



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт Физико-технологический институт
наименование института (полностью)
Кафедра наноэлектроники
наименование кафедры (полностью)

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Зам. заведующего
кафедрой

Директор
института

подпись
Юрасов Алексей Николаевич
Фамилия Имя Отчество

подпись
Шамин Роман Вячеславович
Фамилия Имя Отчество

« ____ » _____ 20 ____ г.

« ____ » _____ 20 ____ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы бакалавра

Обучающийся Зайнуллин Фархад Алмазович
Фамилия Имя Отчество
Шифр 17Т0747
Направление
подготовки 11.03.04 электроника и наноэлектроника
индекс направления наименование направления
Группа ЭЭБО-01-16

1. Тема выпускной квалификационной работы:
Компьютерная модель процессов излучения в фотопроводящей спиральной
сверхрешетчатой антенне с учетом брэгговской решетки

2. Цель и задачи выпускной квалификационной работы

Цель работы: смоделировать процесс излучения терагерцового импульса
фотопроводящей антенны

Задачи работы:

1. Произвести обзор литературы по теме ТГц-ФПА;
2. разработать компьютерную модель фотопроводящей антенны;
3. Сравнить с экспериментальными данными и обсудить результаты.
3. Этапы выпускной квалификационной работы:

№ этапа	Содержание этапа выпускной квалификационной работы	Результат выполнения этапа ВКР	Срок выполнения
1	Проработка литературы	Обзор литературы	20.04 – 27.04
2	Создание компьютерной модели	Модель в среде COMSOL	28.04 – 05.05
3	Проведение и интерпретация компьютерного моделирования	Таблицы, графики	06.05 – 24.05
4	Подготовка пояснительной записки и доклада	Пояснительная записка и презентация	25.05 - 06.06

4. Содержание экономического раздела

4.1 Организация работ



4.2 Расчет стоимости проведения работ

5. Перечень разрабатываемых документов и графических материалов

5.1 Конструкция переключателя – 1 слайд

5.2 Результаты моделирования – 4 слайда

5.3 Итоги – 1 слайд

Функциональные обязанности	Должность в Университете	Фамилия Имя Отчество	Подпись
Руководитель ВКР	к.ф.-м.н., с.н.с.	Буряков Арсений Михайлович	
Консультант по организационно-экономической части	ст. преподаватель кафедры «бизнес-технологий и управления»	Дудина Елена Александровна	

Задание выдал
Руководитель ВКР: _____

подпись

« _____ » _____ 20__ г.

Задание принял к исполнению
Обучающийся: _____

подпись

« _____ » _____ 20__ г.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»

РТУ МИРЭА

Физико-технологический институт

Кафедра наноэлектроники

РАБОТА ДОПУЩЕНА К ЗАЩИТЕ

Зам. заведующего
кафедрой Юрасов Алексей Николаевич
Ф.И.О.

«___» _____ 20__ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

по направлению подготовки бакалавров

11.03.04

код

Электроника и наноэлектроника

наименование направления подготовки

На тему: Компьютерная модель процессов излучения в фотопроводящей
спиральной сверхрешетчатой антенне с учетом брэгговской
решетки

Обучающийся


подпись

Зайнуллин Фархад Алмазович

Фамилия, имя, отчество

шифр

17Т0747

группа

ЭЭБО-01-16

Руководитель
работы


подпись

к.ф.-м.н., с.н.с.

ученая степень, ученое звание,

должность

Буряков Арсений
Михайлович

Фамилия, имя,

отчество

Консультант по
организационно-
экономической
части


подпись

ст. преподаватель
кафедры «бизнес-
технологий и
управления»

Дудина Елена
Александровна

Фамилия, имя,

отчество

Москва 2020 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 73 с., 46 рис., 6 табл., и 96 источников информации.

Ключевые слова: гетероструктура, сверхрешетка, брэгговская решетка, Арсенид индия галлия InGaAs, Арсенид индия алюминия InAlAs, Арсенид индия InAs, терагерцевое излучение, терагерцевая спектроскопия временного разрешения, фотопроводящая антенна.

Актуальность данного исследования заключается в необходимости решения таких проблем как низкая выходная мощность излучения, малое отношение сигнал/шум, узкий спектр излучения и низкая эффективность оптико-терагерцового преобразования у существующих антенн. В данной работе предложен такой способ как моделирование процессов излучения для теоретического исследования выходных характеристик. Объектом исследования является сверхрешетчатая фотопроводящая антенна с брэгговской решеткой.

Цель работы заключается в создании эффективного инструмента для теоретического расчета параметров терагерцового излучения на примере фотопроводящей антенны с брэгговской решеткой.

Новизна работы состоит в том, что антенна с брэгговской решеткой в структуре впервые исследовалась методом компьютерного моделирования

Часть результатов выпускной квалификационной работы были представлены на всероссийском научном конкурсе РТУ МИРЭА среди учащихся старших классов и студентов проекта «Сотвори будущее».

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании института общей физики российской академии наук ИОФ РАН.

ОГЛАВЛЕНИЕ

РЕФЕРАТ	4
Условные обозначения	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ФОТОПРОВОДЯЩАЯ АНТЕННА.....	10
1.1. Терагерцовое излучение.....	10
1.2. Способы получения терагерцового излучения.....	12
1.3. Механизмы оптико- терагерцового преобразования	14
1.3.1. Фотопроводящая терагерцовая антенна.....	14
1.3.2. Встроенное поле в полупроводниках	18
1.3.3. Фотоэффект Дембера	19
1.4. Сверхрешчатые структуры. Брэгговская решетка.....	21
1.4.1. Сверхрешчатые структуры	21
1.4.2. Брэгговская решетка.....	24
1.5. Методы исследования ФПА. Спектроскопия во временной области THz-TDS (TDS- time-domain spectroscopy). Моделирование процессов излучения.	26
1.5.1. Спектроскопия во временной области THz-TDS	27
1.5.1.1. Методы усиления сильнозашумленных и слабых сигналов. Стробируемый интегратор. Фазочувствительный усилитель.	30
1.5.1.1.1. Фазочувствительный усилитель	30
1.5.1.1.2. Стробируемый интегратор	34
1.5.2. Моделирование процессов излучения.....	36

2. Постановка задачи.....	39
3. Исследование влияния брэгговской решетки на поглощение структурой. Расчет излучения терагерцового импульса. Исследование ФПА со сверхрешетчатой структурой и брэгговской решеткой методом THz-TDS....	40
3.1. Исследование влияния брэгговской решетки на поглощение структурой. 41	
3.2. Расчет излучения терагерцового импульса, излучаемого фотопроводящей антенной.....	43
3.3. Исследование ФПА со сверхрешетчатой структурой и брэгговской решеткой методом спектроскопии во временной области (метод “зонда- накачки”)	55
4. Выводы	60
5. Экономический раздел.....	61
5.1. Разработка бизнес-плана проекта	61
5.1.1. Описание созданного продукта (товара).....	61
5.1.2. Анализ рынка сбыта	62
5.1.3. Конкурентоспособность созданного продукта (товара).....	62
5.1.4. План маркетинга.....	62
5.2. Организация и планирование работ по теме.....	62
5.2.1. Организация работ.....	63
5.2.2. График проведения работ	65
5.3. Расчёт стоимости проведения работ.....	66
5.4. Оценка экономической целесообразности проведения работ по теме ..	70
6. Список литературы	71

Условные обозначения

ФПА – фотопроводящие терагерцевые антенны.

THz-TDS – терагерцевая спектроскопия временного разрешения.

InGaAs- арсенид галлия индия $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$

InAlAs- арсенид алюминия индия $\text{In}_{0.48}\text{Al}_{0.52}\text{As}$

LT-GaAs- выращенный при низкой температуре арсенид галлия

ВВЕДЕНИЕ

Полупроводники III-V группы, применявшиеся в терагерцевых устройствах последние десятилетия, уже достаточно изучены, и практически достигли своего предела. В настоящее время требуется разработка новых высокоэффективных источников и детекторов излучения терагерцевого диапазона. Актуальным направлением исследований в этой области является создание гетероструктур на их основе. Особое внимание среди таких структур заслуживает сверхрешетка с брэгговским отражателем.

У полупроводников III-V групп могут сильно различаться значения ширины запрещенной зоны, мобильности носителей заряда и концентрации носителей зарядов при 300 К, а параметры решетки не отличаются более чем на 7%. Благодаря этому возможно создание фотопроводящих антенн на основе сверхрешетчатых структур с лучшими характеристиками по сравнению с антеннами на основе простых пленок. Сверхрешетка на основе InGaAs/InAs/InAlAs – гетероструктура, обладающая уникальными электронными свойствами и совмещающая в себе преимущества входящих в нее полупроводников.

Так как у InGaAs и InAlAs разные коэффициенты преломления, то с их использованием можно организовать брэгговский отражатель, интегрированный в ФПА на основе сверхрешетчатой структуры для увеличения поглощения и, в свою очередь, мощность ТГц излучения.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена исследованию генерации терагерцевого излучения в спиральной сверхрешетчатой фотопроводящей антенны на основе InGaAs/InAs/InAlAs с брэгговской решеткой.

Важная задача, требующая решения, заключается в определении влияния брэгговской решетки на поглощение в антенне. Вторая по значимости задача – произвести расчёт переходного тока при возбуждении оптической накачкой

в сверхрешетчатой фотопроводящей антенне с брэгговской решеткой с последующей оценкой параметров терагерцового излучения. Также важно исследование параметры детектирования терагерцового излучения в спиральной ФПА на основе сверхрешетки с отражателем Брэгга и сравнение с расчётом.

1. ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ФОТОПРОВОДЯЩАЯ АНТЕННА.

1.1. Терагерцовое излучение

Терагерцовое излучение – электромагнитное излучение, частота которого лежит в диапазоне от 0.1 до 30 ТГц (длины волн лежат в диапазоне от 0.01 до 3 мм, поэтому его еще называют субмиллиметровым излучением).

