

На правах рукописи

Николаев Назар Александрович

**Исследование эффективности преобразования фемтосекундных импульсов  
волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое излучение для задач  
широкополосной спектроскопии**

01.04.05 – «Оптика»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении наук Институте автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН).

Научный руководитель: Анцыгин Валерий Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, ИАиЭ СО РАН, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты: Дмитриев Александр Капитонович, доктор физико-математических наук, профессор НГТУ, декан физико-технического факультета.

Смирнов Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, НГУ, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова.

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Терагерцовый (ТГц) диапазон частот электромагнитного спектра распространяется от 0,3 до 10 ТГц, что соответствует длинам волн от 1 мм до 30 мкм. В настоящее время освоение этого диапазона является одним из быстроразвивающихся направлений в физике, а терагерцовая спектроскопия становится высокоинформативным методом дистанционной диагностики при решении широкого класса научных и прикладных задач. В первую очередь в материаловедении: при исследовании свойств полупроводников и полупроводниковых наноструктур без нарушения их функционирования; при изучении динамики элементарных и коллективных возбуждений в этих материалах. В терагерцовом диапазоне лежат колебательные и вращательные моды многих важных органических молекул: аминокислот, полипептидов, белков, ДНК, РНК, что позволяет с помощью ТГц спектроскопии идентифицировать эти молекулы и исследовать их внутреннюю структуру. В частности, характерные терагерцовые линии поглощения присутствуют в спектрах взрывчатых и наркотических веществ, поэтому становится возможным их дистанционное обнаружение и идентификация. Поскольку терагерцовое излучение обладает малой энергией кванта ( $\sim 10$  мэВ) и в отличие от рентгена является неионизирующим, то, например, в медицине оно может быть использовано для неинвазивной диагностики ранних стадий онкологических новообразований, идентификации состояния тканей и их томографии.

Особое развитие ТГц спектроскопия получила с появлением и широким распространением фемтосекундных лазеров, излучение которых может применяться как для генерации, так и для регистрации импульсного терагерцового излучения. Импульсные методы терагерцовой спектроскопии имеют ряд преимуществ. Регистрация непосредственно импульса напряженности ТГц поля позволяет в одном эксперименте измерять не только амплитуду, но и фазу излучения, что при последующем определении свойств исследуемых материалов избавляет от использования соотношения Крамерса-Кронига. На базе импульсного спектрометра могут быть реализованы методы нестационарной спектроскопии, позволяющие исследовать кинетику процессов с субпикосекундным разрешением.

Разработка и создание малогабаритных систем эффективной генерации и регистрации широкополосного терагерцового излучения с использованием фемтосекундных волоконных лазеров создают предпосылки к широкому применению методов терагерцовой спектроскопии для решения научных и прикладных задач специалистами разного профиля на своем рабочем месте.

В качестве основы для создания терагерцовых спектрометров выбран волоконный эрбиевый лазер, генерирующий импульсы длительностью  $\sim 120$  фс на длине волны излучения 1550 нм, а также на  $\lambda = 775$  нм с блоком удвоения частоты.

**Целью работы** является исследование эффективности преобразования фемтосекундных импульсов волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое излучение в полупроводниковых и нелинейно-оптических материалах для применения в задачах широкополосной спектроскопии.

### **Основные задачи работы:**

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать и создать стенды для экспериментального исследования в идентичных условиях эффективности преобразования фемтосекундных импульсов первой и второй гармоник излучения эрбиевого волоконного лазера в терагерцовые импульсы в полупроводниковых и нелинейно-оптических материалах.

2. Разработать магнитную систему для исследования влияния магнитного поля на эффективность преобразования лазерных импульсов в терагерцовые в узкозонных полупроводниках InSb, InAs.
3. Исследовать эффективность и оценить вклады механизмов преобразования лазерного излучения в терагерцовое в кристаллах ZnTe, GaAs, InSb, InAs.
4. Оценить экспериментальные возможности разработанных систем на примере исследования терагерцовых свойств нелинейно-оптических кристаллов.

#### **Научная новизна работы:**

1. Экспериментально установлено, что без магнитного поля полупроводник *p*-InAs является наиболее эффективным преобразователем первой и второй гармоник излучения фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое по сравнению с полупроводниками и нелинейными кристаллами: GaAs, InSb и ZnTe.
2. Предложен способ повышения эффективности преобразования лазерного излучения в терагерцовое в узкозонных полупроводниках, основанный на применении аналога структуры Киттеля, состоящей из двух доменов со встречно направленной намагниченностью и создающей высококонцентрированное магнитное поле за счет полей рассеяния.
3. Установлено, что эффекты оптического выпрямления и поверхностного фотогальванического тока обладают одинаковой симметрией относительно азимутальной ориентации кристаллов полупроводников InAs, InSb.
4. Показано, что широкополосная терагерцовая спектроскопия позволяет исследовать прямым методом низкочастотный фоновый спектр кристаллов, в том числе его зависимость от температуры (Pb<sub>5</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>11</sub>) и состояния подрешетки (KTiOPO<sub>4</sub>).

#### **Практическая значимость работы:**

1. Предложенный способ создания магнитного поля может использоваться для повышения эффективности генерации терагерцового излучения в узкозонных полупроводниках.
2. Применение полупроводников *n*-InSb и *n*-InAs, помещенных в магнитное поле, для преобразования первой и второй гармоники излучения фемтосекундного волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое, позволяет создать широкополосные терагерцовые спектрометры для изучения оптических свойств нелинейных кристаллов.

#### **Защищаемые положения:**

1. Способ повышения эффективности преобразования лазерного излучения в терагерцовое, основанный на создании высококонцентрированного магнитного поля в узкозонных полупроводниках, обеспечивает увеличение мощности терагерцового излучения (до двух порядков) в полупроводниках InAs, InSb.
2. Полупроводники с электронной проводимостью, помещенные в магнитное поле, более эффективны для преобразования фемтосекундного излучения волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое, чем полупроводники с дырочной проводимостью, вследствие разности скорости движения носителей заряда и вкладов эффектов Дембера и оптического выпрямления.

3. Созданные на базе разработанных генераторов широкополосные терагерцовые спектрометры могут быть эффективно использованы для экспериментальных исследований нелинейных оптических кристаллов.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались автором на следующих конференциях: Молодежный конкурс-конференции «Фотоника и оптические технологии 2011» (Новосибирск, 2011); 49 международный научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2011); конференция «Фотоника-2011» (Новосибирск, 2011); VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО-2012 (Санкт-Петербург, 2012); II Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 2013); Сессия Совета РФФИ по направлению Фундаментальные исследования по приоритетному направлению «Безопасность и противодействие терроризму» (Москва, 2013); 6<sup>th</sup> International Symposium on Modern Problems of Laser Physics MPLP'2013 (Новосибирск, 2013).

