кристаллах ниобата лития с ростовой доменной структурой (блок №2). Для сравнения со спектрами детектирования стандартного метода эллипсометрии использовался блок №1. Для реализации электрооптического детектирования смешанного типа использовалась экспериментальная установка, изображённая на Рис. 4б.

На Рис. 5а, 5б представлена временная динамика поля терагерцового излучения при использовании в качестве сенсоров кристаллов PPLN с периодом доменной структуры 70 мкм и кристалла ZnTe. На Рис. 6а представлены частотные спектры детектирования кристаллов ниобата лития

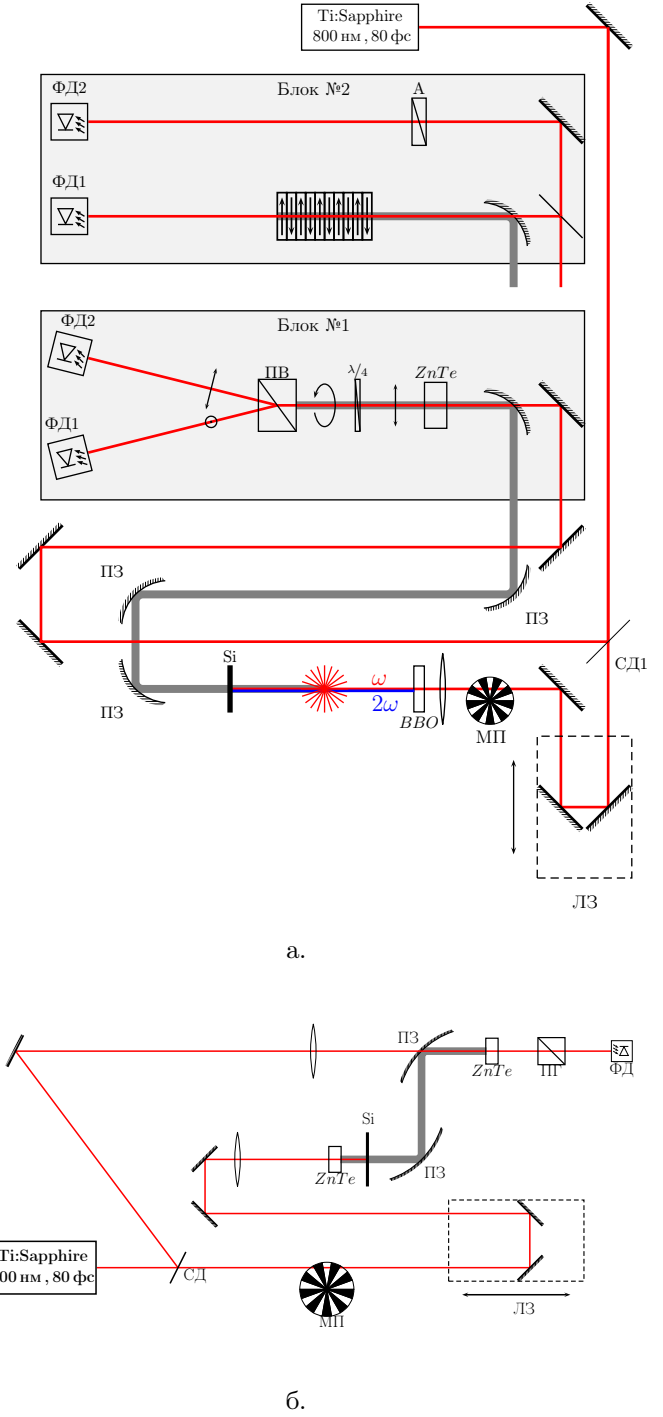


Рис. 4: Экспериментальные установки. СД - светоделитель, ЛЗ - линия задержки, МП - механический прерыватель, ПЗ - параболические зеркала, ФД - фотодиод, ПГ - призма Глана

с ростовой доменной структурой периодом 70 и 80 мкм, измеренные методом пробно-энергетического детектирования, и спектр детектирования кристалла ZnTe, измеренный методом эллипсометрии.