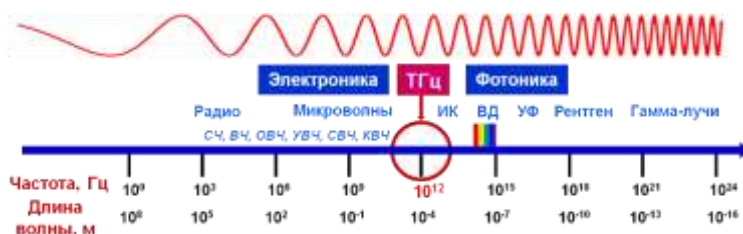


Рисунок 1. Шкала электромагнитных волн[1]. На нем видно, что ТГц излучение на шкале расположено между микроволновым и ИК диапазоном

Из-за отсутствия способов получения и детектирования вплоть до конца 20 века является наименее изученным диапазоном частот, что повлекло за собой его наименование терагерцовым провалом. Нижняя граница терагерцового диапазона (0.1 ТГц) является верхней границей частот излучения, получаемых ускоренным движением электронов (стандартный способ получения когерентного излучения микроволнового диапазона и частот ниже), а верхняя граница (30 ТГц) является нижним пределом получения лазерного излучения (дальний ИК диапазон) [2–4].

С момента появления способов генерации и детектирования ТГц излучения начали развиваться такие направления как ТГц спектроскопия и визуализация в ТГц диапазоне. Терагерцовое излучение по-разному поглощается в разных материалах, характеризующиеся разными спектрами поглощения. Эти факты наталкивают на мысль о том, что данный спектр излучения можно

использовать в различных устройствах сканирования и детектирования, в которых различимы не только форма объекта, но и его химический состав [5–7].



Рисунок 2 Изображения, полученные сканером [8]. Преимуществом использования ТГц диапазона перед рентгеновским является тот факт, что подобные изображения можно получать в реальном времени без вреда здоровью, так как данный диапазон частот не является ионизирующим.

Энергия кванта света, лежащего в терагерцовом диапазоне, сопоставима с энергиями колебаний межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связей. Пропуская через образцы ТГц излучение с широким спектром и анализируя прошедший или отраженный сигнал, можно анализировать сложные органические молекулы (например ДНК[9,10], белки[11]), аминокислоты[12], а также взрывчатые вещества [13], наркотики [14], воды, некоторых полупроводников и металлов и слабо поглощается большинством диэлектриков (например, сухой древесиной). К примеру, в аэропортах мира идет повсеместное внедрение терагерцовых сканеров (например Tadar [8]). С помощью такого изделия можно сканировать живые организмы без вреда для них, так как излучение субмиллиметрового диапазона является не ионизирующим[15].

Также перспективным направлением использования терагерцовых технологий являются медицина[16], фармацевтика[17], промышленность,

безопасность и другие [18–22]. В настоящее время существует огромный потенциал внедрения устройств, работающих в дальнем ИК диапазоне, во все сферы деятельности человека.

На сегодняшний момент наблюдается стремительное распространение мобильных телефонов и точек раздачи Wi-fi и внедрение 5G технологий. Также увеличивается объем передаваемой и принимаемой информации. Уже сейчас количество подключенных к интернету устройств превышает население Земли. Идет повсеместное внедрение интернет - технологий в бытовую технику и промышленные объекты. Также приобретает популярность облачные игровые и стриминговые сервисы, для которых важно стабильное и быстрое соединение. Именно поэтому необходимо увеличивать пропускную способность сети [23]. Уже к 2025 году потребуются скорости передачи данных в беспроводных сетях порядка сотен и тысяч Гбит/с [24]. Один из подходов для достижения таких скоростей заключается в расширении полосы пропускания до терагерцевого диапазона частот.

В данном разделе были рассмотрены основные области применения ТГц излучения в различных сферах деятельности и перспективы развития ТГц технологии. Стоит отметить, что в настоящее время существует ряд проблем в области генерации и детектирования ТГц излучения. Одна из них связана с недостаточной эффективностью существующих ТГц устройств. Поэтому исследования по поиску новых, более эффективных генераторов и приемников ТГц излучения являются необходимыми.

1.2. Способы получения терагерцевого излучения

В настоящий момент существуют множество способов получения излучения терагерцевого диапазона. К примеру, получение терагерцевого

излучения можно осуществить на переносе носителей заряда (лазер на свободных электронах, синхротрон).



Рисунок 3. Лазер на свободных электронах[25]. На изображении видно, что размер такого лазера может превосходить человека

Широкое применение в исследовательских целях таких способов получения ограничено большими размерами и дороговизной таких установок. Альтернативой является квантово- каскадный лазер, но пока он требует охлаждения до криогенных температур.

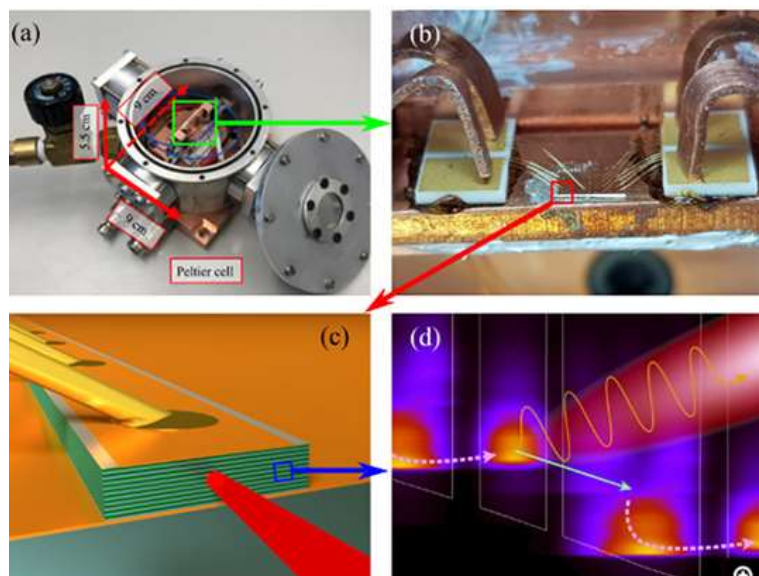


Рисунок 4.Квантово- каскадный лазер [26]. Такие лазеры могут занимать малое пространство (приведенный на рисунке лазер вместе с охлаждением

занимает примерно 9 смх9 смх5.5 см), но требует охлаждения сжиженными газами.

Однако существует метод ТГц генерации, который превосходит предыдущие методы в цене – оптико-терагерцовое преобразование.

1.3. Механизмы оптико- терагерцового преобразования

В отличие от вышеперечисленных способов, получение терагерцового излучения путем воздействия оптическим лазерным пучком (оптико - терагерцовое преобразование) получила широкое применение в исследовательских проектах благодаря простоте и относительной дешевизне. В этом разделе будут кратко рассмотрены основные механизмы генерации терагерцевого излучения.

1.3.1. Фотопроводящая терагерцовая антенна

Одними из наиболее часто используемых генераторов и детекторов ТГц излучения являются фотопроводящие ТГц антенны (ФПА). В них генерация и детектирование ТГц импульсов осуществляется посредством переходного фототока носителей зарядов, индуцированных фемтосекундными лазерными импульсами.

Схема ФПА и принцип ее работы представлена на рисунке 6. Фотопроводящая антенна представляет из себя в простом случае полупроводниковый прибор, состоящий из тонкого слоя полупроводника и напыленных на него два металлических электрода. Толщина рабочего слоя варьируется от 1 мкм до 10 мкм и более, зазор между электродами порядка единиц мкм и длина электродов порядка десяти мкм. Для генерации ТГц излучения к электродам прикладывается напряжение смещения. Возбуждения

производится лазерными импульсами длительностью порядка 100 фс оптического или ИК диапазона. Простыми словами, принцип генерации, следующий:

- Падающий короткий лазерный импульс вызывает резкую генерацию фотовозбужденных носителей заряда
- Носители заряда ускоряются под действием электрического поля контактов, порождая импульс фототока

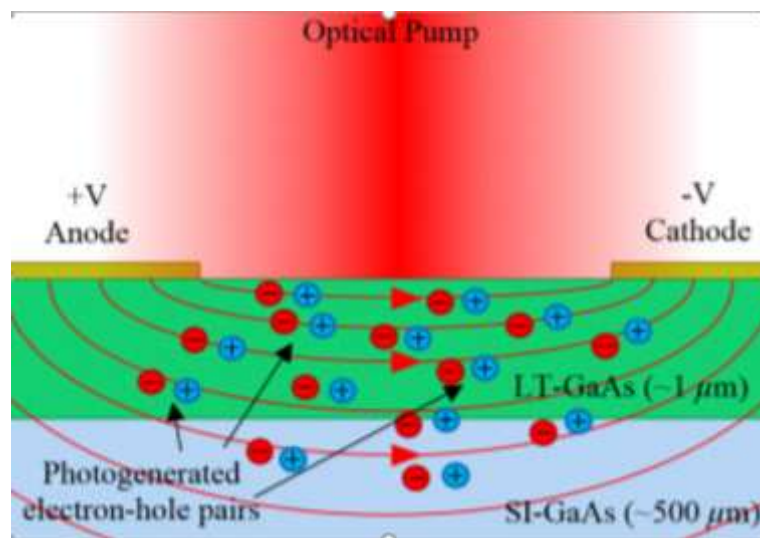


Рисунок 5. Генерация фотовозбужденных носителей заряда [27].

- Импульс фототока вызывает генерацию импульса терагерцового диапазона [27].

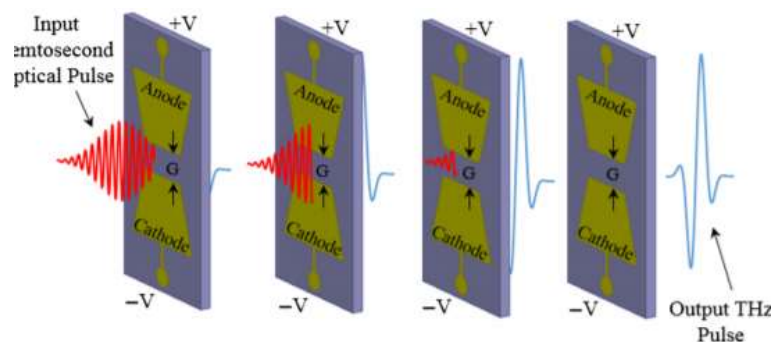


Рисунок 6 . Генерация ТГц импульса [27].