**Личный вклад.** В рамках создания стендов терагерцовых спектрометров на базе первой и второй гармонике фемтосекундного излучения волоконного эрбиевого лазера автором разработаны системы генерации и доставки терагерцового излучения, а также оптоэлектронные блоки системы регистрации. Проведены экспериментальные исследования эффективности генерации терагерцового излучения в полупроводниках и нелинейно оптических кристаллах. На созданных стендах проведены экспериментальные исследования различных материалов, а также обработка полученных данных и определение их оптических свойств в терагерцовой области спектра.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, и 1 патент.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследований, определены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе**, составленной на основе обзора литературы, рассмотрены методы генерации широкополосного терагерцового излучения на основе преобразования фемтосекундных лазерных импульсов. Приведено описание основных эффектов генерации. Рассмотрены области применения генераторов построенных на основе соответствующих методов.

Для преобразования ультракоротких  $\sim 10^{-13}$  с импульсов волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое излучение можно выделить три основных подхода:

- оптическое выпрямление в нелинейных кристаллах;
- генерация на поверхности полупроводников;
- возбуждение импульсного фототока в фотопроводящей антенне.

Метод оптического выпрямления в нелинейных кристаллах основан на создании нестационарной поляризации импульсами света фемтосекундной длительности в нелинейно-оптических средах. Релаксация этих импульсов приводит к излучению широкополосного электромагнитного поля в терагерцовом диапазоне частот. Можно

показать, что напряженность поля и эффективность преобразования оптического импульса в терагерцовый в зависимости от частоты описывается формулами:

$$E_{ТГц}(\omega) = \frac{\chi^{(2)}\omega I(\omega)}{n(\omega)n_g} L_{gen} ,$$

$$\eta(\omega) = \frac{\chi^{(2)2}\omega^2 I(\omega)}{n(\omega)n_g^2} L_{gen} ,$$

где  $\chi^{(2)}$  – нелинейная оптическая восприимчивость второго порядка;  $n(\omega)$  – показатель преломления на терагерцовых частотах;  $n_g = n(\omega_0) - \omega_0 dn/d\omega$  – групповой показатель преломления на частоте накачки  $\omega_0$ ;  $L_{gen}$  – длина генерации, которая определяется наименьшей из следующих величин: глубины проникновения лазерного излучения и терагерцового поля в материал (величины, обратные коэффициентам поглощения на соответствующих частотах) и длины когерентности терагерцового поля и поля накачки  $L_{gen}$ :

$$L_{gen} = \frac{\pi c}{\omega(n(\omega) - n_g)} .$$

Как видно из выражений, напряженность генерируемого терагерцового поля определяется следующими параметрами материала: оптической нелинейностью второго порядка, поглощением на частоте излучения накачки и в терагерцовом спектре, длиной когерентности. Для достижения эффективного преобразования оптического излучения в терагерцовое необходимо, чтобы нелинейно-оптический материал обладал высокой нелинейностью, малым поглощением на лазерной и терагерцовой частотах, большой длиной когерентности (фазового синхронизма) и высокой лучевой прочностью. Эффективность оптического выпрямления зависит от ориентации кристалла.

Эффект оптического выпрямления может наблюдаться при генерации с поверхности полупроводников, при этом он обусловлен созданием нестационарной поляризации в объеме полупроводникового материала за счет нелинейной оптической восприимчивости второго порядка  $\chi^{(2)}$  и за счет нелинейной оптической восприимчивости третьего порядка  $\chi^{(3)}$ , проявляющейся в присутствии приповерхностного электрического поля:  $\chi^{(2)} = \chi^{(3)} E_{stray}$ , которая в свою очередь не зависит от ориентации кристалла.

Генерация терагерцового излучения с поверхности узкозонных полупроводников возможна при поглощении лазерного импульса. Из-за большого коэффициента поглощения  $\sim 10^5 \text{ см}^{-1}$  в приповерхностном слое создается большая концентрация фотоносителей. Импульсный ток  $J(t)$ , возникающий в результате разделения зарядов и их релаксации за времена порядка  $10^{-12}$  с, приводит к излучению электромагнитной волны терагерцового диапазона:

$$J = en(t)v(t) ,$$

$$E_{ТГц} \sim \frac{\partial J}{\partial t} = ev \frac{\partial n}{\partial t} + en \frac{\partial v}{\partial t} , \quad (1)$$

где  $J$  – возникающий фототок;  $e$ ,  $n$ ,  $v$  – соответственно, заряд, концентрация, скорость носителей заряда;  $E_{ТГц}$  – напряженность возникающего терагерцового поля.

Одним из способов разделения зарядов является использование внешнего поля. Он реализован в **фотопроводящих антеннах** или т.н. ключах Остона. В этом случае поле создается при приложении напряжения к электродам, нанесенным на поверхность полупроводниковой структуры. При этом в выражении (1) скорость носителей будет связана следующим образом:

$$\frac{d}{dt}v(t) = -\frac{1}{\tau}v(t) + \frac{e}{m}E(t)$$

$$E(t) = E_{\text{внеш}} - E_{\text{ТГц}}(t) ,$$

Для эффективного преобразования лазерного излучения в терагерцовое фотопроводящий материал должен обладать большой подвижностью заряда, высокой квантовой эффективностью фотовозбуждения, высокой лучевой и электрической прочностью и малым временем жизни носителей, которое обеспечивается специально созданными дефектами в структуре полупроводника.

Другим механизмом, обеспечивающим эффективное разделение зарядов, является фотогальванический эффект Дембера (**фотоэффект Дембера**). Благодаря высокой концентрации и наличию границы раздела сред фотовозбужденные носители зарядов диффундируют из приповерхностного слоя в объем полупроводника. За счет разности коэффициентов диффузии электронов и дырок происходит их разделение и возникновение ЭДС Дембера, что приводит к появлению эффективного диполя, излучающего электромагнитную волну терагерцового диапазона. В данном случае основной вклад вносится в первое слагаемое выражения (1) за счет изменения концентрации носителей заряда:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} ,$$

где  $z$  – направление вглубь от границы,  $D$  – коэффициент диффузии, подчиняющийся соотношению Эйнштейна  $D = kBT\mu$ . Как правило, материал выбирается таким, чтобы отношение подвижностей  $\mu_e/\mu_h$  электронов и дырок было максимальным. Его характерное значение для термализованных носителей зарядов в полупроводниках InAs и InSb составляет  $\sim 70$ .

Разделение фотоиндуцированных зарядов может осуществляться за счет **встроенного** или **приповерхностного электрического поля**, которое возникает за счет разницы уровней Ферми поверхностного состояния и в объеме вещества, приводящих к искривлению границ запрещенной зоны вблизи поверхности полупроводника. В данном случае механизм схож с приложением внешнего поля в фотопроводящих антеннах. Отличным будет направление вектора напряженности поля, который направлен параллельно поверхности полупроводника в случае антенн и перпендикулярен ей в случае приповерхностного поля. Характерным материалом, в котором генерация терагерцового излучения осуществляется за счет встроенного поля, является GaAs.