При использовании в качестве сенсоров терагерцового излучения кристаллов ниобата лития с послеростовой доменной структурой сигнал на фоне шума не наблюдался. Отсутствие сигнала может быть объяснено влиянием ограниченности поперечного сечения кристалла на спектральную чувствительность. Кристаллы PPLN с послеростовой доменной структурой

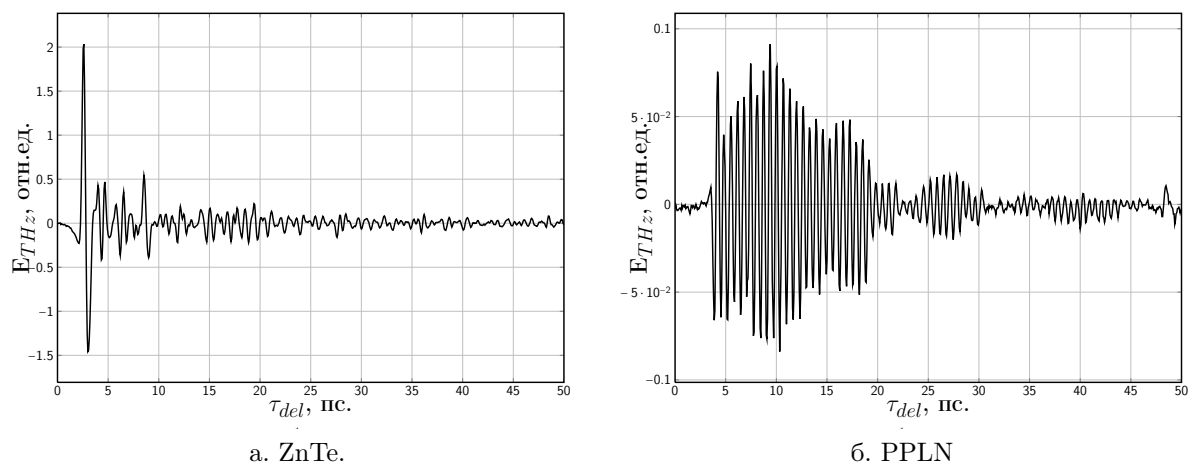


Рис. 5: Временная динамика поля терагерцового импульса при генерации методом оптического пробоя воздуха фемтосекундным лазерным импульсом и электро-оптическим детектировании методом эллипсометрии в кристалле ZnTe и пробно-энергетическим методом с использованием периодически поляризованного кристалла ниобата лития с периодом доменной структуры 70 мкм.

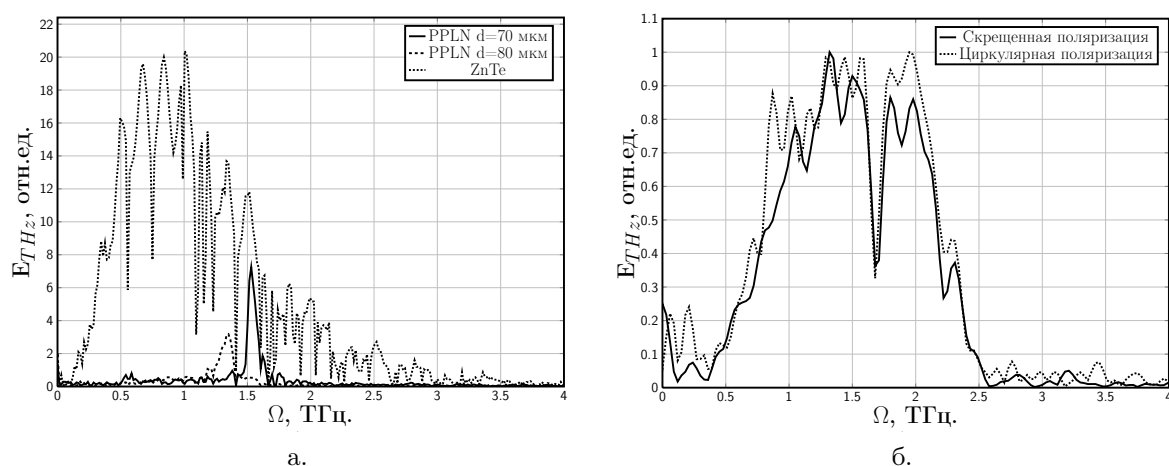


Рис. 6: (а) Спектры детектирования широкополосных импульсов терагерцового излучения кристаллами PPLN и ZnTe; (б) спектры детектирования при реализации ЭО смешанного типа (скрещенная поляризация) и метода эллипсометрии (циркулярная поляризация)

