

Мамрашев Александр Анатольевич

**Разработка, исследование и применение
широкополосного терагерцового спектрометра
с поляризационно-оптической регистрацией
на базе фемтосекундного волоконного лазера**

01.04.05 «Оптика»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) и на кафедре автоматизации физико-технических исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ).

Научный руководитель: Потатуркин Олег Иосифович
доктор технических наук, профессор
ИАиЭ СО РАН, заместитель директора

Официальные оппоненты: Чаповский Павел Львович
доктор физико-математических наук, профессор
ИАиЭ СО РАН, главный научный сотрудник

Есаев Дмитрий Георгиевич
кандидат физико-математических наук,
ИФП СО РАН, заведующий лабораторией

Ведущая организация: НИИ радиоэлектроники и лазерной техники
Московского государственного технического
университета имени Н. Э. Баумана.

Защита состоится 10 июня 2013 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан 8 мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д. ф.-м. н.

Насыров К. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Освоение терагерцового (ТГц) диапазона частот (0,1÷10 ТГц) является одним из новых и перспективных научных направлений. Активность в этой области обусловлена широкими возможностями применений терагерцового излучения в материаловедении, биологии, медицине и системах обеспечения безопасности, а также для исследования быстропротекающих процессов методами нестационарной спектроскопии [1]. Необходимым условием развития этого направления является разработка и создание систем терагерцовой спектроскопии с высокой эффективностью генерации и регистрации ТГц излучения.

Значительный прогресс в создании терагерцовых систем начался в конце 80-х годов в связи с появлением мощных пико- и фемтосекундных титан-сапфировых лазеров. Они позволили реализовать системы широкополосной терагерцовой спектроскопии, основанные на преобразовании оптических (~800 нм) импульсов в терагерцовые [2]. В таких системах при помощи поляризационно-оптического метода осуществляется регистрация напряженности поля терагерцовых импульсов [3]. В настоящее время активно развивается волоконная техника, в том числе фемтосекундные лазеры и усилители на длинах волн 1550 нм (основная гармоника) и 775 нм (вторая гармоника). Ее высокие технические и эксплуатационные характеристики создают предпосылки для разработки более стабильных, компактных, долговечных и экономичных систем терагерцовой спектроскопии.

Цели и задачи работы. Целью данной работы является разработка и исследование широкополосных терагерцовых спектрометров с системой когерентной поляризационно-оптической регистрации в нелинейно-оптических кристаллах GaAs (ZnTe) на базе излучения основной (1550 нм) и второй (775 нм) гармоник фемтосекундного волоконного лазера, а также применение спектрометра для исследования оптических свойств различных материалов в терагерцовом диапазоне.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка и создание терагерцовых спектрометров на пропускание ТГц излучения на основе преобразования фемтосекундных лазерных импульсов, а также программно-аппаратных средств управления спектрометром.
2. Экспериментальное исследование характеристик терагерцовых спектрометров: динамический диапазон, соотношение сигнал/шум, временная стабильность, спектральное разрешение и диапазон.
3. Разработка и реализация программно-алгоритмических средств обработки и представления результатов измерений, расчета спектральных характеристик и параметров исследуемых материалов (пропускание, коэффициент поглощения, комплексный показатель преломления и диэлектрическая проницаемость).

4. Проверка экспериментальных возможностей спектрометров на примере исследования свойств кристаллов из класса боратов и халькогенидных стекол в терагерцовой области спектра.

Научная новизна:

1. Разработан и создан экспериментальный образец широкополосного терагерцового спектрометра на основе излучения второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера (длина волны ~ 775 нм, длительность импульсов ~ 100 фс, средняя мощность до 100 мВт) со спектральным диапазоном $0,1 \div 2,5$ ТГц, спектральным разрешением ~ 10 ГГц и максимальным динамическим диапазоном по напряженности ТГц поля до 500.
2. Определена зависимость характеристик терагерцового спектрометра от параметров кристалла регистрации. Предложено при регистрации на длине волны 775 нм для увеличения чувствительности спектрометра (кроме частот вблизи 1,5 ТГц) использовать кристаллы регистрации ZnTe толщиной 2 мм, а для расширения спектрального диапазона — кристаллы толщиной 0,5 мм.
3. Разработаны методики и созданы программно-алгоритмические средства расчета параметров исследуемых материалов в терагерцовой области спектра: коэффициента пропускания, коэффициента поглощения, комплексного показателя преломления и диэлектрической проницаемости. Предложено использовать алгоритм развертывания фазы для коррекции Фурье-спектра ТГц импульсов при расчете параметров.
4. Впервые экспериментально показано, что за счет значительного двулучепреломления $\Delta n/n \sim 0,16$ нелинейные кристаллы трибората лития можно использовать для создания элементов поляризационной оптики в терагерцовой области спектра.

Практическая значимость:

1. Экспериментальные образцы терагерцовых спектрометров могут быть использованы для исследования свойств различных материалов в ТГц области спектра.
2. Спектрометры могут служить базой для создания малогабаритных систем терагерцовой дистанционной диагностики в материаловедении, биологии и медицине.

Защищаемые положения:

1. Экспериментальные образцы терагерцовых спектрометров на пропускание ТГц излучения позволяют измерять оптические свойства различных материалов в спектральном диапазоне $0,1 \div 2,5$ ТГц со спектральным разрешением ~ 10 ГГц и максимальным динамическим диапазоном по напряженности ТГц поля до 500.