При облучении полупроводников фемтосекундными лазерными импульсами может присутствовать **поверхностный ток смещения**, который может давать вклад в генерацию терагерцового излучения. Этот эффект связан с тем, что электроны обладают изначальным моментом импульса, переданным от возбуждающего кванта лазерного излучения и совпадающим по направлению с поляризацией этого излучения. Релаксация этого импульса связана с диффузионным механизмом рассеяния фотовозбужденных электронов от поверхности границы раздела сред и с непараболичностью зоны проводимости. Известно, что этот эффект имеет связь с кристаллической ориентацией полупроводника.

Генерация терагерцового излучения с поверхности полупроводника обусловлена вкладом множества эффектов, которые по-разному проявляют себя в зависимости от условий эксперимента. В настоящее время численные моделирования отдельных эффектов дают хорошие результаты. Тем не менее, решение задачи, учитывающее согласованное влияние

вышеперечисленных эффектов, не найдено. Поэтому сохраняется актуальность проведения исследований и сравнения эффективности генерации терагерцового излучения в различных материалах.

**Вторая глава** посвящена разработке стенда для исследования эффективности генерации терагерцового излучения.

В первой части второй главы приводится общее описание экспериментальной установки: параметры лазерного излучения и общий принцип действия импульсного терагерцового спектрометра и его основных систем.

Основой спектрометра является эрбиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 1550 нм (775 нм с модулем удвоения частоты) и длительностью импульса ~ 120 фс. Его излучение используется для генерации и детектирования терагерцовых импульсов.

Выходной лазерный пучок делится на два: один направляется в систему генерации, а другой в систему регистрации. Система генерации состоит из полупроводника, установленного в конфигурации на отражение, либо нелинейно-оптического кристалла в конфигурации на пропускание. В зависимости от эксперимента может присутствовать магнитная система. Дополнительно в систему генерации включен модулятор лазерного излучения. Терагерцовое излучение из системы генерации коллимируется и фокусируется системой доставки терагерцового излучения, состоящей из внеосевых параболических зеркал, на кристалл детектор в системе регистрации. Система регистрации с помощью пробного лазерного импульса осуществляет преобразование напряженности электрического поля терагерцового импульса на кристалле детекторе в электрический сигнал, передаваемый в цифровом виде в компьютер. При этом сигнал пропорционален напряженности терагерцового поля.

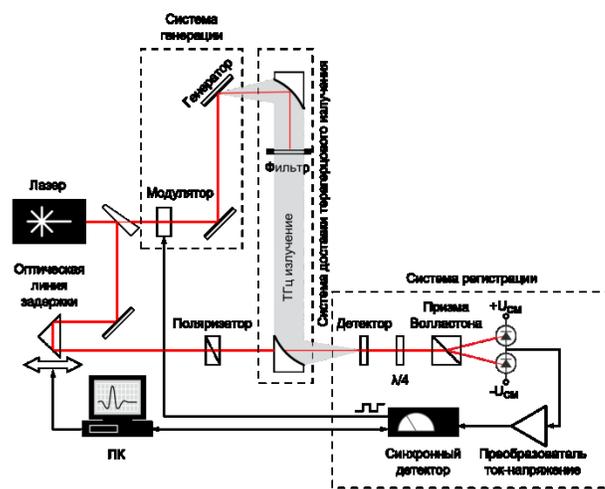


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Во второй части второй главы описаны используемые варианты системы генерации спектрометра: основанный на эффекте оптического выпрямления в нелинейном кристалле и основанный на методе поверхностной генерации в полупроводниках. Предложен способ повышающий эффективность преобразования лазерного излучения в терагерцовое в узкозонных полупроводниках, основанный на использовании аналога структуры Киттеля, состоящей из двух доменов со встречно направленной намагниченностью и создающей высококонцентрированное магнитное поле за счет полей рассеяния (Рис. 2.).

Максимальная эффективность использования магнитного поля наблюдается в случае, когда вектор индукции магнитного поля лежит на поверхности полупроводника и перпендикулярен плоскости падения возбуждающего лазерного излучения. На рис. 3. приведена конфигурация магнитного поля, создаваемого магнитами. Приближенное значение напряженности магнитного поля  $H_x$  от координат, при условии  $d \ll a$ ,  $b \sim a$ , можно описать следующим образом:

$$H_x(x, z) = M_S \{ \ln(a^2 + z^2 + 2ax + x^2) - 2 \ln(x^2 + z^2) + \ln(a^2 + z^2 - 2ax + x^2) \}, \quad (2)$$

где  $M_S$  – намагниченность материала. В идеальном случае в месте соединения магнитов в плоскости  $z = 0$  значение амплитуды поля  $H_x \rightarrow \infty$  при  $x \rightarrow 0$ . В реальности максимальное значение  $H_x$  ограничено многими факторами, в первую очередь округлением ребра магнита.

Оценка напряженности магнитного поля в области генерации производилась с помощью преобразователя Холла ПХЭ 606817А, обладающего чувствительностью 13,85 мкВ/Гс. С учетом усреднения по площади датчика ( $0,45 \times 0,15$  мм) измеренное распределение компоненты  $H_x$  (СГС) в плоскости  $y = 0, z = 1$  мм было использовано для расчёта по формуле (2) значения при  $z = 0,2$  мм, что соответствует толщине полупроводника генератора терагерцового излучения (Рис. 3).

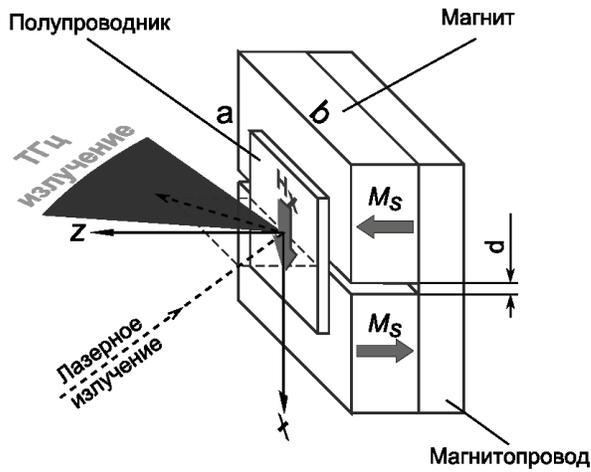


Рис. 2. Магнитная система генератора.