рой имеют сечение входной поверхности порядка 0.5-0.7 мм. При этом

диаметр перетяжки при фокусировке терагерцового излучения (из-за большой длины волны), как правило, более 1 мм. Таким образом, чувствительность кристаллов RPLN с послеростовой доменной структурой значительно уменьшается вследствие малой области взаимодействия, а также за счёт больших углов дифракционной расходимости терагерцового излучения в кристалле, так как длина волны терагерцового поля ($\sim 200\mu\text{м}$) сравнима с сечением образца. В этом плане более предпочтительными являются кристаллы RPLN с ростовой доменной структурой, которые могут иметь гораздо большую величину ($\sim 1\text{см}$) поперечного сечения. Узкополосное квазисинхронное пробно-энергетическое детектирование может быть перспективным в случаях, когда необходимая информация лежит в одной или нескольких узких линиях терагерцового диапазона. При этом, зная заранее полосу детектирования, можно существенно сократить время сканирования. Используя кристаллы с аperiодической доменной структурой, можно изготовить кристалл, который будет чувствителен к нескольким требуемым спектральным линиям, которые могут совпадать с характерными частотами взрывоопасных и ядовитых веществ, что перспективно в плане использования в системах безопасности.

В работе также приводился сравнительный анализ схем смешанного типа и эллипсометрии в случае использования кристалла ZnTe в качестве кристалла-детектора. На Рис. 6б представлены нормированные спектры детектирования, полученные при применении метода смешанного типа и метода эллипсометрии. Согласно данным спектрам, ЭО детектирование смешанного типа в кристаллах ZnTe практически полностью основано на модуляции фазы пробного импульса, при этом амплитудной модуляцией можно пренебречь.

Третья глава посвящена исследованию оптических параметров кристаллов ниобата лития в терагерцовом диапазоне методами спектроскопии рассеяния света на поляритонах, в частности, в условиях трёхволновой интерференции в схеме типа Юнга. В начале главы дан обзор основных методов, используемых в настоящее время для характеристики вещества в терагерцовом диапазоне спектра. Теоретически рассмотрена спектроскопия спонтанного параметрического рассеяния света и трёхволновая интерференция в схеме типа Юнга, условия их применения для характеристики нелинейной среды в терагерцовом диапазоне. Показано, что по частотно-угловому распределению интенсивности сигнального излучения можно определить действительную часть диэлектрической проницаемости нелинейно-оптической среды в терагерцовом диапазоне. Однако, при измерении мнимой части диэлектрической проницаемости фактор ограничения объёма взаимодействия увеличивает ошибку измерения. Для измерения мнимой части диэлектрической проницаемости в терагерцовом диапазоне было предложено использовать метод трёхволновой интерференции. До этого метод трёхволновой интерференции использовал-

ся только в ближнем ИК диапазоне [10]. Представлена экспериментальная установка, которая использовалась для наблюдения частотно-угловых спектров рассеяния света на поляритонах и трёхволновой интерференции в кристаллах ниобата лития с различными концентрациями примеси магния. По частотно-угловым спектрам были измерены дисперсии действительной (Рис. 8, 9) и мнимой частей диэлектрической проницаемости кристаллов LiNbO_3 и $\text{Mg}:\text{LiNbO}_3$ в диапазоне от 0.5 ТГц до 6 ТГц.

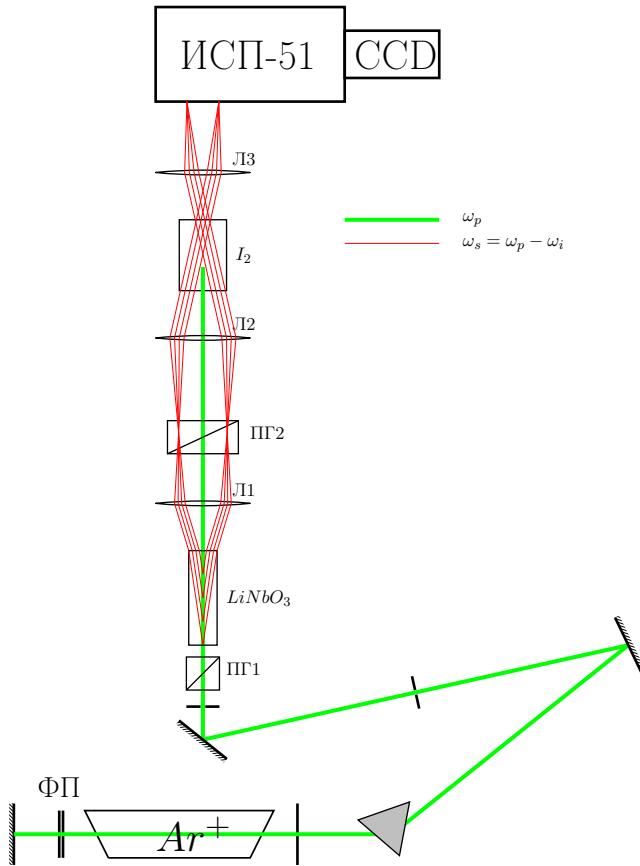


Рис. 7: Экспериментальная установка для наблюдения частотно-угловых спектров рассеяния света на поляритонах.