2. Кристаллы регистрации ZnTe на длине волны 775 нм обеспечивают большую чувствительность спектрометра (кроме частот вблизи 1,5 ТГц) при увеличении их толщины, а кристаллы меньшей толщины — более широкий спектральный диапазон и равномерный спектральный отклик.
3. За счет значительного двулучепреломления кристаллы семейства боратов могут быть использованы для создания элементов поляризационной оптики в терагерцовой области спектра.

Личный вклад. Автором создана система поляризационно-оптической регистрации напряженности терагерцового поля в нелинейно-оптических кристаллах. Разработаны и созданы программно-алгоритмические средства управления терагерцовым спектрометром, автоматизации измерений, обработки и визуализации экспериментальных данных. Проведены экспериментальные исследования терагерцовых спектров различных материалов, а также обработка и определение их оптических свойств в терагерцовой области спектра.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 6 — в трудах международных и всероссийских конференций, 13 — в тезисах международных и всероссийских конференций; получен патент на полезную модель.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 1-й и 2-й международных конференциях “Terahertz radiation: Generation and Application” (Новосибирск, 2010; Москва, 2012), международном симпозиуме “International Symposium on Photonics and Optoelectronics” (Шанхай, 2012), конференции по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоники «Фотоника» (Новосибирск, 2008, 2011), молодежной конкурсе-конференции «Фотоника и оптические технологии» (Новосибирск, 2011), международной научной студенческой конференции (Новосибирск, 2009).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 85 страницах, включает 26 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 121 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований, приводятся цель и задачи работы, формулируются научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представляются основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассматриваются методы генерации и регистрации широкополосного терагерцового излучения на основе преобразования фемтосекундных лазерных импульсов, обсуждаются принципы работы импульсных широкополосных терагерцовых спектрометров на базе рассмотренных методов.

В параграфе 1.1 анализируются следующие подходы для генерации импульсного терагерцового излучения:

- оптическое выпрямление в нелинейных кристаллах;
- возбуждение импульсного фототока в фотопроводящих антеннах;
- генерация на поверхности полупроводников.

Эти методы основаны на создании импульсов нестационарной поляризации или тока лазерными импульсами фемтосекундной длительности, релаксация которых приводит к излучению широкополосного электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне частот [4].

В параграфе 1.2 рассматриваются различные методы регистрации широкополосного терагерцового излучения, в т. ч. когерентный поляризационно-оптический метод, который основан на эффекте Поккельса в нелинейно-оптических кристаллах [3]. Электрическое поле терагерцового импульса вызывает изменение эллипсоида показателей преломления, благодаря чему линейная поляризация пробного лазерного импульса, проходящего через нелинейный кристалл, становится эллиптической. Дальнейшее преобразование эллиптичности в поворот плоскости поляризации четвертьволновой пластинкой с последующим разложением на две ортогональные компоненты призмой Волластона и дифференциальным считыванием их интенсивностей кремниевыми или германиевыми р-і-n-фотодиодами позволяет получить результирующий разностный сигнал, пропорциональный напряженности терагерцового поля. Таким образом, в отличие от традиционных подходов, осуществляется регистрация не интенсивности, а амплитуды ТГц поля.

Изложенные методы генерации и регистрации терагерцового излучения могут быть скомбинированы для создания широкополосных импульсных терагерцовых спектрометров. В параграфе 1.3 описывается схема ТГц спектрометров, принцип работы и их основные характеристики. Кроме того, в пункте 1.3.3 подробно рассматриваются методы обработки ТГц импульсов, измеряемых спектрометром, а также методы расчета параметров исследуемых материалов по измеренным импульсам.

Вторая глава посвящена разработке, созданию и исследованию импульсных терагерцовых спектрометров с системой поляризационно-оптической регистрации на базе излучения первой и второй гармоник волоконных фемтосекундных лазеров.