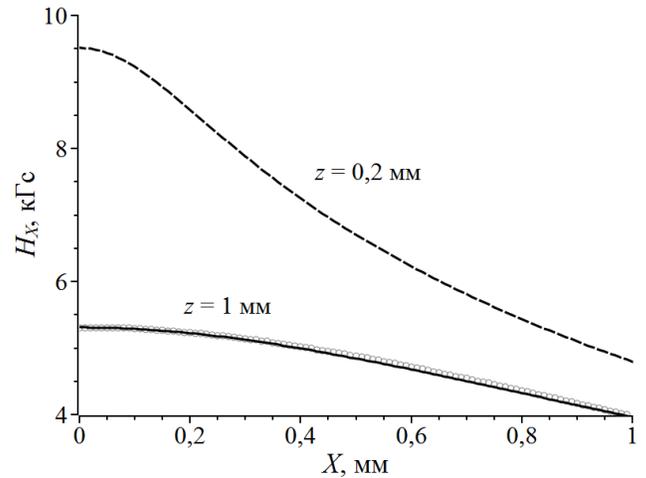


Рис. 3 Компонента  $H_x$  магнитного поля над плоскостью магнитов: окружности – экспериментальные данные ( $z = 1$  мм), сплошная линия – приближение по формуле (2); пунктирная линия – расчёт по формуле (2) при  $z = 0,2$ .

В третьей части второй главы представлено описание системы доставки терагерцового излучения, функциями которой является сбор и коллимация излучения из системы генерации и его фокусировка на кристалл детектор системы регистрации.

Так как размер области излучения терагерцовой волны сопоставим с её длиной, происходит дифракция низких частот в большой угол. В параграфе приведены расчёты частотно-зависимой передаточной функции, учитывающие диаметр излучаемого пятна и профиль магнитного поля на генераторе. Определен оптимальный диаметра фокусируемого на генератор лазерного пучка накачки, который составил  $\sim 1$  мм.

В четвертой части второй главы описана система регистрации, основанная на электрооптическом эффекте По克尔са в нелинейном кристалле и поляризационно-оптическом методе.

Электрическое поле терагерцового импульса вызывает изменение эллипсоида показателей преломления кристалла детектора, благодаря чему линейная поляризация пробного лазерного импульса, проходящего через нелинейный кристалл, становится эллиптической. Детектирование эллиптичности осуществляется посредством ее преобразования четвертьволновой пластинкой в линейную поляризацию с поворотом на некоторый угол относительно изначальной поляризации, соответствующей нулевой напряжённости электрического поля терагерцового импульса. Детектирование угла поворота

поляризации осуществляется с помощью призмы Волластона, разделяющей пробный лазерный пучок на два с ортогональными поляризациями, и регистрацией их интенсивностей фотодиодами. С выхода преобразователя ток—напряжение сигнал пропорциональный разности токов фотодиодов поступает на вход синхронного детектора, который выделяет его из шума на частоте модуляции лазерного пучка, идущего в систему генерации.

Сканирование всего терагерцового импульса производится в стробоскопическом режиме с помощью оптической линии задержки, которая представляет собой автоматизированный трансляционный столик с установленным на нем уголкового отражателем. Программное обеспечение, установленное на ПК, совершает процесс сканирования, пошагово изменяя положение линии задержки и сохраняя цифровой сигнал, передаваемый синхронным детектором.

**Третья глава** посвящена экспериментальному исследованию эффективности генерации терагерцового излучения в полупроводниках и нелинейно-оптических кристаллах. Глава разделена на три основные части.

В первой части третьей главы приводится описание исследуемых образцов (Таблица 1) и алгоритма проведения экспериментов.

Таблица 1. Полупроводниковые и нелинейно оптические материалы.

Мтериал	Ориентация	Ширина запрещенной зоны при 300 К [эВ]	Концентрация неосновных носителей заряда [см <sup>-3</sup> ]	Толщина [мкм]
n-InAs	(111)	0,35	$1,8 \times 10^{16}$	200
p-InAs	(111)		$2,7 \times 10^{16}$	200
n-InSb	(111)	0,17	$< 10^{14}$	200
p-InSb	(111)		$2,3 \times 10^{12}$	200
GaAs	(110)	1,42		700
ZnTe	(110)	2,25		1000

Для каждой длины волны лазерного излучения в системе генерации устанавливались полупроводники. Р-поляризованное лазерное излучение падает на поверхность полупроводника под углом 45° и фокусируется линзой в пятно диаметром ~ 1 мм. После настройки системы на максимальный сигнал, определялась зависимость амплитуды терагерцового поля от угла поворота поверхности генератора относительно нормали (т. н. азимутального угла). После установки азимутального угла, соответствующего максимуму генерации, исследовалась зависимость амплитуды напряженности терагерцового поля от интенсивности лазерного излучения, которая контролировалась полуволновой пластинкой и поляризатором. После сравнения всех типов полупроводников, в генераторе устанавливалась магнитная система, на которой закреплялись пластинки полупроводников с сохранением азимутальной ориентации, и повторно проводилось исследование зависимости амплитуды напряженности терагерцового поля от интенсивности лазерного излучения. После генератор заменялся на нелинейно-оптический кристалл, а схема перестраивалась на пропускание. При этом фокусировка лазерного излучения не менялась. Поворотом генератора вокруг нормали и вращением поляризации лазерного излучения сигнал системы регистрации настраивался на максимум. После снова производилось исследование зависимости амплитуды напряженности терагерцового поля от интенсивности лазерного излучения.

Интегральная мощность терагерцового излучения, приведенная в таблицах, соответствует сумме отсчетов соответствующих спектров в диапазоне 0,1 – 3 ТГц. Величина вкладов различных эффектов в генерацию терагерцового излучения при различной

ориентации азимутального угла  $\theta$  поверхности полупроводника оценивалась с помощью аппроксимации экспериментальных данных функцией

$$f(\theta) = a + b\cos(3\theta), \quad (2)$$

В таблицах и результатах приводится значение  $b/a$  в процентах. Погрешность лежит в пределах прямоугольников, отображаемых на графиках.

Во второй части третьей главы приведены результаты исследования эффективности преобразования фемтосекундного излучения второй гармоники ( $\lambda = 775$  нм) волоконного эрбиевого лазера в материале ZnTe методом оптического выпрямления и в полупроводниках InAs, GaAs, InSb методом поверхностной генерации (Таблица 2, Рис. 6).

Показано, что без магнитного поля полупроводник  $p$ -InAs является наиболее эффективным преобразователем при плотности энергии лазерного излучения до  $0,16$  мкДж/см<sup>2</sup>.

Таблица 2. Эффективности преобразования излучения второй гармоники ( $\lambda = 775$  нм) волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое в различных материалах.