метод трёхволновой интерференции позволяет измерить мнимую часть диэлектрической проницаемости в терагерцовой области спектра с достаточно высокой точностью. В данном случае, при использовании двойной щели с параметрами $a = d = 100$ мкм была измерена дисперсия коэффициента поглощения в диапазоне от 20 до 130 см^{-1} .

На Рис. 8б изображена разница между действительными частями диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon'$ кристаллов ниобата лития конгруэнтного состава, номинально чистого и с 5 мол. % примеси MgO . $\Delta\epsilon'$ имеет резонансный характер в окрестности низкочастотного фона А типа с частотой 248 см^{-1} . Данное поведение соответствует уменьшению концентрации дефектов кристаллической структуры при легировании кристалла ионами Mg .

Как видно из графиков на Рис. 9, данные, полученные разными авторами, отличаются друг от друга, что может быть связано с разными условиями роста кристалла и сильным влиянием дефектной структуры на мнимую часть диэлектрической проницаемости. Согласно с результатами, приведёнными на Рис. 9а, 9б, наличие примеси Mg заметно уменьшает поглощение терагерцового излучения в кристалле ниобата лития, что согласуется с данными, полученными другими методами [10,11]. Таким образом, ме-

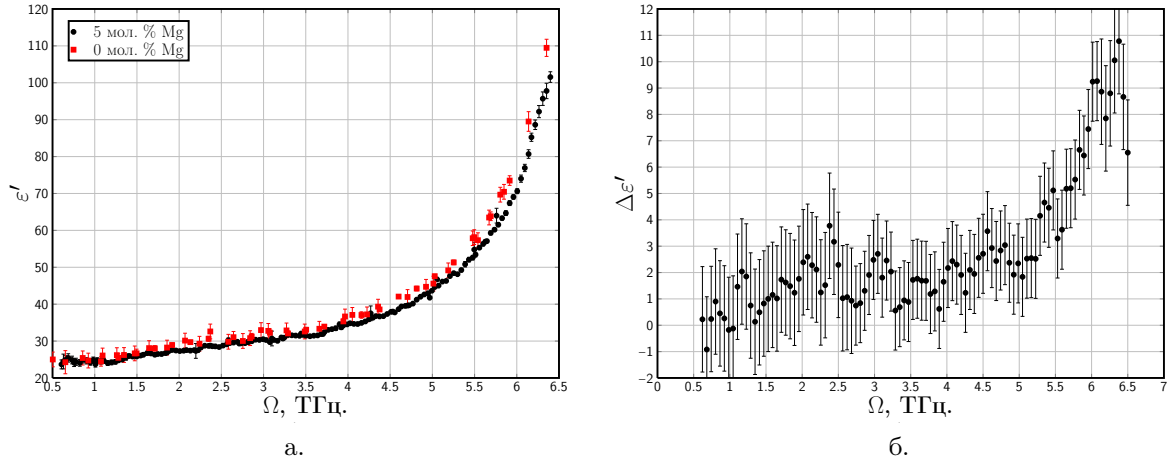


Рис. 8: (а): дисперсия действительной части диэлектрической проницаемости кристаллов LiNbO_3 и $\text{Mg}:\text{LiNbO}_3$, (б): дисперсия $\Delta\epsilon' = \epsilon'_{\text{Mg:LiNbO}_3} - \epsilon'_{\text{LiNbO}_3}$