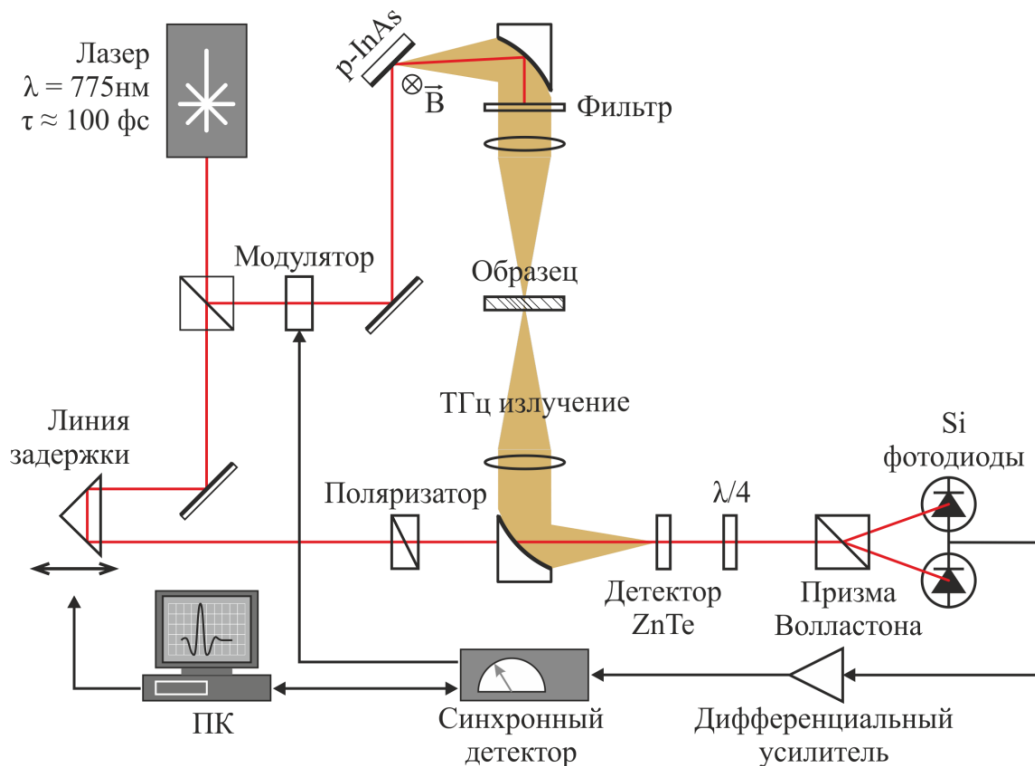


Рис. 1. Схема широкополосного ТГц спектрометра на второй гармонике волоконного лазера.

В первом пункте параграфа 2.1 приводится описание разработанного спектрометра на базе излучения второй гармоники волоконного лазера (длина волны $\lambda = 775$ нм, длительность импульсов – 100 фс, энергия – 1 нДж). Излучение лазера делится на два пучка: один используется для накачки ТГц генератора, а другой (пробный или считывающий) — для регистрации терагерцового излучения (рис. 1). Первый пучок, проходя акустооптический модулятор, падает на поверхность кристалла p-InAs, помещенного в магнитное поле. Генерируемое на поверхности терагерцовое излучение проходит через фильтр, в котором поглощается остаточное излучение накачки. Система внеосевых параболических зеркал и терагерцовых линз фокусирует ТГц излучение на исследуемый образец, а затем на нелинейный кристалл регистрации. Длины оптических путей терагерцовых и пробных импульсов подобраны таким образом, чтобы они одновременно попадали на кристалл. Регистрация осуществляется поляризационно-оптическим методом в кристаллах ZnTe с просветляющим покрытием на 775 нм. С помощью оптической линии задержки изменяется длина оптического пути пробных импульсов и формируется задержка с заданным временным шагом δt в диапазоне T . В каждом положении линии задержки измеряется напряженность терагерцового поля. Таким образом осуществляется сканирование временной формы ТГц импульса. Вычисление спектра сигнала производится путем преобразования Фурье.

В пункте 2.1.2 рассматривается специализированное программно-аппаратное обеспечение, которое осуществляет управление линией задержки, установку параметров сканирования и записи временной формы терагерцовых импульсов.

С его помощью осуществляется:

- регулирование временной задержки терагерцового импульса относительно считывающего лазерного импульса за счет изменения длины оптического пути при помощи управления моторизованным линейным позиционером;
- регистрация и усреднение показаний синхронного детектора в течение заданного промежутка времени;
- сканирование опорного и сигнального терагерцовых импульсов, которое осуществляется последовательным перемещением позиционера на заданное фиксированное расстояние (шаг сканирования) и считыванием показаний синхронного детектора в каждой точке;
- конфигурирование процедуры сканирования, а именно: задание числа точек сканирования, времени усреднения в каждой точке и размера шага;
- визуализация терагерцового импульса (зависимости показаний синхронного детектора, пропорциональных напряженности электрического поля отраженного терагерцового импульса, от времени задержки) и его спектра;
- сохранение измеренной временной формы опорного или сигнального терагерцового импульсов.

Третий пункт параграфа 2.1 содержит описание экспериментальных исследований основных характеристик разработанного спектрометра и их зависимость от параметров сканирования ТГц импульса (временного шага и диапазона). Из свойств преобразования Фурье спектральное разрешение δf и спектральный диапазон F определяются в соответствии с формулами:

$$\delta f = \frac{1}{T}, F = \frac{1}{2\delta t}. \quad (1)$$

Фактический спектральный диапазон определяется параметрами генератора терагерцового излучения, передаточной функцией спектрометра, чувствительностью системы регистрации и длительностью пробных оптических импульсов. При этом необходимо, чтобы шаг сканирования был меньше определенного порогового значения, соответствующего максимальной частоте спектрометра.

Влияние временного диапазона сканирования на спектральное разрешение в ТГц диапазоне экспериментально исследовано на примере поглощения паров воды в атмосфере. Показано, что при сканировании терагерцового импульса в диапазоне 100 пс спектральное разрешение достигает 10 ГГц.

Фактический спектральный диапазон лежал в пределах от 0,1 до 2,5 ТГц при использовании для генерации полупроводника InAs (рис. 2). При нормировании спектральной амплитуды на минимальный уровень шума можно получить спектральный динамический диапазон, который достигает 500 на частотах около 1 ТГц.