Материал	Интегральная мощность терагерцового излучения [отн. ед.]	Нормализованная мощность [%]	Коэффициент увеличения мощности магнитным полем $B \sim 0,8$ Тл
n-InAs	7,391	48,4	
n-InAs (в магнитном поле)	72,338		9,8
p-InAs	15,277	100	
p-InAs (в магнитном поле)	29,519		1,9
GaAs	0,877	5,7	
ZnTe	0,456	3	
InSb	0,042	0,3	

Экспериментально определена зависимость амплитуды терагерцового излучения от плотности энергии лазерного до  $0,16$  мкДж/см<sup>2</sup> (Рис. 4). Показано, что поведение зависимости имеет линейный характер при генерации в материалах  $p$ -,  $n$ -InAs и ZnTe. При генерации в GaAs зависимость имеет характер насыщения. Основным механизмом генерации в данном материале является дрейф и разделение фотовозбуждённых носителей в поверхностном поле полупроводника, а насыщение, вероятно, происходит вследствие экранирования поверхностного поля рожденными носителями.

Экспериментально исследована зависимость амплитуды терагерцового излучения от азимутального угла поворота полупроводника InAs  $n$  и  $p$  типа, при плотности энергии лазерного  $0,16$  мкДж/см<sup>2</sup> (Рис. 5). Характер зависимости позволяет сделать вывод, что сумма вкладов в мощность терагерцового излучения эффектов, зависящих от азимутальной ориентации: оптического выпрямления в объеме материала и поверхностного фототока смещения, не превышает 19% от суммы вкладов эффектов, не зависящих от азимутальной ориентации: фотоэффекта Дембера и эффекта оптического выпрямления в приповерхностном поле. Подтверждено, что зависимость пропорциональна  $\cos(3\theta)$ , что свидетельствует о том, что эффекты оптического выпрямления и поверхностного фототока смещения обладают одинаковой симметрией относительно азимутальной ориентации кристаллов полупроводников.

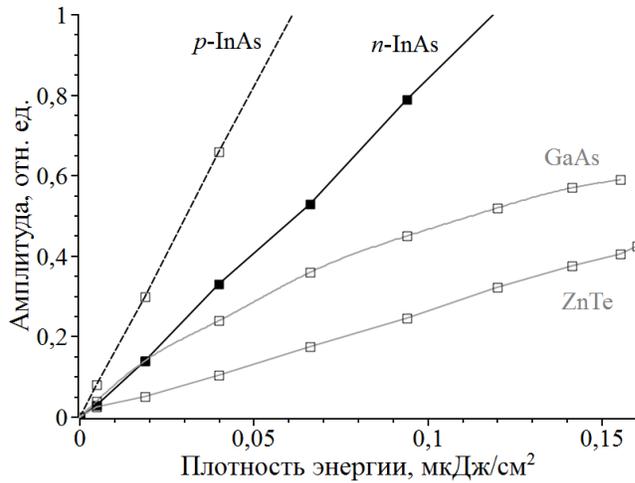


Рис. 4. Зависимость амплитуды терагерцового поля от плотности энергии второй гармоники лазерного излучения при генерации в различных материалах.

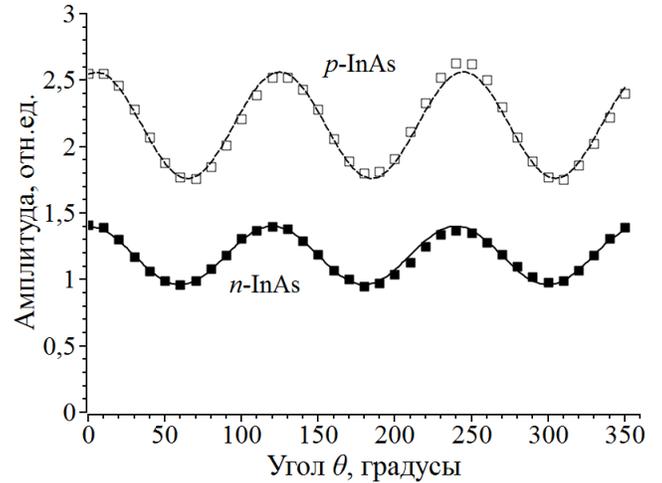


Рис. 5. Зависимость амплитуды терагерцового поля от азимутального угла поворота  $\theta$  полупроводника InAs  $n$  (нижние точки) и  $p$  (верхние точки) типа. Квадраты – экспериментальные данные, линия – аппроксимация функцией (2).

Показано, что магнитное поле индукций  $\sim 0,8$  Тл повышает эффективность генерации терагерцового излучения в полупроводнике InAs  $n$  типа в 9,8 раз и в 1,9 раза в полупроводнике  $p$  типа (Таблица 2, Рис. 7).

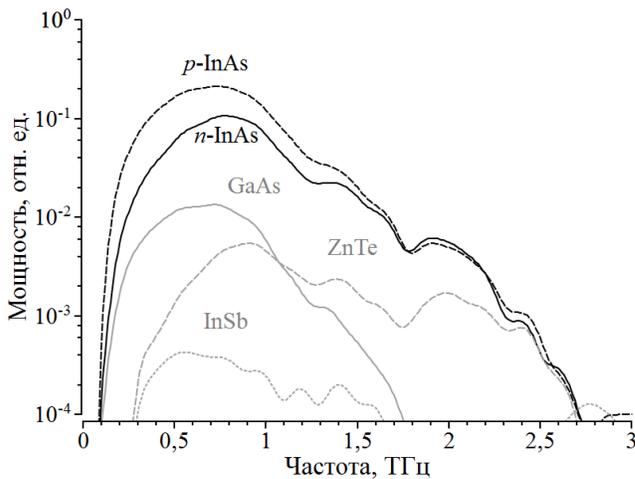


Рис. 6. Спектры мощности терагерцового излучения при преобразовании второй гармоники лазерного излучения в полупроводниках InAs, InSb и GaAs без магнитного поля и нелинейно-оптическом кристалле ZnTe.

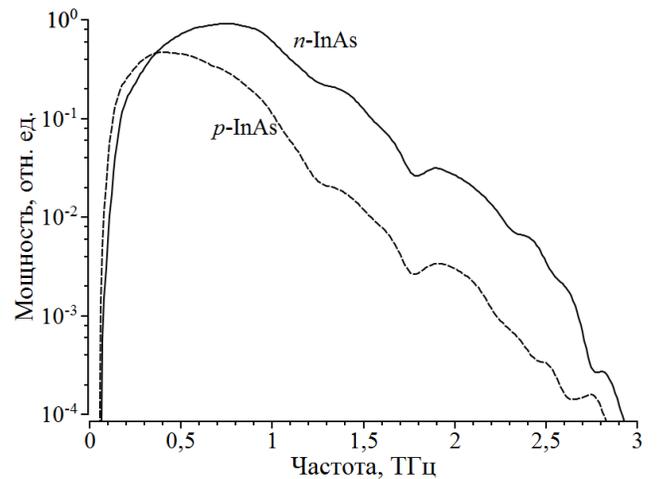


Рис. 7. Спектры мощности терагерцового излучения при преобразовании второй гармоники лазерного излучения в полупроводниках, помещенных в магнитное поле с индукцией  $\sim 0,8$  Тл. Ордината и обозначения совпадают с рис. 6.