Так как полупроводниковая подложка имеет высокое сопротивление в сравнении с металлом, то электрический заряд концентрируется в области зазора. Фемтосекундные лазерные импульсы действуют как триггеры, разряжая накопившийся в полупроводнике заряд, и высвобождая ее в виде ТГц импульсов. Для наиболее эффективного поглощения пучка энергия фотона оптического импульса должна быть больше ширины запрещенной зоны полупроводника, однако возможен вариант с многофотонным поглощением. Фотовозбуждённые носители под действием электрического поля проходят через зазор и создают переходной фототок. Поскольку электроны обычно обладают большей подвижностью чем дырки, то вкладом дырок можно пренебречь. Плотность тока в этом случае будет определяться выражением

$$J(t) = N(t)e\mu E_b, \quad (1)$$

где N – плотность носителей заряда в полупроводнике, e – элементарный заряд, μ – подвижность электронов, E_b – электрическое поле смещения. Плотность фотоиндуцированных носителей заряда является функцией времени, значение которой определяется формой лазерного импульса и временем жизни фотоиндуцированных носителей заряда. Так как фототок является переменным во времени, то он генерирует ЭМ импульс, временную форму электрического поля которого можно получить решая уравнения Максвелла в среде [28,29]:

$$E_{THz}(t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{A}{z} \frac{\partial}{\partial t} J_s(t) = \frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 c^2 z} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu E_b, \quad (2)$$

где A – область в зазоре ФПА, освещенная лазерным импульсом, ϵ_0 – диэлектрическая константа, c – скорость света в вакууме, z – расстояние между произвольной точкой поля и ТГц источником. Причем, предполагается, что точка находится на нормали к ФПА и расстояние между этой точкой и источником ТГц излучения намного больше размера ФПА.

Существует корреляция между энергией ТГц импульса и энергией импульса оптического возбуждения: чем больше энергии импульса, тем больше возбуждается носителей заряда лазерным импульсом, тем интенсивнее будет выходящее ТГц излучение. Однако линейная зависимость будет только при слабых возбуждениях и малых напряженностях электрических полей смещения. При сильных электрических полях возможен диэлектрический пробой подложки.

Аналогичным образом ФПА может использоваться и как детектор терагерцового излучения. При этом к электродам вместо источника напряжения подключается точный измеритель тока. Интеграл по току (т.е. заряд), протекший между электродами после возбуждения зондом, пропорционален напряженности поля терагерцового импульса в момент прихода зонда (терагерцовое поле меняется медленно в сравнении с длительностью лазерного импульса). Средний ток также пропорционален электрическому полю терагерцового импульса, и его можно оценить по формуле:

$$\bar{J} = \bar{N}e\mu E(\tau), \quad (3)$$

Здесь \bar{N} обозначает среднюю концентрацию электронов, τ – временную задержку между терагерцовым и пробным импульсом. Сканируя задержку τ , измеряют волновую форму терагерцового импульса.

ФП антенны могут быть использованы и для генерации непрерывного терагерцового излучения. Для этого зазор между контактами антенны освещают двумя лазерными лучами с разной длиной волны. Сложение этих двух лучей вызывают периодическое изменение напряженности электрического и магнитного поля в зазоре и, следовательно, периодическое изменение тока, генерирующая ТГц волну с частотой, равной разнице частот падающих лучей. Фотопроводящая антенна, работающая в таком режиме, называется смеситель частот [30–32].

1.3.2. Встроенное поле в полупроводниках

Поверхностные состояния в некоторых полупроводниках (GaAs, GaSb, InAs, InSb и др.), также могут быть использованы для генерации ТГц излучения. Работа выхода на поверхности может несколько отличаться от работы выхода в объеме материала. Эта разница, в конечном итоге, приводит к изгибу энергетических зон вблизи поверхности полупроводника. Встроенное поле формируется в области изгиба энергетических зон. На рисунке 7 показан изгиб зон и образование поверхностного поля в полупроводниковой подложке GaAs n-типа.

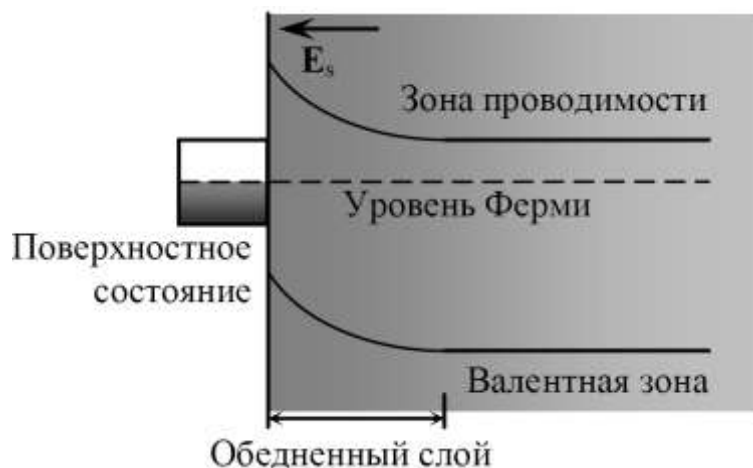


Рисунок 7. Возникновение изгиба зон вблизи поверхности GaAs n-типа [29]

Ферми уровень GaAs n-типа находится вблизи зоны проводимости и расположен выше Ферми уровня приповерхностной области, который находится в середине запрещенной зоны полупроводника. Поверхностное поле заставляет электроны двигаться вглубь объема материала. В результате плотность свободных электронов в этом слое с поверхностным полем становится намного ниже, чем в объеме, поэтому этот слой называют обедненным.

В отсутствии возбуждения между дрейфом и диффузией носителей заряда в полупроводнике устанавливается равновесие, включая и обедненный

слой. При поглощении лазерного импульса в прилежащем к электродам слое, фотоиндуцированные электронно-дырочные пары ускоряются встроенным электрическим полем. Дипольные возмущения будут происходить до тех пор, пока вновь не установится равновесие. Напряженность ТГц излучения в этом случае можно оценить по формуле

$$E_{\text{THz}} \propto \frac{\partial N(t)}{\partial t} e\mu E_s \sin \theta, \quad (3)$$

где E_s — это величина встроенного поля, а θ — это угол между направлением излучения и нормалью дипольного возмущения, перпендикулярного поверхности полупроводника. Из уравнения видно, что ТГц поле имеет неоднородное угловое распределение и пропорционально величине встроенного поля. Для увеличения поверхностного поля можно либо увеличить разницу между работой выхода поверхностных и объемных состояний полупроводника, либо уменьшить толщину обедненного слоя. Как правило, сильные приповерхностные поля можно получить в полупроводниках с достаточно широкой запрещенной зоной.

1.3.3. Фотоэффект Дембера

Еще одним способом генерации ТГц излучения является генерация за счет фотоэффекта Дембера, принцип которого проиллюстрирован на рисунке 8. В результате поглощения лазерного импульса с энергией фотона большей энергии запрещенной зоны полупроводника, в приповерхностном слое полупроводника рождаются электронно-дырочные пары. При сильном поглощении лазерной накачки полупроводниковым материалом фотоиндуцированные носители заряда очень неоднородно распределены вблизи поверхности. Такое асимметричное распределение заставляет

электроны и дырки мигрировать вглубь полупроводника, при этом скорость диффузии определяется выражением

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial z^2}, \quad (4)$$

где z – направление вглубь от границы полупроводника, D – коэффициент диффузии, подчиняющийся соотношению Эйнштейна $D = k_B T \mu$.

Так как у электронов более высокая подвижность в сравнении с дырками, они мигрируют быстрее. Разная скорость диффузии между электронами и дырками приводит к разделению зарядов в полупроводниковой подложке и к генерации переходного поля Дембера, которое и является источником ТГц излучения.

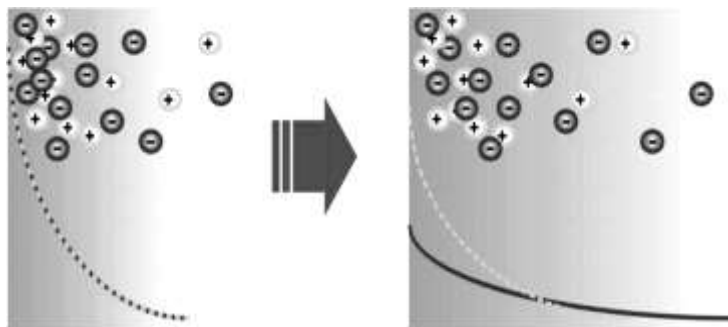


Рисунок 8. Фотоэффект Дембера на поверхности InAs [29].

Фотоэффект Дембера сильнее всего проявляется в полупроводниках с узкой запрещенной зоной. ТГц излучение на основе эффекта Дембера получают при применении InSb, InAs или $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [33,34]. В них различие в подвижностях электронов и дырок особенно существенно и превосходит аналогичную величину для выращенного при низкой температуре GaAs [35].

1.4. Сверхрешчатые структуры. Брэгговская решетка

На протяжении последних лет для генерации и детектирования ТГц волн наиболее часто использовались ФПА на основе таких полупроводников как низкотемпературный и полуизолирующий GaAs [36–38], InAs и InSb [33], твердый расплав $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [34]. Генерация ТГц излучения по механизму встроенного поля и фотоэффекта Дембера объемных полупроводников хорошо изучена [39]. На сегодняшний момент ведутся исследования по изменению их свойств (ионная имплантация, легирование и др.) и оптимизации геометрии электродов ФПА [40–42] с целью повышения мощности и ширины полосы ТГц генерации [43–49].

Другим способом улучшения параметров ТГц излучения является формирование сверхрешчатых структур на основе арсенидов элементов III группы.

1.4.1. Сверхрешчатые структуры

Полупроводники на основе мышьяка (As), к примеру GaAs, InAs, AlAs и их твердые растворы ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$), имеют одинаковую упаковку атомов и близкие (при подборе концентраций x в твердых растворах можно достичь и совпадения высокой степени точности) параметры кристаллических решеток [50–53]. Ниже представлена таблица с параметрами некоторых соединений III-V групп.

Таблица 1. Параметры некоторых полупроводников III-V группы

Соединение	Параметр решетки a, нм	Ширина запрещенной зоны ΔE , эВ	Мобильность электронов и дырок, $\text{см}^2/\text{с}\cdot\text{В}$	Собственная концентрация носителей заряда n_i при температуре $T=300\text{ К}$, см^{-3}
GaAs	0,565[54]	1.424[54]	$\mu_e= 8500$ [54] $\mu_h= 400$ [54]	$2,1 \cdot 10^6$ [54]
InAs	0,606[55]	0.354[55]	$\mu_e= 40000$ [55] ($\mu_{e2d}=155000$ [56]) $\mu_h= 500$ [55]	$1 \cdot 10^{15}$ [55]
AlAs	0,566[57]	2,16[57]	$\mu_e= 1200$ [57] $\mu_h= 420$ [57]	-
InP	0,587[55]	1.4236[55]	$\mu_e= 5400$ [58] $\mu_h= 200$ [58]	-
$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	0,587[59]	0,74[60]	$\mu_e= 12000$ [61] $\mu_h= 300$ [61]	$1 \cdot 10^{16}$ [62,63]
$\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$	0,587[64]	1,47[64]	$\mu_e= 5100$ [64]	$1 \cdot 10^{15}$ [64]

По таблице 1 видно, что у полупроводников III-V групп могут сильно различаться значения ширины запрещенной зоны (у арсенида индия InAs 0,354 эВ, а, например, у арсенида алюминия AlAs 2,16 эВ), мобильности носителей заряда (у арсенида алюминия AlAs $1200\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, у объемного индия арсенида InAs $40000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а в пленке достигает невообразимых

155000 см²/с·В) и концентрации носителей зарядов при 300 К, а параметры решетки не сильно различаются.