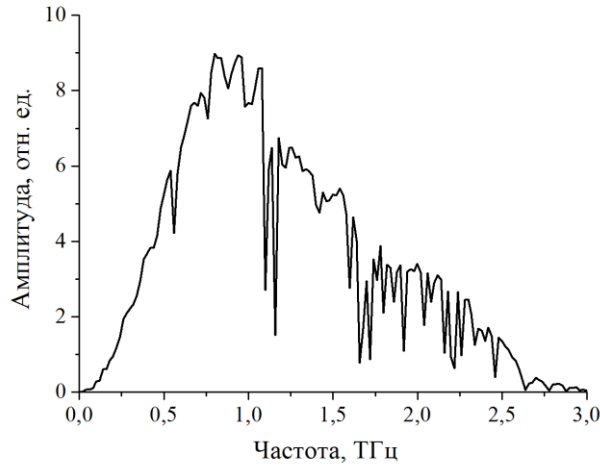


Рис. 2. Спектральная амплитуда типичного терагерцового импульса.

Следующий пункт параграфа посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию системы поляризационно-оптической регистрации терагерцового излучения. А также влиянию ее параметров, в частности, свойств нелинейных кристаллов, на спектральную чувствительность, разрешение и диапазон терагерцового спектрометра.

Теория поляризационно-оптической регистрации позволяет построить модельную зависимость измеряемого ТГц сигнала от функции $S(f, d)$, имеющей размерность длины и представляющей собой спектральную чувствительность. Данная функция существенно зависит от толщины нелинейного кристалла:

$$S(f, d) = \left[\frac{e^{-\alpha_T(f)d} + 1 - 2e^{-\frac{\alpha_T(f)d}{2}} \cos\left(\frac{2\pi f}{c}(n_T(f) - n_{o,sp})\right)}{\left(\frac{\alpha_T(f)}{2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi f}{c}(n_T(f) - n_{o,sp})\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где f — частота ТГц излучения, n_T — показатель преломления на терагерцовых частотах, α_T — коэффициент поглощения на терагерцовых частотах, d — толщина кристалла регистрации, n_o — показатель преломления на длине волны λ_o пробного импульса, $n_{o,sp} = n_o - \lambda_o \frac{\partial n_o}{\partial \lambda_o}$.

Для построения модельной чувствительности комплексный показатель преломления кристалла регистрации ZnTe выражается через комплексную диэлектрическую проницаемость, которая приближенно описывается суммой лоренцевских осцилляторов на терагерцовых частотах.

Значение показателя преломления кристалла ZnTe на длине волны пробного оптического излучения может быть получено из эмпирической формулы (3), где соответствующие параметры равны $a=4,57$, $b=2,8$, $c=378$ нм [5]:

$$n_o^2(\lambda_o) = a + \frac{b\lambda_o^2}{\lambda_o^2 - c^2}. \quad (3)$$

Рассчитанная по формуле (2) модельная спектральная чувствительность $S(f, d)$ при использовании кристаллов ZnTe различной толщины представлена на рис. 3. Применение кристаллов толщиной 2 мм может обеспечить большую чувствительность на высоких и низких частотах. При этом фазовое рассогласование и поглощение вблизи 1,5 ТГц понижает чувствительность в этой области при увеличении толщины. Кристаллы толщиной 0,5 мм обеспечивают равномерный спектральный отклик и более широкий спектральный диапазон.

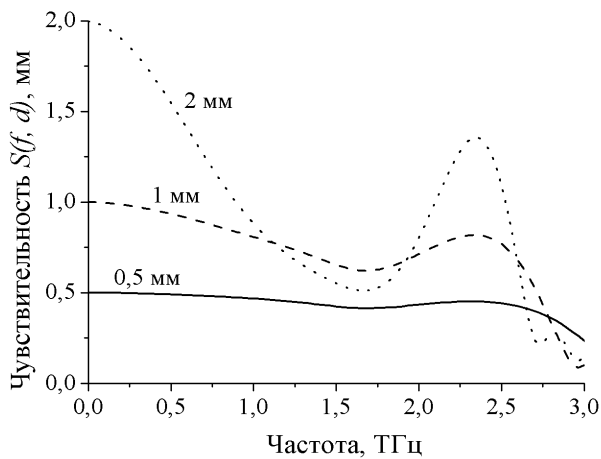


Рис. 3. Расчетная спектральная чувствительность $S(f, d)$ при использовании кристаллов регистрации ZnTe различной толщины.

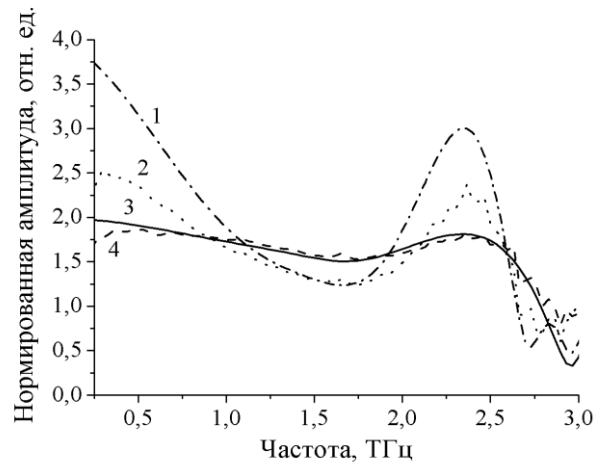


Рис. 4. Спектральная чувствительность системы регистрации при толщине кристалла ZnTe 2 мм (1,2) и 1 мм (3,4), нормированная на чувствительность при толщине 0,5 мм: 1, 3 — модельные расчеты; 2, 4 — экспериментальные результаты.