В третьей части третьей главы приведены результаты исследования эффективности преобразования излучения первой гармоники ( $\lambda = 1550$  нм) волоконного эрбиевого лазера в материале GaAs методом оптического выпрямления в нелинейном кристалле и в полупроводниках InAs, InSb методом поверхностной генерации (Таблица 3, Рис. 10).

Показано, что без магнитного поля полупроводник  $p$ -InAs является наиболее эффективным преобразователем при плотности энергии лазерного излучения до  $0,2$  мкДж/см<sup>2</sup>.

Таблица 3. Эффективности преобразования излучения первой гармоники ( $\lambda = 1550$  нм) волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое в различных материалах.

Материал	Интегральная мощность терагерцового излучения [отн. ед.]	Нормализованная мощность [%]	Коэффициент увеличения мощности магнитным полем $B \sim 0,8$ Тл
n-InAs	0,621	44,5	
n-InAs (в магнитном поле)	5,58		9
p-InAs	1,395	100	
p-InAs (в магнитном поле)	12,234		8,8
n-InSb	0,093	6,7	
n-InSb (в магнитном поле)	20,436		218,6
p-InSb	0,077	5,5	
p-InSb (в магнитном поле)	10,75		139,6
GaAs	0,090	6,5	

Экспериментально определена зависимость амплитуды напряженности терагерцового поля от интенсивности лазерного до плотности энергии  $0,2$  мкДж/см<sup>2</sup>. Показано, что у полупроводников *p*-InAs, *p*-InSb, *n*-InSb поведение зависимости имеет характер близкий к линейному, а у *n*-InAs наблюдается незначительное насыщение. Основным механизмом генерации в данных материалах является фотоэффект Дембера, а насыщение, вероятно, происходит вследствие достижения предельно-возможного числа носителей в объеме материала при данной плотности энергии лазерного излучения.

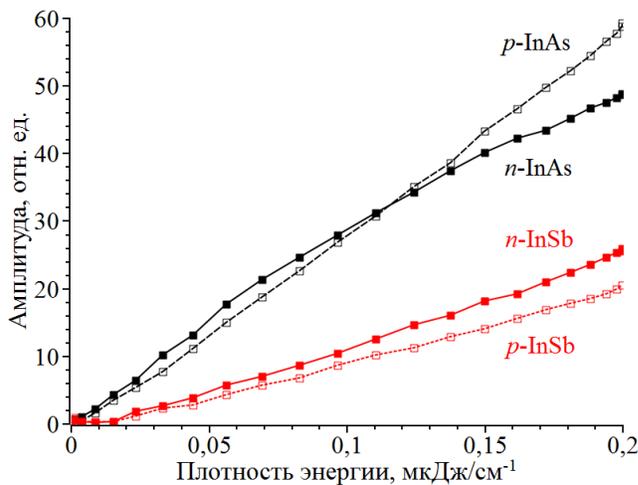


Рис. 8. Зависимость амплитуды терагерцового поля от плотности энергии первой гармоники лазерного излучения при генерации в различных материалах.

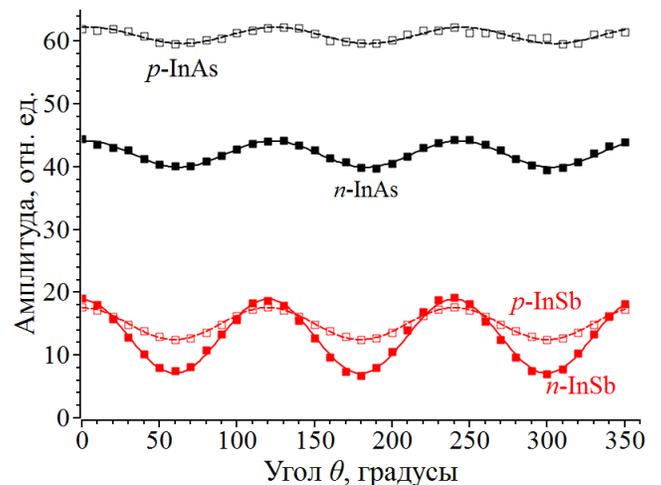


Рис. 9. Зависимость амплитуды терагерцового поля от азимутального угла поворота  $\theta$  полупроводников InAs и InSb *n* (заполненные элементы) и *p* (пустые элементы) типа. Квадраты – экспериментальные данные, линии – аппроксимация функцией (2).

Экспериментально исследована зависимость амплитуды напряженности терагерцового поля от азимутального угла поворота полупроводников InAs и InSb, *n* и *p* типа, при плотности энергии лазерного до  $0,2$  мкДж/см<sup>2</sup> (Рис. 9). Характер зависимости позволяет сделать вывод, что сумма вкладов в генерацию эффектов, зависящих от азимутальной ориентации: оптического выпрямления в объеме материала и поверхностного

Таблица 4. Отношение  $b/a$  функции (2).

Полупроводник	$b/a$ [%]
<i>n</i> -InAs	5
<i>p</i> -InAs	2
<i>n</i> -InSb	45
<i>p</i> -InSb	17

фототока смещения; сопоставима с суммой вкладов эффектов, не зависящих от азимутальной ориентации: фотоэффекта Дембера и эффекта оптического выпрямления в приповерхностном поле полупроводника для полупроводников InSb, и мала для полупроводников InAs (Таблица 4). Подтверждено, что зависимость пропорциональна  $\cos(3\theta)$ , как и в случае генерации на второй гармонике лазерного излучения.

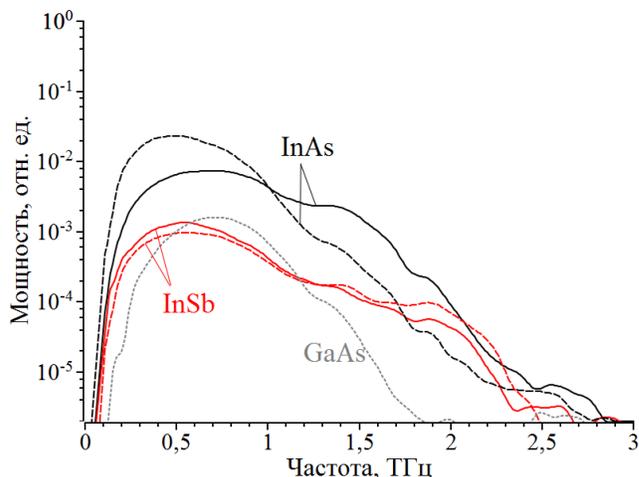


Рис. 10. Спектры мощности терагерцового излучения при преобразовании первой гармоники лазерного излучения в полупроводниках InAs и InSb без магнитного поля и нелинейно-оптическом кристалле GaAs. Для полупроводников InAs и InSb: сплошная линия – *n* тип, штриховая – *p* тип.