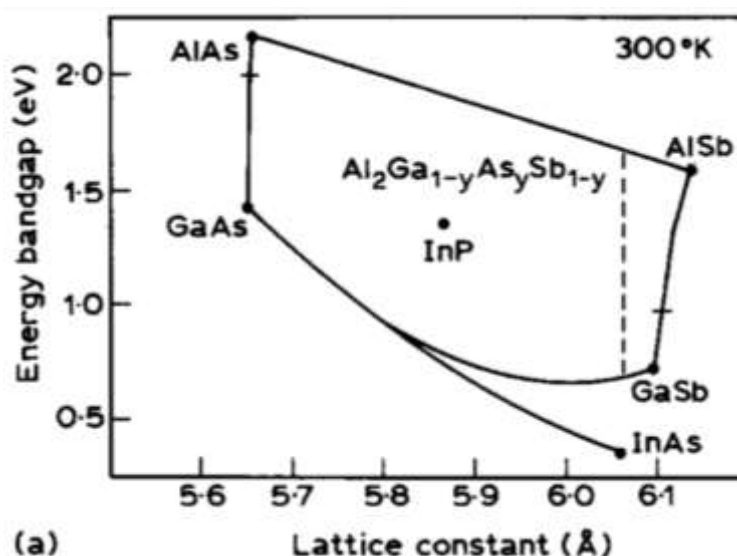


Рисунок 9. Параметры решеток и ширины запрещенных зон основных полупроводников III-V группы при температуре 300 К[50]

Благодаря этому возможно создание фотопроводящих антенн на основе сверхрешетчатых структур с лучшими характеристиками по сравнению с антеннами на основе простых пленок.

Антенной на основе гетероструктуры InGaAs/InAlAs, можно получать терагерцовый импульс с мощностью 64 мкВ, и коэффициент преобразования данной антенны энергии оптической накачки в терагерцовый импульс может достигать значения $2 \cdot 10^{-3}$ [62]. Было продемонстрировано, что использование детекторов на основе InGaAs/InAlAs вместе с высокоэффективными ТГц излучателями, возможно для получения систем измерения THz-TDS на основе ФПА при возбуждении 1550 нм с динамическим диапазоном 90 дБ и пропускной способностью более 6 ТГц. [49,65]. Антенна со сверхрешетчатой структурой на основе LT-GaAs/AlAs излучает в диапазоне частот до 4,5 ТГц и динамическим диапазоном 75 дБ [66], однако здесь преобразование Фурье из

40 сканов усредняется с использованием MATLAB для получения динамического диапазона 75 дБ. Каждое сканирование было 90 секунд с 30 мс времени интеграции. Пропускная способность 4,5 ТГц близка к теоретический пределу ($\Delta f = 4.4\Delta\tau^{-1}$ где τ - ширина лазерного импульса [67]) лазера, и это сравнимо с самой высокой полосой пропускания 5 ТГц в имеющейся в продаже спектроскопии системы. Широкая полоса пропускания и большой динамический диапазон также достижимы, если больше сканирований усредняется. Динамический диапазон 90 дБ был получен путем усреднения 1000 сканирований ТГц сигналов, генерируемые и регистрируемые ФПА с 100 слоями InGaAs / InAlAs с 60 фемтосекундным лазером [68]. LT-GaAs/AlAs фотопроводящие антенны обеспечивают сопоставимую пропускную способность в структуре с несколькими слоями с использованием менее дорогой системы материалов [66].

Использование InGaAs/InAlAs в спектроскопии во временной области более перспективно из-за высокой мощности выходного излучения, широкой ширины пропускания и динамического диапазона, достигающего отметку 90 дБ. Добавление в гетероструктуру слоя индия арсенида InAs может увеличить мощность антенны за счет высокой мобильности носителей заряда в нем[56].

1.4.2. Брэгговская решетка

Брэгговская решетка — это слоистая структура, в которой показатель преломления материала периодически изменяется в перпендикулярно слоям направлении. Другое название – одномерный фотонный кристалл.

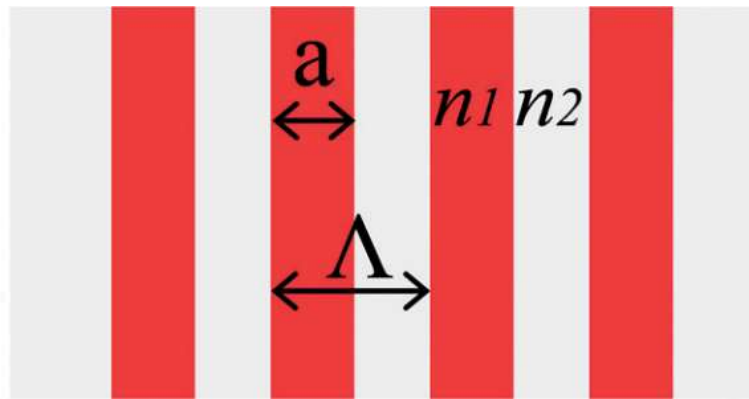


Рисунок 10. Схематическое изображение Брэгговской решетки. Где a - толщина слоя, n_1 и n_2 - показатели преломления слоев, Λ - период решетки[69].

Брэгговская решетка, показанный на рисунке 10, работает в следующих трех режимах в зависимости от соотношения между шагом структуры (Λ) и рабочей длиной волны в свободном пространстве (λ):

- I. Дифракционный режим. Поступающий луч рассеивается в разных направлениях.
- II. Брэгговский режим отражения. Поступающий луч отражается назад.
- III. Суб-волновой режим. Эффекты дифракции и отражения из-за периодичности структуры подавляются.

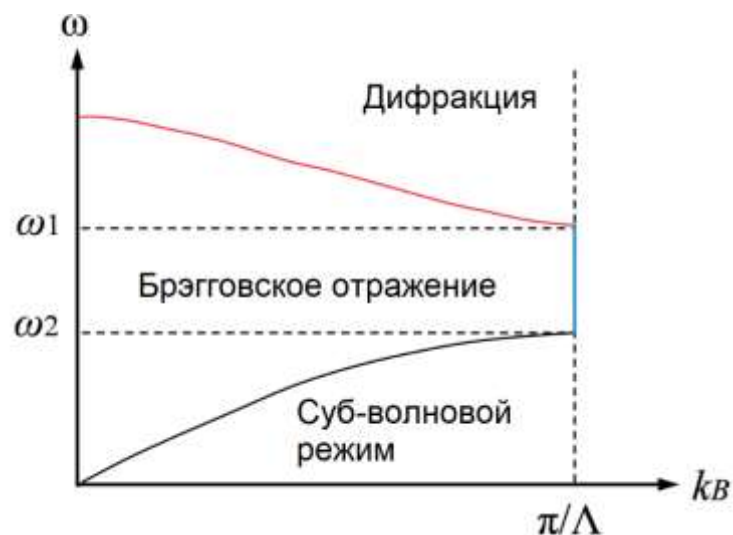


Рисунок 11. Схематическая зонная диаграмма брэгговской с продольным распространением[69]

На рисунке 11 показана схема $k - \omega$ одномерной периодической структуры с продольным распространением [70]. Видно, что для данной периодической структуры режим работы сильно связан с рабочей длиной волны в свободном пространстве λ или рабочей частотой ω . Когда $\omega > \omega_1$ (выше первой фотонной запрещенной зоны) волновод работает в блоховском режиме, и свет будет излучаться из волновода. В частотном диапазоне $\omega_2 > \omega > \omega_1$ (первая фотонная запрещенная зона), свет не может распространяться через периодическую структуру и отражается, и это режим отражения Брэгга. Константа распространения в этом режиме постоянна:

$$k_B = \pi/\Lambda$$

Последний режим расположен ниже первой фотонной запрещенной зоны, где рабочая частота меньше, чем ω_2 [69].

Добавляя в ФПА брэгговскую решетку, работающую в режиме отражения, после сверхрешетчатой структуры, можно увеличить поглощение падающего на ФПА импульса накачки (а значит и переходной ток), так как непоглощенный структурой свет частично отразится обратно. Так как у InGaAs и InAlAs разные коэффициенты поглощения [71], то с их использованием можно организовать брэгговский отражатель, интегрированный в ФПА.

1.5. Методы исследования ФПА. Спектроскопия во временной области THz-TDS (TDS- time-domain spectroscopy). Моделирование процессов излучения.

Наиболее частым методом исследования ФПА является спектроскопия во временной области из-за своей простоты исполнения и достаточным

спектральным разрешением. Другим перспективным методом исследования является метод компьютерного моделирования за счет малых затрат на него. В данном разделе кратко описаны эти методы исследований, применяемых в данной выпускной квалификационной работе.

1.5.1. Спектроскопия во временной области THz-TDS

ТГц спектроскопия во временной области (terahertz time-domain spectroscopy – THz TDS) одна из наиболее часто используемых методик для изучения сверхбыстрых процессов излучения ТГц излучения и динамики фотовозбуждённых носителей заряда. Благодаря большому разнообразию существующих терагерцовых источников и методов детектирования ТГц излучения, THz TDS – наиболее гибкий и универсальный инструмент для спектроскопии, он предлагает измерение в широком спектральном диапазоне с разумным спектральным разрешением и хорошим отношением сигнал/шум. Типичная схема установки для генерации и детектирования ТГц излучения по данной методике, представлена на рисунке 12.