Проведены экспериментальные исследования спектров терагерцовых импульсов при использовании кристаллов регистрации различной толщины (0,5 мм, 1 мм и 2 мм). Непосредственное сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами невозможно, т. к. модель не учитывает спектр генерации и передаточную функцию спектрометра. Однако в эксперименте изменялась только толщина кристалла, поэтому отношения измеренных спектров равны отношениям соответствующих спектральных чувствительностей $S(f, d_1)/S(f, d_2)$, рассчитанных по формуле (1). Результаты экспериментов и модельных расчетов представлены на рис. 4. Модель качественно объясняет полученные экспериментальные зависимости, однако наблюдаются количественные расхождения. Для объяснения полученных расхождений в пункте 2.1.5 приводятся результаты экспериментальных исследований терагерцовых оптических свойств кристаллов регистрации ZnTe различной толщины.

Параграф 2.2 посвящен разработке, созданию и исследованию импульсного спектрометра на базе излучения основной гармоники волоконного лазера. Его

принципиальная схема во многом повторяет схему спектрометра на второй гармонике волоконного лазера (рис. 1). Основные отличия заключаются в использовании других материалов для генерации и регистрации терагерцового излучения, а также поляризационной оптики (полуволновых и четвертьволновых пластинок), акустооптического модулятора и фотодиодов, рассчитанных на длину волны 1550 нм.

В пункте 2.2.2 приводятся расчеты спектральной чувствительности системы регистрации ТГц излучения на длине волны 1550 нм, в которой применяются кристаллы GaAs (рис. 5). Диэлектрическая проницаемость рассчитывается, учитывая наличие линии фононного поглощения на частоте 8,056 ТГц. Значение показателя преломления кристалла GaAs на длине волны пробного оптического излучения вычисляется по эмпирической формуле (3) с параметрами $a=8,95$, $b=2,054$, $c=624$ нм [6]. Данные, использованные для расчетов, хорошо согласуются с представленными в пункте 2.2.3 результатами экспериментальных исследований оптических свойств кристаллов регистрации GaAs (коэффициент поглощения <1 см⁻¹, показатель преломления изображен на рис. 6).

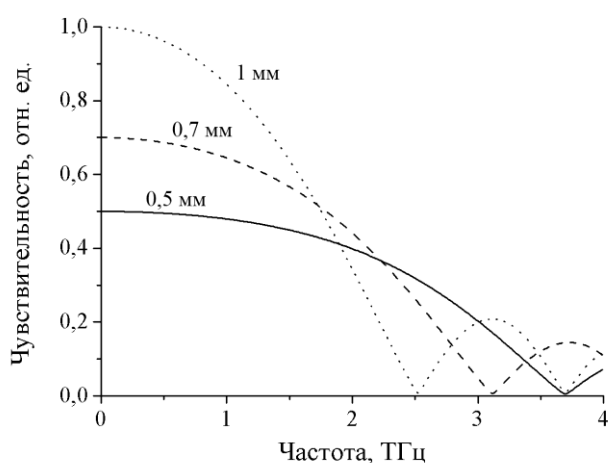


Рис. 5. Расчетная спектральная чувствительность $S(f, d)$ при различных толщинах кристалла регистрации GaAs.

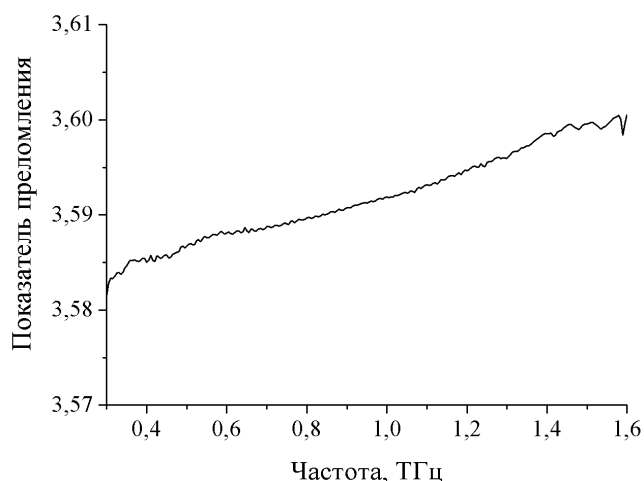


Рис. 6. Спектральная зависимость показателя преломления кристалла регистрации GaAs.

В **третьей главе** приводятся результаты экспериментальных исследований оптических свойств халькогенидных стекол и кристаллов семейства боратов в терагерцовой области спектра.

Параграф 3.1 посвящен методике расчета спектральных характеристик исследуемых материалов и описанию программно-алгоритмических средств, осуществляющих указанные расчеты.

Типичное измерение включает в себя регистрацию двух терагерцовых импульсов: сигнального и опорного (с исследуемым образцом и без него). Результатом измерения является набор из N временных отсчетов терагерцового импульса во временном диапазоне T с шагом Δt . Кроме того, сканирование каждого тера-

герцового импульса производится несколько раз для оценки случайных погрешностей. Преобразование Фурье позволяет получить их спектры. Перед непосредственным расчетом параметров материалов выполняется предварительная обработка последовательности отсчетов сигнального и опорного терагерцовых импульсов. Отношение спектра сигнального импульса к спектру опорного дает терагерцовый спектр пропускания исследуемого образца. Дальнейшие расчеты позволяют получить параметры материала (комплексный показатель преломления и диэлектрическую проницаемость), а также толщину образца [7].