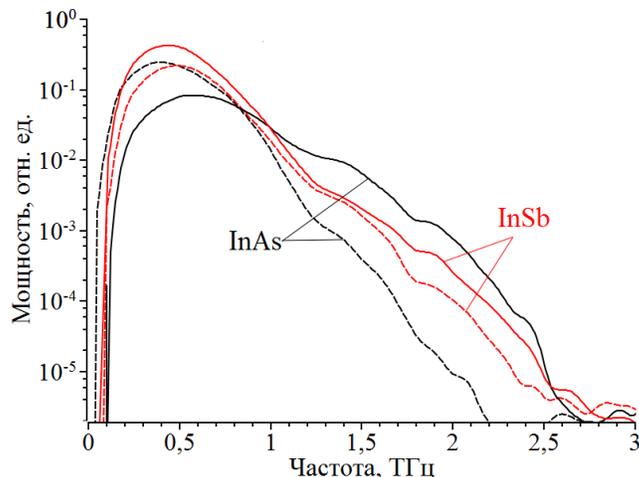


Рис. 11. Спектры мощности терагерцового излучения при преобразовании первой гармоники лазерного излучения в полупроводниках, помещенных в магнитное поле с индукцией  $\sim 0,8$  Тл. Ордината и обозначения совпадают с рис. 10.

Показано, что магнитное поле индукций  $\sim 0,8$  Тл повышает эффективность генерации терагерцового излучения в полупроводниках InAs приблизительно на порядок, а в полупроводниках InSb приблизительно на два порядка (Таблица 3, Рис. 11).

В четвертой части третьей главы приведены обобщающие выводы, предложены дальнейшие способы повышения мощности и эффективности преобразования фемтосекундного излучения волоконного эрбиевого лазера в терагерцовое.

**Четвертая глава** диссертационной работы посвящена оценке экспериментальных возможностей разработанных систем на примере исследования терагерцовых свойств нелинейно оптических кристаллов германата свинца ( $Pb_5Ge_3O_{11}$ ) и калий-титанил фосфата ( $KTiOPO_4$ ) в терагерцовом диапазоне частот.

В первой части четвертой главы описаны алгоритмы проведения эксперимента и методики обработки экспериментальных данных. Описаны модификации стенда для проведения исследований при температуре жидкого азота с использованием заливного криостата и для проведения исследования при температуре до 200 градусов Цельсия с использованием нагревательной ячейки.

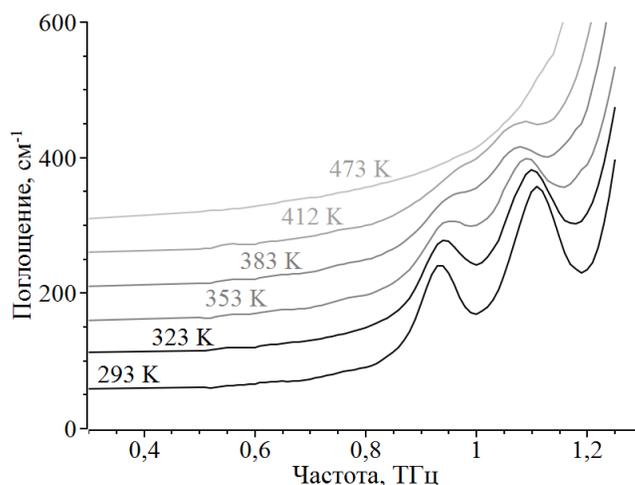


Рис. 12. Трансформация поглощения в кристаллах  $Pb_5Ge_3O_{11}$  с ростом температуры. Кривые смещены относительно друг друга на  $50\text{ см}^{-1}$ .

Во второй части четвертой главы приведены результаты исследования спектра фононного поглощения в германате свинца в зависимости от температуры. На рис. 12 представлены результаты этих измерений, из которых виден сдвиг по частоте и уширение фононных мод с ростом температуры кристалла и их исчезновение при приближении к фазовому переходу второго рода.

В третьей части четвертой главы приведены результаты исследования кристаллов калий-титанил фосфата с различной проводимостью при комнатной температуре (Рис. 13) и температуре жидкого азота (Рис. 14). Установлено, что поглощение на частоте 1,74 слабо зависит от температуры и проводимости кристаллов, в отличие от поглощения на 2,73 ТГц, связанного с фононной модой калиевой подрешетки.

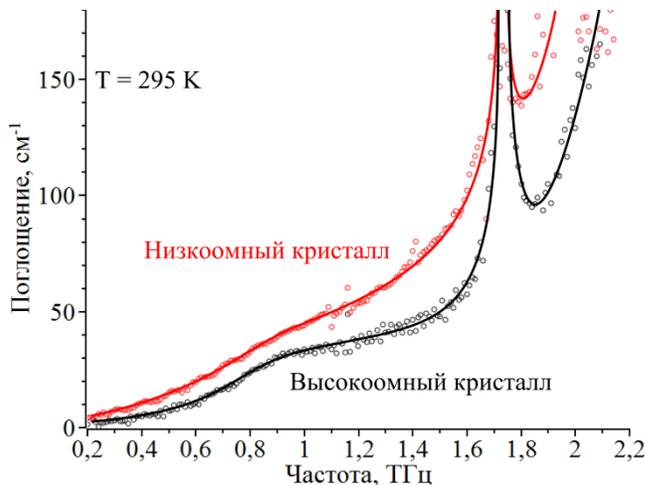


Рис. 13. Спектры поглощения кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  по оси  $c$  при комнатной температуре. Сплошная линия – результат сглаживания экспериментальных данных скользящим средним.