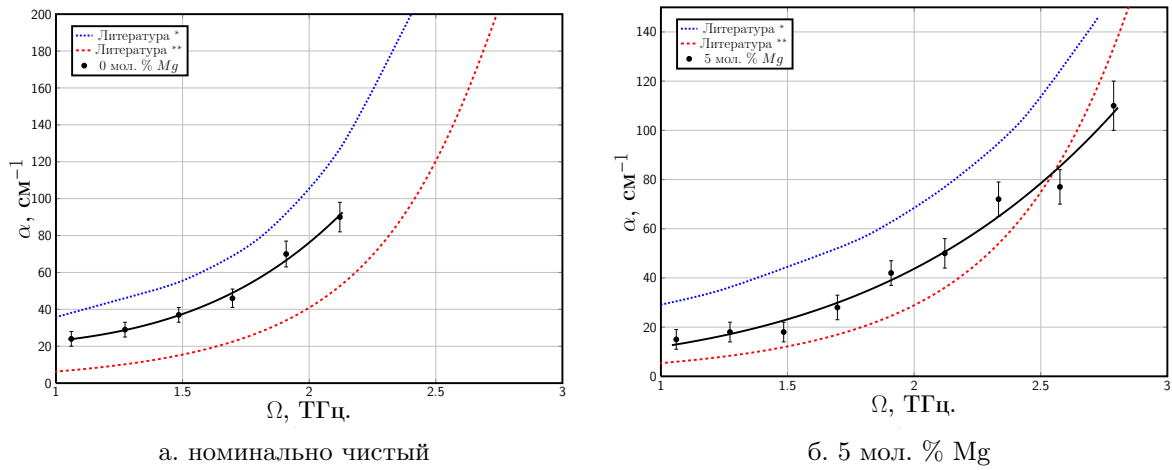


Рис. 9: Дисперсия коэффициента поглощения кристалла ниобата лития конгруэнтного состава (номинально чистого и с 5 мол. % примеси Mg) в терагерцовом диапазоне измеренная методом трёхволновой интерференции, * - [10], ** - [11].

Основные результаты и выводы.

1. Исследованы особенности генерации терагерцового излучения при оптическом выпрямлении фемтосекундных лазерных импульсов в периодически поляризованных кристаллах ниобата лития двух типов: с регулярной доменной структурой, созданной в процессе роста кристаллов, и доменной структурой, созданной в послеростовом периоде путем наложения пространственно-неоднородного электрического поля. Обнаружены эффекты неоднородного уширения спектральной линии генерации, обусловленные нерегулярностью ростовой доменной структуры. Показано, что применение кристаллов с регулярной ростовой доменной структурой не приводит к заметному изменению

эффективности генерации по сравнению с кристаллами с послеростовой доменной структурой, различие амплитуд генерируемых терагерцевых полей составляет 7-10% при плотности мощности импульсов накачки до 10^{10} Вт/см².

2. Экспериментально реализован новый метод электрооптического детектирования импульсов терагерцового излучения, основанный на измерении модуляции амплитуды фемтосекундного лазерного импульса, наведённой терагерцовым полем в нелинейно-оптической среде. Данный метод может функционировать на основе более широкого класса нелинейно-оптических сред, включая кристаллы с одной действующей компонентой тензора квадратичной восприимчивости.
3. Впервые осуществлено электрооптическое детектирование терагерцовых импульсов в режиме квазисинхронизма. Показано, что использование широкоапертурных кристаллов с ростовой доменной структурой и экспериментальной схемы, основанной на измерении модуляции амплитуды лазерных импульсов, являются ключевыми условиями для квазисинхронного детектирования терагерцового излучения в периодически поляризованных кристаллах ниобата лития.
4. Развита методика фемтосекундной накачки-зондирования для исследования условий генерации и детектирования терагерцовых волн в объёме протяжённых образцов периодически поляризованных кристаллов. На его основе определены полосы частот генерации и детектирования в ряде кристаллов Mg:Y:LiNbO_3 с ростовой доменной структурой. В направлении, совпадающем с направлением накачки, частоты варьируются в диапазоне 1.3 - 1.8 ТГц при изменении периода доменной структуры кристаллов в пределах от 60 мкм до 80 мкм, частоты генерации и детектирования в обратном направлении - в пределах 0.5 - 1.5 ТГц при изменении периода доменной структуры от 27 мкм до 80 мкм. Также показано, что за счёт изменения ориентации кристалла Mg:Y:LiNbO_3 с периодом 27 мкм возможна перестройка частот в диапазоне от 1.4 ТГц до 2.5 ТГц.
5. Развита методика спектроскопии рассеяния света на поляритонах для измерения дисперсионных характеристик нелинейно-оптических сред в терагерцовом диапазоне. Экспериментально реализован метод трёхволновой интерференции при рассеянии света на поляритонах для измерения коэффициента поглощения на терагерцовых частотах.
6. Исследовано влияние примеси магния в кристаллах ниобата лития на дисперсию действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости в терагерцовом диапазоне. Определены дисперсионные