При исследовании тонкого или слабопоглощающего образца необходима модель, учитывающая переотражения внутри него, для корректного расчета комплексного показателя преломления материала. В качестве такой модели рассматривается однородный образец с плоскопараллельными стенками, на поверхности которого и в объеме отсутствует рассеяние. При этом модельная функция пропускания образца определяется формулой:

$$T(f) = \frac{4n}{(n+1)^2} \exp\left(-i(n-1)\frac{2\pi fl}{c}\right) \frac{1}{1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \exp\left(-2in\frac{2\pi fl}{c}\right)}, \quad (4)$$

где n — комплексный показатель преломления, l — толщина исследуемого образца, f — частота, c — скорость света.

Применение итеративной процедуры, сравнивающей модельную функцию пропускания образца с измеренной экспериментально, позволяет получить комплексный показатель преломления.

С помощью специализированных программно-алгоритмических средств, реализующих приведенную методику, осуществляется:

- предобработка измеренных терагерцовых импульсов, а именно: выравнивание импульсов, оконная фильтрация во временной области, дополнение нулями, усреднение, коррекция фазы, расчет амплитудного и мощностного спектра, фазы, динамического диапазона и соотношения сигнал/шум;
- расчет спектральных характеристик пропускания, комплексного показателя преломления, поглощения и диэлектрической проницаемости исследуемого материала с учетом толщины образца и переотражений на границах воздух-образец;
- сохранение промежуточных результатов предобработки и спектральных характеристик исследуемых материалов.

В параграфе 3.2 приводятся результаты экспериментальных исследований оптических свойств кристаллов семейства боратов в терагерцовой области спектра, а именно: альфа- и бета-боратов бария, фторбората, трибората и тетрабората лития. По описанной в параграфе 3.1 методике получены спектральные зависимости их коэффициентов поглощения и показателей преломления.

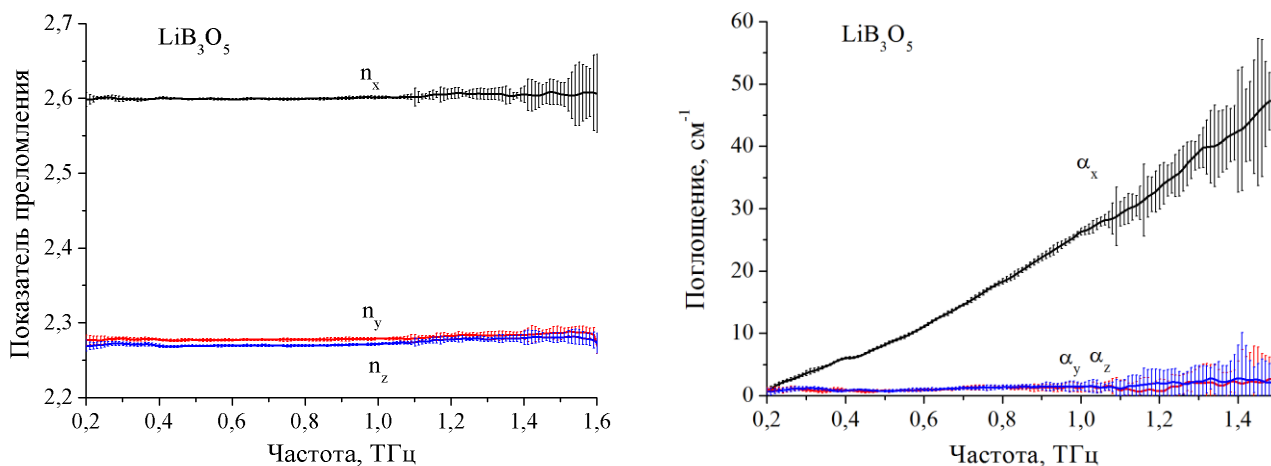


Рис. 7. Спектральная зависимость показателей преломления и коэффициентов поглощения вдоль осей x , y и z трибората лития.

Все рассмотренные кристаллы семейства боратов обладают значительным двулучепреломлением и дихроизмом в исследованном ТГц диапазоне, их поглощение повышается с ростом частоты. Эти свойства данных кристаллов могут быть использованы при создании элементов поляризационной оптики в терагерцовой области спектра. Единственными кристаллами, терагерцовые свойства которых резко отличаются от остальных, оказались кристаллы трибората лития (рис. 7). Они характеризуются более равномерной зависимостью показателя преломления от частоты, а также большим дихроизмом, который сочетается с небольшим поглощением вдоль осей y и z .

Параграф 3.3 содержит результаты экспериментальных исследований ряда халькогенидных стекол толщиной $0,5 \div 1,5$ мм (рис. 8). Полученные в эксперименте высокие значения показателя преломления при малом поглощении халькогенидных материалов представляют интерес для разработки ТГц дифракционных элементов, позволяя в 3–5 раз уменьшить глубину рельефа.