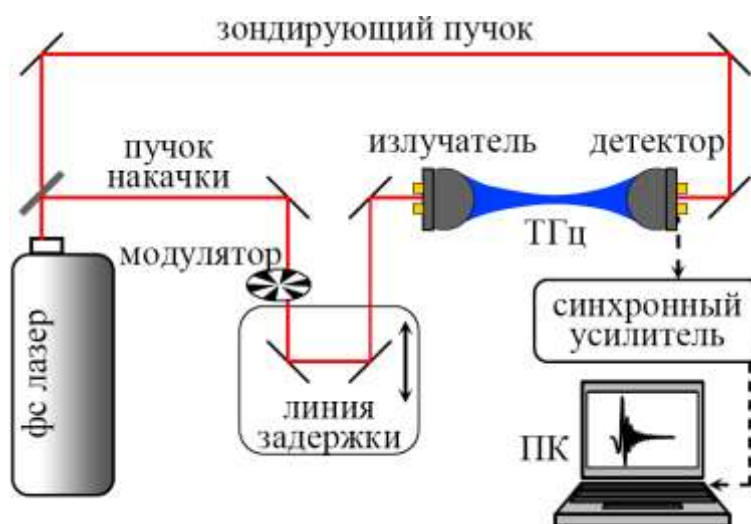


Рисунок 12. Схема генерации ТГц излучения по методике THz TDS [29]

Принцип работы такой системы заключается в разделении лазерного пучка фемтосекундной длительности на две составляющие: пучок «накачки» и пучок «зондирования». Импульс накачки используется для генерации ТГц излучения, в то время как импульс зондирования используется для сбора данных и получения профиля импульса ТГц излучения. Пучок накачки, проходя через линию задержки, фокусируется на образце, в результате чего индуцируется ТГц излучение. ТГц импульсы генерируются в фотопроводящем слое образца и собираются при помощи первого параболического зеркала, после чего фокусируются на детектор вторым параболическим зеркалом. Пучок зондирования фокусируется на детекторе, после чего два пучка совмещаются в одной точке параболическими зеркалами. Механическая линия задержки используется для изменения времени задержки между ТГц импульсом и импульсом зондирования. Временная форма ТГц импульса получается в ходе сканирования этой временной задержки.

В качестве генераторов и детекторов в системах терагерцевой спектроскопии могут использоваться фотопроводящие антенны, полупроводниковые материалы и ЭО кристаллы (например, ZnTe[3]). Достаточно часто в качестве детектора в системах THz-TDS используется фотопроводящая антенна на основе полупроводника. В схеме с ФПА детектором принцип детектирования ТГц излучения основан на поглощении оптического излучения в полупроводниковой среде с последующим образованием фотовозбужденных электронно-дырочных пар и модуляции терагерцевой волной заряд, протекший через электроды. Сканирование фазы терагерцевой волны осуществляется с помощью линии временной задержки. На рисунке 13 (а) представлены типичные волновые формы ТГц импульсов, получаемых методом THz TDS. Далее методом Фурье-преобразования от временных форм ТГц сигналов получают спектральные зависимости, приведенные на рисунке 13 (b).

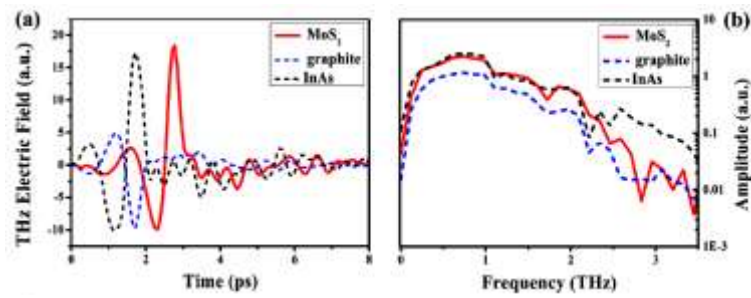


Рисунок 13. Временные (а) и частотные (б) характеристики ТГц сигналов для MoS₂, графита, и InAs [72]

Также стоит отметить, что система THz TDS может быть сконфигурирована в двух режимах: режиме пропускания и режиме отражения (рисунок 14). Режим пропускания обычно используется для изучения слабо поглощающих материалов, таких как полупроводники на основе мышьяка As.

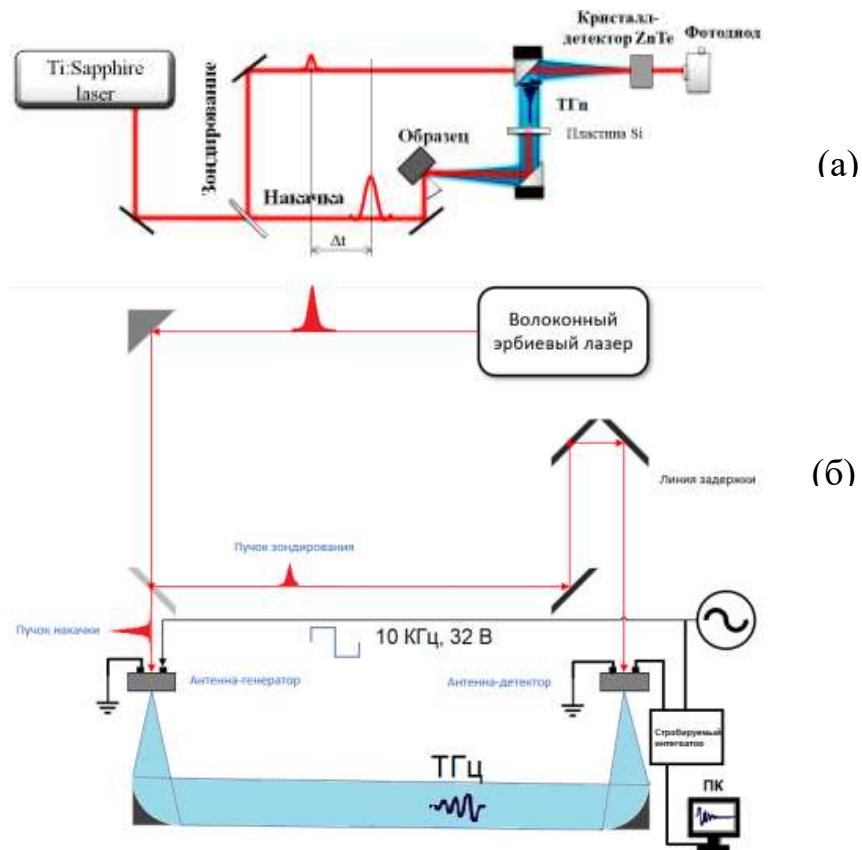


Рисунок 14. Принципиальная схема методики THz TDS в режиме отражения (а) и в режиме пропускания (б).

Эксперимент по исследованию детектирования ТГц излучения в свехрешетчатой структуре InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs с брэгговской решеткой, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs (100), необходимо проводить в конфигурации пропускания, поскольку ТГц излучение слабо поглощается подложкой.

1.5.1.1. Методы усиления сильнозашумленных и слабых сигналов. Строблируемый интегратор. Фазочувствительный усилитель.

Одной из основных проблем детектирования является факт наличия в терагерцовом диапазоне фонового теплового излучения, генерируемого окружающими детектор объектами. Для фильтрации шумов и удаления паразитного терагерцового излучения используется внешнее усилительное оборудование: строблируемый интегратор, фазочувствительный усилитель. Способ детектирования выбирается индивидуально для каждого эксперимента и зависит от ряда условий. Рассмотрим подробнее метод фазочувствительного усиления и строблируемого интегрирования.

1.5.1.1.1. Фазочувствительный усилитель

Фазочувствительный усилитель (или lock-in amplifier) используются для обнаружения и измерения очень слабых периодических сигналов — вплоть до нескольких нановольт. Благодаря lock-in усилителю могут быть произведены точные измерения, даже если сигнал зашумлён источником шума, во много

тысяч раз мощнее сигнала. В lock-in усилителях использована техника, известная как фазочувствительное детектирование. Её суть заключается в том, что из входного сигнала выделяется компонента сигнала на определенной опорной частоте и с определённой фазой. Шумы на частотах, отличных от опорной частоты, отфильтровываются и не влияют на измерения. Как было сказано выше, для реализации метода фазочувствительного детектирования необходимо наличие опорного сигнала. При измерении терагерцового импульса опорный сигнал берется с модулятора (chopper). Пусть опорный сигнал представляет собой меандр с частотой f (рис. 15, а). Так же предположим, что сигнал ТГц представляет собой синусоиду. Очевидно, что сигнал ТГц будет иметь ту же частоту, что и модулятор, то есть частоту генератора переменного напряжения f , но при этом иметь некоторый фазовый сдвиг θ_c (рис. 1.11, б). Фазовый сдвиг сигнала ТГц может быть следствием как технических особенностей измерительной установки, так и самого процесса генерации терагерцового излучения. С учётом фазового сдвига, зависимость сигнала ТГц от времени можно записать следующим образом:

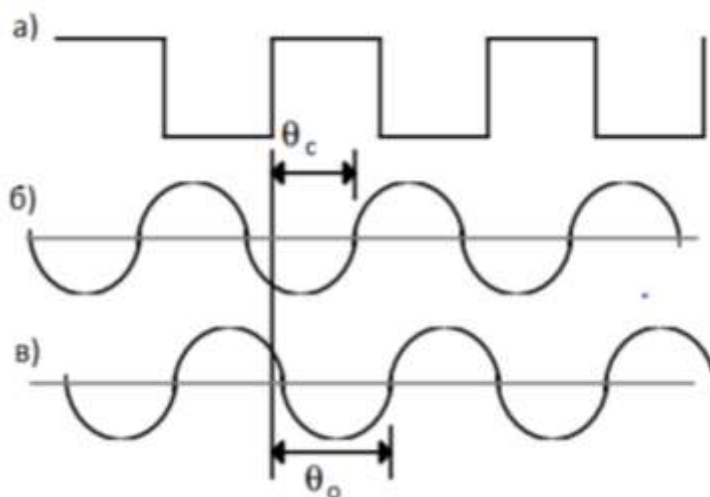


Рисунок 15. Фазовые диаграммы: а – опорный меандр; б – сигнал ТГц; в – собственный опорный сигнал [73]

Для реализации фазочувствительного усиления lock-in генерирует собственный опорный сигнал с угловой частотой ω_p и фазовым сдвигом θ_p (рис. 15, в). Зависимость собственного опорного сигнала от времени можно записать следующим образом:

$$V_p(t) = V_p \cdot \sin(\omega_p t + \theta_p), \quad (5)$$

где V_p – амплитуда сигнала.