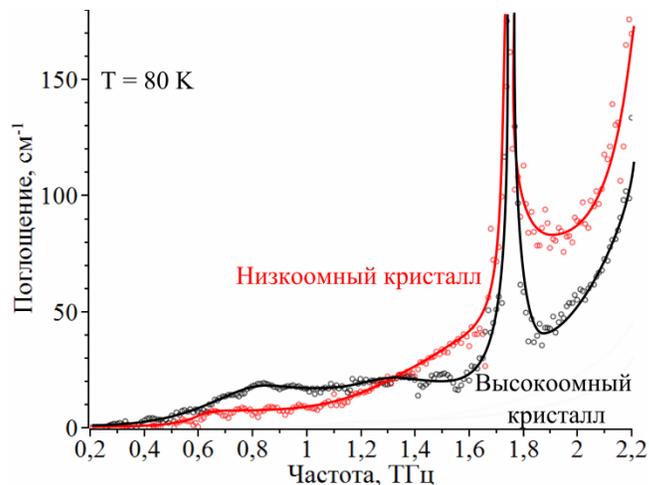


Рис. 14. Спектры поглощения кристаллов  $\text{KTiOPO}_4$  по оси  $c$  при температуре жидкого азота. Сплошная линия – результат сглаживания экспериментальных данных скользящим средним.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы:

1. Предложен способ повышения эффективности преобразования лазерного излучения в терагерцовое в узкозонных полупроводниках, основанный на применении аналога структуры Киттеля, состоящей из двух доменов со встречно направленной намагниченностью и создающей высококонцентрированное магнитное поле в малой области пространства за счет полей рассеяния.
2. Показано, что без магнитного поля полупроводник  $p\text{-InAs}$  является наиболее эффективным преобразователем первой и второй гармоники излучения фемтосекундного эрбиевого лазера в терагерцовое, в сравнении с полупроводниками и нелинейными кристаллами: GaAs, InSb и ZnTe; при плотности энергии лазерного излучения до  $0,2 \text{ мкДж/см}^2$  для первой гармоники и до  $0,16 \text{ мкДж/см}^2$  для второй.
3. Установлено, что эффекты оптического выпрямления и поверхностного фототока смещения обладают одинаковой симметрией относительно азимутальной ориентации кристаллов полупроводников InAs, InSb.
4. Показано, что магнитное поле индукцией  $\sim 0,8 \text{ Тл}$  обеспечивает повышение эффективности генерации терагерцового излучения (до двух порядков по мощности) в полупроводниках InAs, InSb.

5. Показано, что в магнитном поле индуктивностью  $\sim 0,8$  Тл полупроводник  $n$ -InSb является наиболее эффективным материалом для преобразования излучения первой гармоники волоконного лазера в терагерцовое, а  $n$ -InAs для преобразования второй.
6. Методами широкополосной спектроскопии в частотном диапазоне 0,4–1,2 ТГц экспериментально исследована зависимость изменения спектра поглощения кристаллов германата свинца ( $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$ ) с ростом температуры. Показано уширение и сдвиг по частоте фононных мод кристалла с ростом температуры и их исчезновение при приближении к фазовому переходу второго рода.
7. Методами широкополосной терагерцовой спектроскопии экспериментально исследованы свойства нелинейных кристаллов калий-титанил фосфата ( $\text{KTiOPO}_4$ ) в диапазоне 0,2–2,2 ТГц. Установлено, что поглощение на частоте 1,74 слабо зависит от температуры и проводимости кристаллов, в отличие от поглощения на 2,73 ТГц, связанного с фононной модой калиевой подрешетки.

**Результаты** работы изложены в следующих публикациях:

1. В. Д. Анцыгин, А. А. Мамрашев, Н. А. Николаев, О. И. Потатуркин. Малогабаритный терагерцовый спектрометр с использованием второй гармоники фемтосекундного волоконного лазера // *Автометрия*. 2010. Т. 46. № 3. С. 110–117.
2. В. Д. Анцыгин, Н. А. Николаев. Об эффективности генерации терагерцового излучения в кристаллах GaAs, InAs и InSb // *Автометрия*. 2011. Т. 47. № 4. С. 23–30.
3. Мамрашев А.А., Наливайко В.И., Николаев Н.А. Оптические свойства халькогенидных стекол в терагерцовой области спектра // *Известия РАН. Серия физическая*. 2013. Т. 76. № 3.
4. Antsygin V. D., Mamrashev A.A., Nikolaev N.A., Potaturkin O.I., Bekker T.B., Solntsev V. P. Optical properties of borate crystals in terahertz region // *Optics Communications*. 2013. V. 309. P. 333–337.
5. В. Д. Анцыгин, А. А. Мамрашев, Н. А. Николаев, О. И. Потатуркин. Малогабаритный терагерцовый спектрометр // Патент на полезную модель № 105738 РФ. Приоритет: заяв. 11.01.2011, опубл. 20.06.2011 Бюл. №17.
6. Анцыгин В. Д., Кобцев С. М., Кукарин С. В., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О.И. Особенности создания портативных широкополосных терагерцовых спектрометров // Тезисы докладов всероссийского семинара по физике миллиметровых и субмиллиметровых волн. Нижний Новгород, 2009. С. 66–67.
7. V. D. Antsygin, A. A. Mamrashev, N. A. Nikolaev, O. I. Potaturkin. Compact terahertz spectrometers: principles and applications // *Proceeding of ISMTII-2009*, June, 29<sup>th</sup> — July, 2<sup>nd</sup>, 2009, Saint-Petersburg, Russia, — V. 2 — P. 351—355.
8. Анцыгин В. Д., Мамрашев А. А., Николаев Н. А., Потатуркин О. И. Терагерцовая спектроскопия на базе двухканальной волоконной лазерной системы // Тезисы российского семинара по волоконным лазерам. Ульяновск, 19 – 22 апреля 2010.
9. V. D. Antsygin, A. A. Mamrashev, N. A. Nikolaev. Table top terahertz spectrometer based on fiber laser // *Proceedings of IASTED Conference on Automation, Control, and Information Technology: Optical Information Technology*, June 15–18, 2010, Novosibirsk, Russia. P. 300–302.
10. V.D. Antsygin, A. A. Mamrashev, N. A. Nikolaev, O. I. Potaturkin. Ferroelectric phase transition in lead germanate studied by terahertz spectroscopy // *Digest Reports of*

International Symposium “Terahertz Radiation: Generation and Application”, July 26–29, 2010, Novosibirsk, Russia, P.61.

11. Н. А. Николаев. Исследование генерации терагерцового излучения в полупроводнике // Материалы молодежной конкурс-конференции «Фотоника и оптические технологии 2011», 9–11 февраля 2011, Новосибирск, Россия, С. 86.
12. Н. А. Николаев. Генерация терагерцового излучения в полупроводнике под действием фемтосекундных лазерных импульсов // Материалы 49 международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», секция «Физика», 16–20 апреля 2011, Новосибирск, Россия, С. 125.
13. В. Д. Анцыгин, А. А. Мамрашев, Н. А. Николаев, О. И. Потатуркин. Эффективность генерации импульсного терагерцового излучения в полупроводниках  $A_3B_5$  // Тезисы докладов конференции «Фотоника-2011», 22–26 августа 2011, Новосибирск, Россия.
14. 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.
15. V. D. Antsygin, A. A. Mamrashev, N. A. Nikolaev, O. I. Potaturkin Study of potassium titanyl phosphate nonlinear optical crystals by the method of wideband terahertz spectroscopy // Technical digest of The sixth international symposium Modern Problems Of Laser Physics MPLP 2013, August 25—31, 2013, Novosibirsk, Russia, P.120.