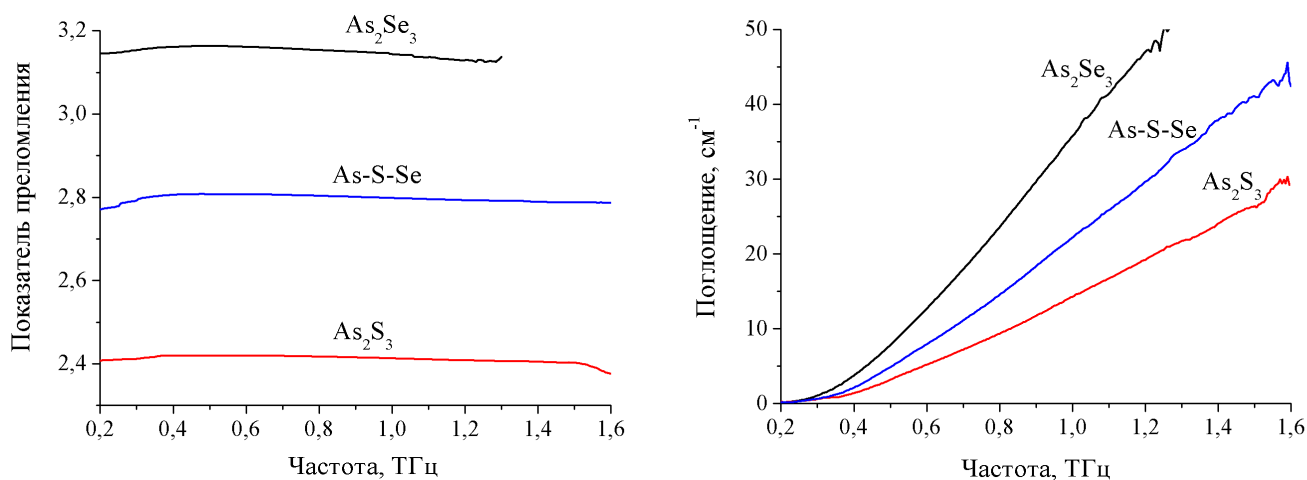


Рис. 8. Спектральная зависимость показателей преломления коэффициентов поглощения халькогенидных стекол.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны и созданы терагерцовые спектрометры на пропускание ТГц излучения на основе преобразования фемтосекундных лазерных импульсов (длина волны — 1550 нм, 775 нм, длительность — 100 фс, энергия — 1 нДж), а также программно-аппаратные средства управления спектрометром.
2. Экспериментально определены основные технические характеристики спектрометров: спектральный диапазон 0,1÷2,5 ТГц, динамический диапазон по напряженности ТГц поля до 500 и спектральное разрешение ~10 ГГц.
3. В соответствии с моделью поляризационно-оптической регистрации определены параметры спектрометров при использовании кристаллов регистрации ZnTe (GaAs) на длинах волн 775 нм (1550 нм). Теоретически и экспериментально показано, что при регистрации на длине волны 775 нм кристаллы ZnTe толщиной 2 мм обеспечивают большую чувствительность спектрометра (кроме частот вблизи 1,5 ТГц), а кристаллы меньшей толщины (1 мм и 0,5 мм) — более широкий спектральный диапазон и равномерный спектральный отклик.
4. Разработаны методики и созданы программно-алгоритмические средства расчета параметров исследуемых материалов в терагерцовой области спектра: коэффициента пропускания, коэффициента поглощения, комплексного показателя преломления и диэлектрической проницаемости.
5. Экспериментально исследованы параметры ряда нелинейно-оптических материалов (кристаллов класса боратов и халькогенидных стекол) в терагерцовой области спектра. Впервые экспериментально показано, что за счет значительного двулучепреломления $\Delta n/n \sim 0,16$ нелинейные кристаллы трибората лития можно использовать для создания элементов поляризационной оптики в терагерцовой области спектра.
6. Показано, что экспериментальные образцы терагерцовых спектрометров могут быть использованы для исследования оптических свойств различных материалов в ТГц диапазоне.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1]. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // Автометрия. — 2010. — Т. 46, № 3. — С. 110–117.
- [A2]. Мамрашев А. А., Потатуркин О. И. Исследование характеристик системы поляризационно-оптической регистрации импульсного терагерцового спектрометра // Автометрия. — 2011. — Т. 47, № 4. — С. 16–22.