Фазочувствительный усилитель сначала усиливает сигнал ТГц, а затем умножает его на собственный опорный сигнал. Результирующий сигнал имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} V_{\text{ФЧУ}}(t) &= V_{\text{ТГц}} V_p \cdot \sin(\omega_p t + \theta_p) \sin(\omega_{\text{ТГц}} t + \theta_{\text{ТГц}}) \\ &= \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \cos((\omega_p - \omega_{\text{ТГц}})t + \theta_{\text{ТГц}} - \theta_p) - \\ &\quad - \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \cos((\omega_p + \omega_{\text{ТГц}})t + \theta_{\text{ТГц}} + \theta_p) \end{aligned} \quad (6)$$

На следующем шаге прибор подстраивает угловую частоту собственного опорного сигнала таким образом, чтобы она равнялась угловой частоте сигнала ТГц $\omega_p \approx \omega_{\text{ТГц}}$. После таких преобразований выходной сигнал ФЧУ примет вид:

$$V_{\text{ФЧУ}}(t) = \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p (\cos(\theta_{\text{ТГц}} - \theta_p) - \cos(2\omega_{\text{ТГц}} t + \theta_{\text{ТГц}} + \theta_p)) \quad (7)$$

Из приведённого выше выражения видно, что сигнал ФЧУ состоит из переменной и постоянной составляющей. Если на выходе добавить фильтр высоких частот, то переменная составляющая будет отфильтрована. В таком случае, сигнал ФЧУ будет пропорционален амплитуде сигнала ТГц:

$$V_{\text{ФЧУ}} = \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \cos(\theta_{\text{ТГц}} - \theta_p) \quad (8)$$

Для того, чтобы найти абсолютное значение амплитуды сигнала ТГц, lock-in генерирует дополнительный собственный опорный сигнал с дополнительным фазовым сдвигом в 90° :

$$\theta_p' = \theta_p + 90^\circ \quad (9)$$

Затем с дополнительным собственным опорным сигналом прделываются операции, аналогичные (6-8):

$$V_{\text{ФЧУ2}} = \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \cos(\theta_{\text{ТГц}} - \theta_p') = \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \sin(\theta_{\text{ТГц}} - \theta_p) \quad (11)$$

$$\begin{cases} V_{\text{ФЧУ}} = \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \cos(\theta_{\text{ТГц}} - \theta_p), \\ V_{\text{ФЧУ2}} = \frac{1}{2} V_{\text{ТГц}} V_p \sin(\theta_{\text{ТГц}} - \theta_p). \end{cases} \quad (12)$$

Решением системы является измеряемая амплитуда сигнала ТГц:

$$V_{\text{ТГц}} = \sqrt{\frac{4(V_{\text{ФЧУ}}^2 + V_{\text{ФЧУ2}}^2)}{V_p^2}} \quad (13)$$

Из вышеприведённого примера видно, что lock-in усилитель является очень мощным инструментом восстановления сигнала. Однако он является таковым лишь в случае, когда входной сигнал без особых потерь формы можно представить в виде синусоидальной волны. Если же сигнал имеет произвольную форму, то lock-in раскладывает входной сигнал в ряд Фурье и использует первый гармонический член этого ряда в качестве искомого сигнала.

Исходя из этого, можно сказать, что использование lock-in усилителя становится нецелесообразным при исследовании сигналов, сильно отличающихся от синусоиды. В таких случаях необходимо использование другого измерительного оборудования – стробируемого интегратора.

1.5.1.1.2. Стробируемый интегратор

Стробируемый интегратор – прибор, который помогает восстановить сильнозашумлённые сигналы, интегрируя выборки сигналов. Методика измерения, используемая в стробируемом интеграторе, особенно подходит для сигналов, сильно отличающихся от синусоиды.

Основой любого стробируемого интегратора в простейшем случае является RC фильтр нижних частот с переключателем S_1 (рис 16).

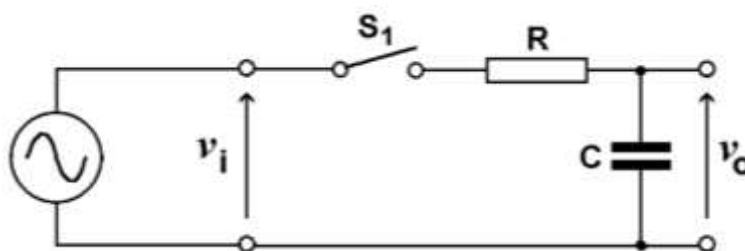


Рисунок 16. Простейшая схема стробируемого интегратора [74]

Пусть на вход RC цепи интегратора подаётся напряжение v_i (рис. 16). Когда ключ S_1 замыкается, выходное напряжение v_o начинает экспоненциально расти до значения v_i , как показано на рис. 16. Постоянная времени цепи корректируется так, чтобы по окончании интегрирования входного сигнала напряжение на выходе интегратора совпадало с напряжением на входе с погрешностью в несколько процентов.

Такая RC цепь называется интегрирующей из-за того, что выходное напряжение является интегралом от входного сигнала при достаточном времени интегрирования.

Для реализации метода стробируемого интегрирования, так же, как и для фазочувствительного усиления, необходимо наличие опорного сигнала. При измерении терагерцового импульса опорный сигнал берётся с генератора переменного напряжения. Интегратор генерирует собственный логический сигнал на опорной частоте (рис. 17).

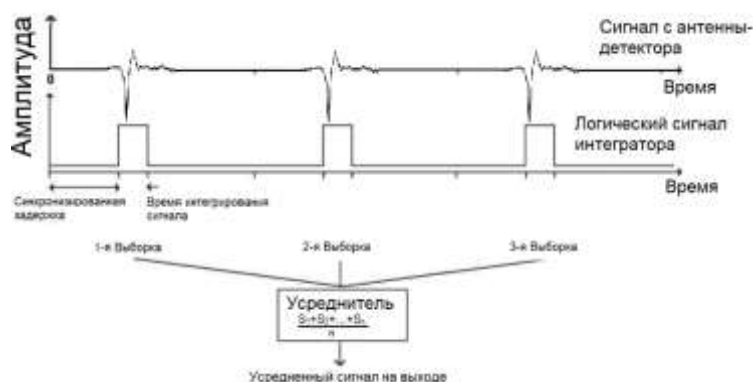


Рисунок 17. Схема фильтрации шумов стробируемым интегратором

Логический сигнал интегратора представляет собой последовательность импульсов, в которой высокий сигнал определяет время интегрирования сигнала [75]. Синхронизированная задержка и время интегрирования сигнала задаются вручную. Для их настройки на осциллограф совместно с сигналом фотодетектора выводится логический сигнал интегратора, как показано на рис. 17. Регулируя параметры, мы можем выделить интересующую нас часть сигнала с антенны-детектора, а именно, сигнал ТГц. В течение каждого

периода проинтегрированный сигнал ТГц проходит на усреднитель, на котором формируется выборка, которая суммируется и усредняется.

Стробируемый интегратор и фазочувствительный усилитель (lock-in) используются в различных экспериментах с сильными шумами и слабыми сигналами. В данной работе использовался метод стробируемого интегрирования, однако метод фазочувствительного детектирования также имеет место быть.

1.5.2. Моделирование процессов излучения

Моделирование процессов генерации ТГц импульса с помощью ПК является перспективным методом изучения сверхбыстрых процессов поглощения в ФПА и динамики фотовозбуждённых носителей заряда, так как показывает хорошую сходимость с экспериментом и позволяет предсказывать свойства и параметры излучения генерируемого фотопроводящей антенной[76–79].

Моделирование излучения импульса терагерцового диапазона в ФПА с использованием ПК ставит задачу связать явления оптического поглощения, генерации, динамики и рекомбинации возбужденных оптической накачкой носителей заряда, и последующей его генерации. Связать процессы из разных разделов физики позволяет программный пакет для мультифизического моделирования физических явлений COMSOL Multiphysics. Вычислительное моделирование ФПА обычно разделяется на три этапа:

- а. расчёт оптического отклика в антенне, который ищется путем вычисления пространственного распределения оптического поля, исходя из решения уравнений Максвелла, с использованием модуля электромагнитных волн (electromagnetic waves, frequency domain), подробно описанный в статье Isaac'a 2019 года[80]

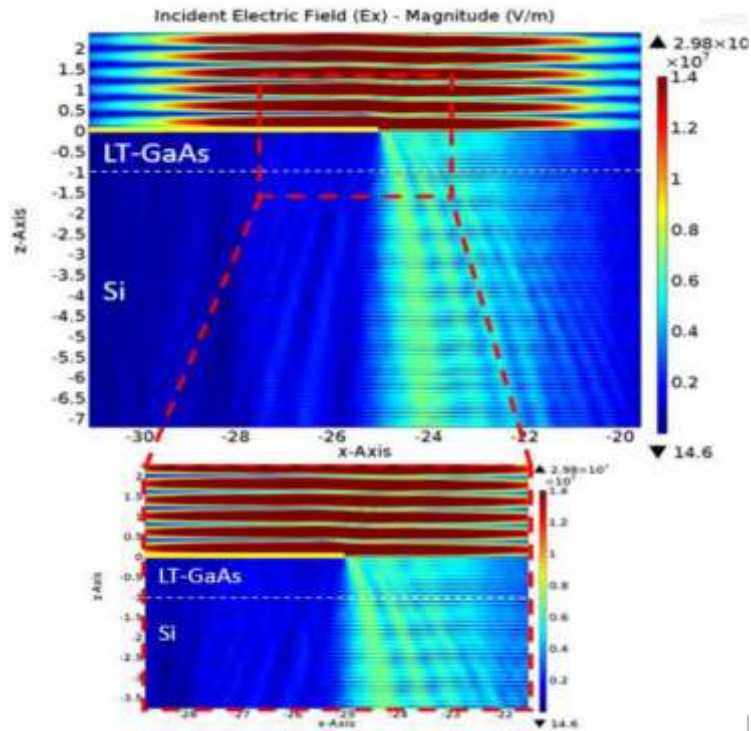


Рисунок 18. Пример рассчитанного распределения электрического поля оптической накачки, падающего на фотопроводящую антенну[80]

- б. расчет электрического отклика, который ищется путем решения во временной области уравнений переноса носителей заряда и уравнений Пуассона при генерации носителей при поглощении энергии оптической накачки, расчет распределения поля которого получен с первого шага[76].