характеристики кристаллов LiNbO_3 и Mg:LiNbO_3 конгруэнтного состава на частотах от 0.5 ТГц до 6 ТГц.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. S.W. Smye, J.M. Chamberlain, A.J. Fitzgerald, E. Bery, The interaction between Terahertz radiation and biological tissue // Phys. Med. Biol. 2001. T. 46. C. R101-R112.
2. A.J. Fitzgerald, E. Bery, N.N. Zinovev et al, An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation // Phys. Med. Biol. 2002. T. 42. C. R67-R84.
3. G.Kh. Kitaeva, Terahertz generation by means of optical lasers // Laser Phys. Lett. 2008. T. 5. C. 559-576.
4. Y.S. Lee, T. Meade, V. Perlin, Generation of narrow-band terahertz radiation via optical rectification of femtosecond pulses in periodically poled lithium niobate // Appl. Phys. Lett. 2000. T. 76. C. 2505-2507.
5. M.J. Missey, S. Russell, V. Dominic, Real-time visualization of domain formation in periodically poled lithium niobate// Opt. Exp. 2000. T.6. C. 186-195.
6. Q. Chen, X.-C. Zhang. Polarization modulation in optoelectronic generation and detection of terahertz beams // Appl. Phys. Lett. 1999. T. 74. C. 3435–3437.
7. K.A. Kuznetsov, H.C. Guo, G.Kh. Kitaeva et al, Characterization of periodically poled LiTaO_3 crystals by means of spontaneous parametric down-conversion // Appl. Phys. B. 2006. T. 83. C. 273-278.
8. G.Kh. Kitaeva, K.A. Kuznetsov, A.V. Shevlyuga, A.N. Penin, Infrared dispersion of dielectric function in Mg:doped LiNbO_3 crystals with polaronic-type conductivity // J. Raman Spectrosc. 2007. T. 38. C. 994-997.
9. А.В. Бурлаков, Интерференция бифотонных полей // Диссертация на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук. -М., 2000.
10. Q. Tiequn, M. Max, Long-distance propagation and damping of low-frequency phonon polaritons in LiNbO_3 // Phys. Rev. B. 1997. T. 56. C. R5717-R5720.
11. L. Palfalvi, J. Hebling, J. Kuhl et al, Temperature dependence of the absorption and refraction of $\text{Mg-doped congruent and stoichiometric LiNbO}_3$ in the THz range // J. Appl. Phys. 2005. T. 97. C. 123505.

СПИСОК СТАТЕЙ АВТОРА ИЗ ПЕРЕЧНЯ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ ВАК РФ

1. G.Kh. Kitaeva, S.P. Kovalev and K.A. Kuznetsov. Biphoton wave packets generated in aperiodically poled crystals// International Journal of Quantum Information. 2009. T. 7. C. 63–69.
2. G.Kh. Kitaeva, S.P. Kovalev, I.I. Naumova, R.A. Akhmedzhanov, I.E. Ilyakov, B.V. Shishkin, and E.V. Suvorov. Quasi-phase-matched probe-energy electro-optic sampling as a method of narrowband terahertz detection// Appl. Phys. Lett. 2010. T. 96. C. 071106.
3. K.A. Kuznetsov, S.P. Kovalev, G.K. Kitaeva, T.D. Wang, Y.Y. Lin, Y.C. Huang, I.I. Naumova, A.N. Penin. Dispersion of the dielectric function real part for Mg:LiNbO₃ crystals at terahertz frequencies// Appl. Phys. B 101. 2010. C. 811–815.
4. G.Kh. Kitaeva, S.P. Kovalev, A.N. Penin, A.N. Tuchak, P.V. Yakunin. A Method of Calibration of Terahertz Wave Brightness Under Nonlinear-Optical Detection// J. Infrared Milli. Terahz Waves. 2011. T. 32. C. 1144–1156.
5. С.П. Ковалев, Н.А. Ильин, И.Е. Иляков, Е.Д. Мишина, А.Н. Пенин, А.С. Сигов. Нелинейно-оптическое детектирование терагерцового излучения в периодически поляризованных кристаллах// Вестник Московского университета. 2011. Т. 1. С. 12-18.
6. S.P. Kovalev and G.Kh. Kitaeva. Two Alternative Approaches to Electro Optical Detection of Terahertz Pulses// JETP Lett. 2011. T. 94. № 2. C. 95-100.