- [A3]. Анцыгин В. Д., Конченко А. С., Корольков В. П. и др. Терагерцовый микро-растровый эмиттер на основе поперечного эффекта Дембера // Автометрия. — 2013. — Т. 49, № 2. — С. 92–97.
- [A4]. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Малогабаритный терагерцовый спектрометр // Патент на полезную модель № 105738 РФ. — 2011. — Бюл. №17.
- [A5]. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Потатуркин О. И. Перспективы создания и применения портативных терагерцовых систем диагностики // Тезисы совещания по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2008». — Новосибирск, 2008. — С. 91.
- [A6]. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Потатуркин О. И. Перспективы создания малогабаритных систем терагерцовой спектроскопии для исследования наноматериалов // Сборник тезисов докладов научно-технологических секций международного форума по нанотехнологиям «Rusnanotech'08». — Москва, 2008. — С. 212 – 214.
- [A7]. Анцыгин В. Д., Кобцев С. М., Кукарин С. В. и др. Особенности создания портативных широкополосных терагерцовых спектрометров // Тезисы докладов всероссийского семинара по физике миллиметровых и субмиллиметровых волн. — Нижний Новгород, 2009. — С. 66–67.
- [A8]. Мамрашев А. А. Автоматизация системы стробоскопической регистрации терагерцового излучения // Тезисы докладов 47 международной научной студенческой конференции, секция «Физика». — Новосибирск, 2009. — С. 14.
- [A9]. Antsygin V. D., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A., Potaturkin O. I. Compact terahertz spectrometers: principles and applications // Proceeding of ISMTII-2009. Saint-Petersburg, — 2009. — V. 2. — P. 351–355.
- [A10]. Antsygin V. D., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A. Table top terahertz spectrometer based on fiber laser // Proceedings of IASTED Conference on Automation, Control, and Information Technology: Optical Information Technology. — Novosibirsk, 2010. — P. 300–302.
- [A11]. Antsygin V.D., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A., Potaturkin O. I. Ferroelectric phase transition in lead germanate studied by terahertz spectroscopy // Digest Reports of International Symposium “Terahertz Radiation: Generation and Application.” — Novosibirsk, 2010. — P. 61.
- [A12]. Мамрашев А. А. Исследование характеристик терагерцового спектрометра // Материалы молодежной конкурс-конференции «Фотоника и оптические технологии 2011». — Новосибирск, 2011. — С. 83.
- [A13]. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Эффективность генерации импульсного терагерцового излучения в полупровод-

никах A_3B_5 // Тезисы докладов конференции «Фотоника-2011». — Новосибирск, 2011. — С. 40.

- [A14]. Antsygin V. D., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A., Potaturkin O. I. Efficiency of pulsed terahertz generation from the surface of A_3B_5 semiconductors // The International Symposium on Photonics and Optoelectronics. — Shanghai, 2012. — P. 1–3.
- [A15]. Конченко А. С., Корольков В. П., Николаев Н. А., Мамрашев А. А. Разработка методов юстировки микрооптической системы для генерации импульсов субмиллиметрового электромагнитного излучения // Сборник материалов VIII международных научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь-2012». — Новосибирск, 2012. — Т. 2. — С. 38
- [A16]. Antsygin V. D., Korolkov V. P., Konchenko A. S. et al. Terahertz properties of some semiconductors and nonlinear crystals studied by THz-TDS // 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications." — Moscow, 2012. — P. 88.
- [A17]. Zinovieva A. V., Stepina N. P., Deryabin A. S. et al. Detection of terahertz irradiation by GeSi quantum dot nanostructures // 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications." — Moscow, 2012. — P. 62.
- [A18]. Nemova E. F., Cherkasova O. P., Mamrashev A. A., Nikolaev N. A. Terahertz radiation as a potential diagnostic tool for medicine // 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications." — Moscow, 2012 — P. 134.
- [A19]. Мамрашев А.А., Наливайко В.И., Николаев Н.А. Оптические свойства халькогенидных стекол в терагерцовой области спектра // Книга тезисов XIX Национальной конференции по использованию синхротронного излучения. — Новосибирск, 2012. — С. 86.
- [A20]. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Широкополосная терагерцовая спектроскопия на основе взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с полупроводниками A_3B_5 // Сборник научных трудов всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. — Москва, 2012. — С. 13–14.
- [A21]. Немова Е.Ф, Мамрашев А.А., Николаев Н.А. Влияние терагерцового излучения на биополимеры: исследование методом спинового зонда // Научные труды VI Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине». — Санкт-Петербург, 2012. — С. 106.
- [A22]. Анцыгин В. Д., Астраханцева А. В., Мамрашев А. А. и др. Исследование оптических свойств кристаллов семейства боратов в терагерцовой области

спектра // Сборник трудов VII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012». — Санкт-Петербург, 2012. — С. 463–464.

[A23]. Анцыгин В. Д., Корольков В. П., Конченко А. С. и др. Многоэлементный генератор терагерцового излучения на основе поперечного фотоэффекта Дембера // Сборник научных трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. — Москва, 2013. — С. 89.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology // *Nature photonics*. — 2007. — Vol. 1, no. 2. — P. 97–105.
- [2]. Nuss M., Orenstein J. Terahertz time-domain spectroscopy // *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids* / ed. Grüner G. — Heidelberg: Springer Berlin, 1998. — Vol. 74. — P. 7–50.
- [3]. Wu Q., Zhang X.C. Free-space electro-optics sampling of mid-infrared pulses // *Applied Physics Letters*. — 1997. — Vol. 71, no. 10. — P. 1285–1286.
- [4]. Krotkus A. Semiconductors for terahertz photonics applications // *Journal of Physics D: Applied Physics* — 2010. — Vol. 43, no. 27. — P. 273001.
- [5]. Nazarov M. M., Shkurinov A. P, Tuchin V. V. et al. Modification of terahertz pulsed spectrometer to study biological samples // *Proceedings of SPIE*. — 2007. — Vol. 6535. — P. 65351J.
- [6]. Nagai M., Tanaka K., Ohtake H. et al. Generation and detection of terahertz radiation by electro-optical process in GaAs using 1.56 μm fiber laser pulses // *Applied Physics Letters*. — 2004. — Vol. 85, no. 18. — P. 3974.
- [7]. Duvillaret L., Garet F., Coutaz J.L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy // *Applied Optics*. — 1999. — Vol. 38, no. 2. — P. 409–415.