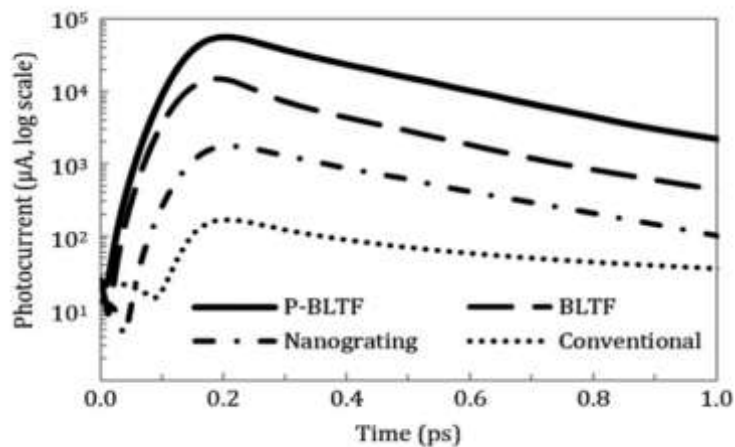


Рисунок 19. Временные формы переходных токов, рассчитанных для антенн с различными дизайнами [76]

в. Расчёт терагерцового импульса, который ищется либо путем непосредственного решения уравнений Максвелла, используя результаты расчета переходного тока при возбуждении импульсом накачки, полученного во втором шаге[78], либо путём нахождения приближенного решения, описываемое уравнением (2):

$$E_{THz}(t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{A}{z} \frac{\partial}{\partial t} J_s(t)$$

где A – область в зазоре ФПА, освещенная лазерным импульсом, ϵ_0 – диэлектрическая константа, c – скорость света в вакууме, z – расстояние между произвольной точкой поля и ТГц источником.

Однако при выводе данной формулы были приняты допущения, которые противоречат друг другу. С одной стороны, зазор между электродами очень мал, а сами электроды бесконечно тонкие. С другой стороны, ширина щели между электродами должна быть соразмерна или больше длины волны, так как в противном случае электромагнитная волна не пройдет в щель. Таким образом, данная формула годится лишь для оценочного анализа выходных характеристик антенны [78].

Как видно из рисунка 20, расчёт терагерцового импульса может сходиться с экспериментальными данными с высокой степенью точности. Исходя из выше сказанного, моделирование процессов генерации ТГц излучения является отличным инструментом исследования и прототипирования ФПА.

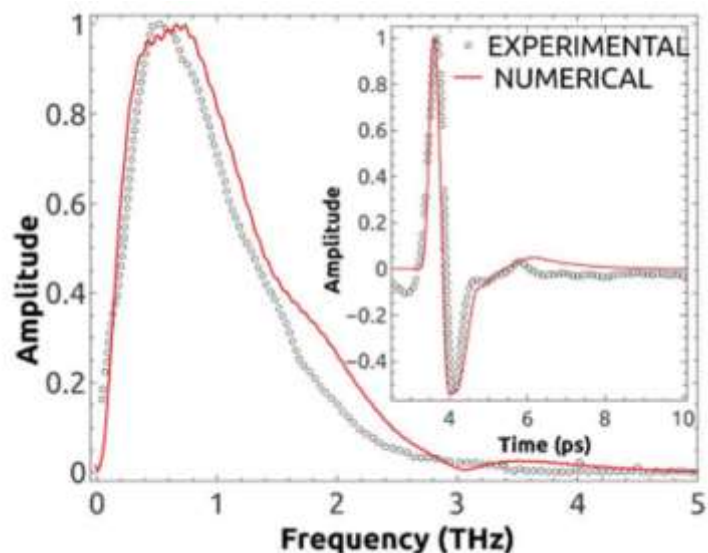


Рисунок 20. Пример сравнения импульса ТГц и спектральной зависимости, полученные путем моделирования и эксперимента [78].

2. Постановка задачи

В ходе проведенного обзора литературы было обосновано, что существует необходимость решения задачи, направленной на улучшение эффективности ТГц генераторов и детекторов. Использование сверхрешетчатой структуры на основе InGaAs/InAlAs может улучшить характеристики фотопроводящей антенны, а также добавление в структуру индия арсенида InAs и формирование двумерного электронного газа в квантовом колодце в нем может сильно увеличить переходной ток при возбуждении, что в следствии увеличит мощность ТГц излучения. Именно поэтому была выбрана антенна на основе сверхрешетчатой структуры InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs. Дополнительного увеличения фототока можно добиться путем увеличения поглощения структурой, которого можно добиться путем внедрения в структуру брэгговской решетки. Исследование антенны следует проводить

методом зонда-накачки и методом моделирования процессов поглощения и излучения.

Цель настоящей работы: исследовать параметры терагерцового излучения сверхрешетчатой фотопроводящей антенной с брэгговской решеткой

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Провести оценку распределения оптических полей лазерной накачки в сверхрешетчатой структуре InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs и определить влияние брэгговской решетки на поглощение.
2. Произвести расчёт фототока при возбуждении оптической накачкой в сверхрешетчатой фотопроводящей антенне с брэгговской решеткой с применением усредненного слоя с последующей оценкой параметров терагерцового излучения.
3. Исследовать параметры детектирования терагерцового излучения в спиральной ФПА на основе сверхрешетки с отражателем Брэгга. Сравнить полученные экспериментальные данные с результатами расчетного моделирования.

3. Исследование влияния брэгговской решетки на поглощение структурой. Расчет излучения терагерцового импульса. Исследование ФПА со сверхрешетчатой структурой и брэгговской решеткой методом THz-TDS.

Влияние брэгговской решетки на свойства фотопроводящего слоя оценивалось путем проведения расчета поглощения электромагнитного излучения в сверхрешеточной структуре. Период брэгговской решетки и

толщины слоев InGaAs и InAlAs подбирались так, чтобы для длин волн электромагнитного излучения оптической накачки решетка работала в режиме отражения. Для излучения терагерцового диапазона данная структура работает в режиме субволнового пропускания.

3.1. Исследование влияния брэгговской решетки на поглощение структурой.

Для данного исследования мы использовали дизайн антенны с брэгговской решеткой и без нее. Схематически исследуемую структуру можно изобразить следующим образом:

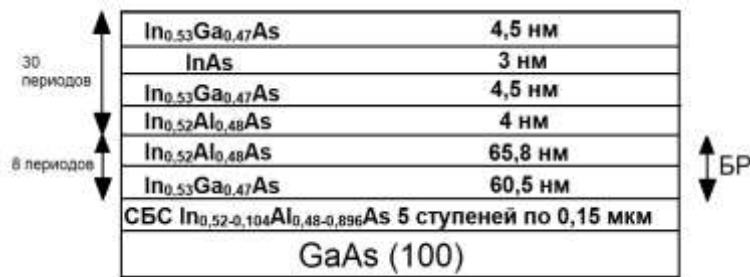


Рисунок 21. Схема функционального слоя.

Теоретический расчет поглощения структурами производился путем нахождения распределения напряженности электрического поля в слоях с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics с использованием модуля расчета Electromagnetic waves frequency domain, который основан на решении уравнений Максвелла в среде, характеризующаяся коэффициентом преломления n и коэффициентом экстинкции k . Для материалов сверхрешетки и брэгговской решетки оптические константы выбраны исходя из известных данных [81,82]. Для материалов метаморфного буферного слоя были использованы оптические константы, полученные экспериментальным методом [83]. Однако в целом оптические

свойства буферного слоя незначительно влияют на результаты расчета, так как в диапазоне исследования коэффициент экстинкции k в слое стремится к нулю.

В результате расчета были получены следующие зависимости поглощения структурой с брэгговской решеткой и без нее:

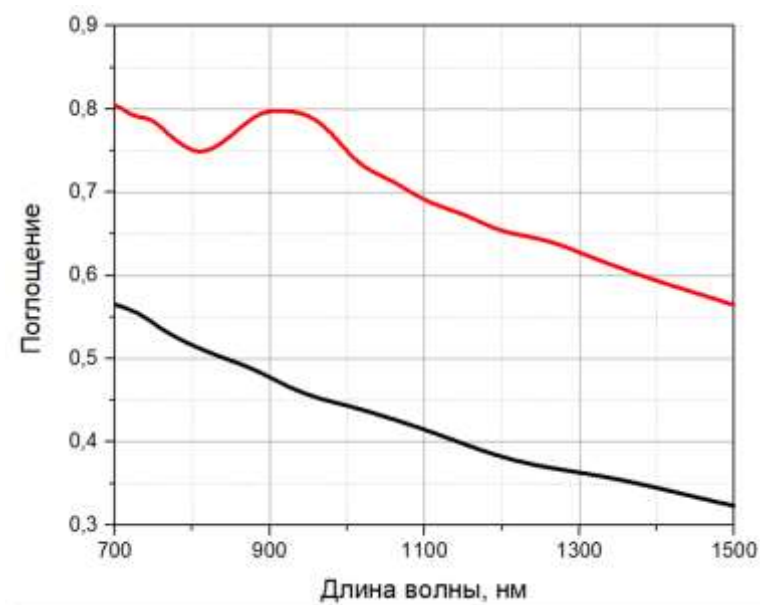


Рисунок 22. Поглощение структурами при разных длинах волн накачки. Красная кривая - для структуры с брэгговским отражателем, черная - для структуры без него.

Как видно из рисунка выше, поглощение структурой увеличивается на всем диапазоне исследований - локальный максимум поглощения наблюдается при длине волны накачки 910 нм и достигает значения $A=0,8$.

Далее было проведено исследование эффективности внедрения брэгговской решетки в структуру для разных длин волн накачки.

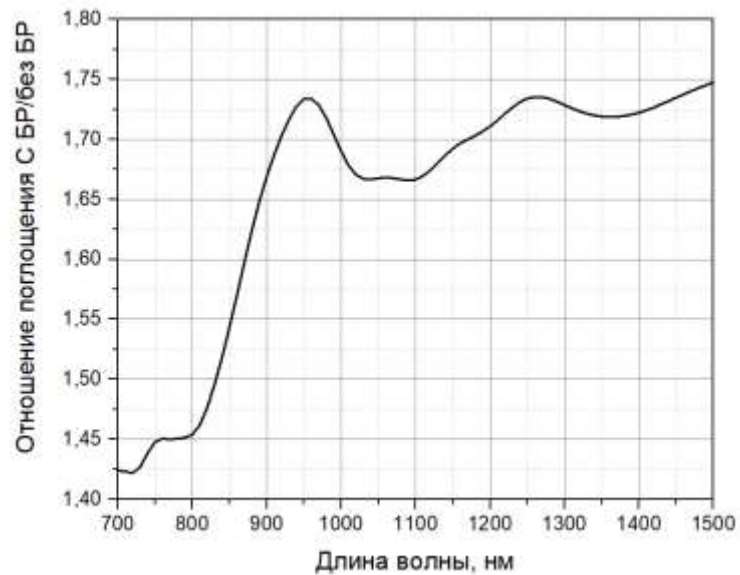


Рисунок 23. Сравнение поглощения структурами с отражателем и без

Как видно на рисунке 23, эффективность внедрения отражателя достигает локальных максимумов при длинах волн 960 нм и 1260 нм, достигая увеличения поглощения в 1,73 раза.

Исходя из выше сказанного можно сделать вывод о том, что внедрение брэгговской решетки в свехрешетчатую фотопроводящую антенну увеличивает поглощение энергии импульса накачки в ней, что, в свою очередь, увеличивает переходной ток в функциональном слое и, тем самым, энергию излучаемого ТГц импульса.

3.2. Расчет излучения терагерцового импульса, излучаемого фотопроводящей антенной.

Моделирование процессов излучения проводилось с последовательным усложнением геометрической модели и разделением вычисления на этапы для оптимизации времени вычисления, Геометрическая модель на начальном этапе была выбрана самой простой, а в качестве подложки был выбран

низкотемпературный арсенид галлия, так как обладает схожими характеристиками с усреднённым сверхрешетчатым слоем [52,76].



Рисунок 24. Геометрическая модель фотопроводящей антенны

Оптический импульс падает на полупроводниковую подложку из LT-GaAs в зазор между электродами, на которые подаётся напряжение.

Расчет токов, генерации носителей заряда, их динамика производится путем решения уравнений в частных производных, разбиением области на конечные объемы и нахождение приближенного решения методами итерационного подхода (метод Ньютона) [84]. Уравнения составляются исходя из выбора механизмов, моделей и физических явлений. В данной модели была использована мультифизическая связка физики полупроводников и электромагнитных волн [76].

Для моделирования процесса генерации импульса терагерцового диапазона были выбраны следующие параметры:

Name	Expression	Value	Description
L	10[um]	1E-5 m	Ширина антенны
d	5[um]	5E-6 m	Ширина зазора
ha	1[um]	1E-6 m	Толщина ф. слоя
hs	50[nm]	5E-8 m	толщина электрода
hv	2.5[um]	2.5E-6 m	толщина возд.слоя
V01	10[V]	10 V	напряжение
Dx	2[um]	2E-6 m	полуширина пучка
Dy	Dx	2E-6 m	
Dt	100[fs]	1E-13 s	длительность импульса
t0	0.5[ps]	5E-13 s	время прихода импульса
x0	L-d	5E-6 m	положение максимума...
Pave	250[mW]	0.25 W	средняя мощность
fp	82[MHz]	8.2E7 Hz	частота импульсов
E0	(sqrt(Pave*8*Z0_const/(fp*Dx*Dy*Dt)))*((0.69314718056/pi)^(3/4))	1.5429E9 V/m	макс. напр. эл. поля
kpc	0.085660	0.08566	коэф. экстинкции
fq	c_const/800[nm]	3.7474E14 1/s	частота света
tauns	48[ps]	4.8E-11 s	SRH lifetime
taups	48[ps]	4.8E-11 s	

Рисунок 25. Параметры моделирования

Геометрические (ширина антенны L, ширина зазора d, толщина функционального слоя ha, толщина электрода hs) и оптические (полуширина пучка по x-координате Dx, полуширина пучка по y-координате Dy, длительность импульса накачки Dt, средняя по времени мощность падающего излучения Pave, частота повторений импульсов fp, частота падающего излучения fq) параметры были выбраны исходя из реальных или близких к ним параметров антенн и выходного излучения фемтосекундного лазера, а максимальная амплитуда пучка E0 рассчитывается по формуле [80,85]:

$$E_a = \sqrt{\frac{P_{ave} 8 \eta_0}{f_p D_x D_y D_t}} \left(-\frac{\ln(0,5)}{\pi} \right)^{\frac{3}{4}}$$

где P_{ave} - средняя по времени мощность, f_p - частота повторений импульсов, D_x и D_y - полуширина пучка по x-и y-координате, D_t - длительность импульса накачки, η₀ – волновой импеданс свободного пространства.

Падающий оптический импульс задается в модуле Electromagnetic waves, Frequency domain с помощью Scattering Boundary Condition и

аналитической функции $an2(x)$, с помощью которой задается форма импульса [80] (рис. 26,27):

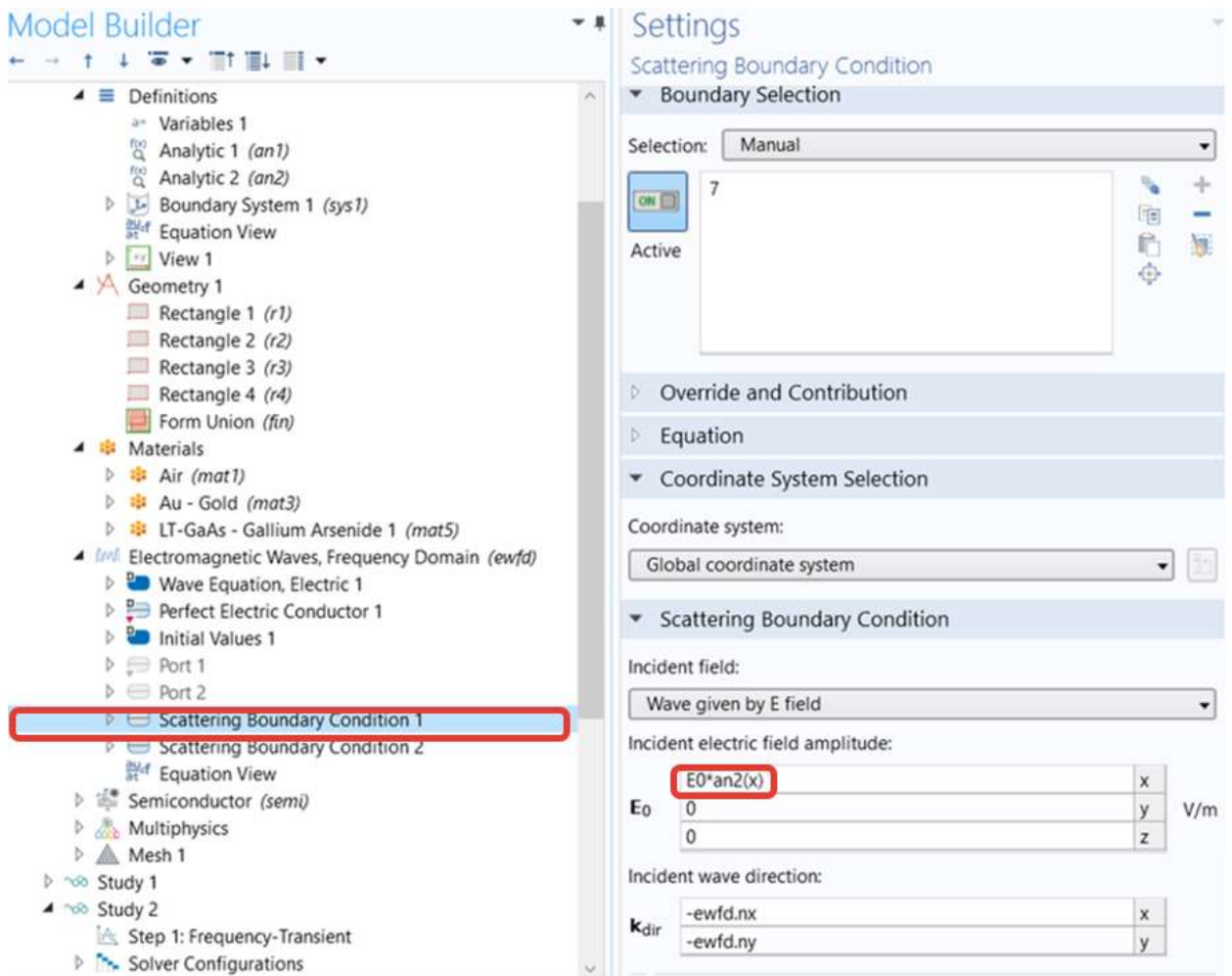


Рисунок 26. Задание падающей волны. В окне ввода Incident electric field amplitude задаем амплитуду падающей волны по x координате

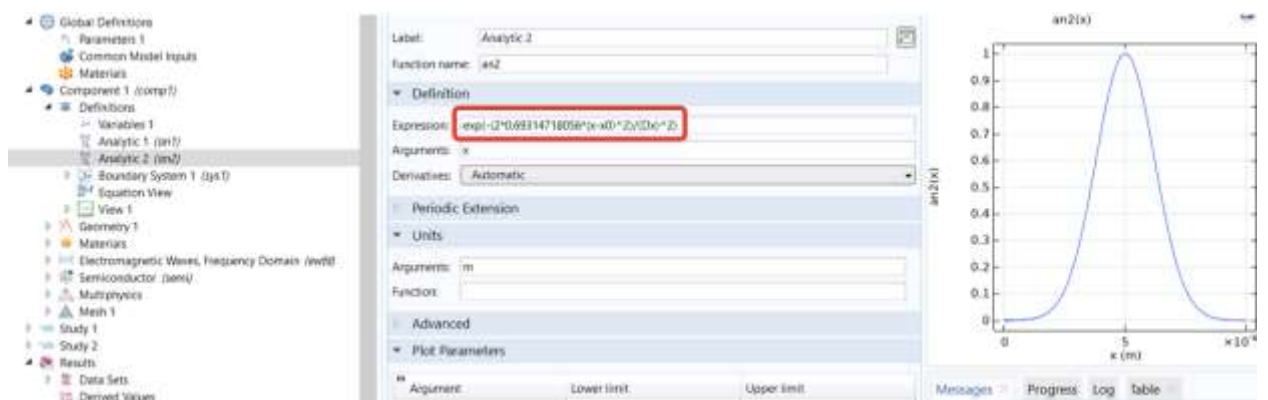


Рисунок 27. Задание формы импульса. В окне ввода Expression определяем функцию $an2(x)$

Для учета генерации носителей заряда при возбуждении фемтосекундным импульсом было сделано приближение, что каждый фотон с энергией $E_p > E_g$ (где E_g - ширина запрещенной зоны полупроводника) поглощенный в полупроводнике генерирует одну электронно-дырочную пару [76,85]:

$$g(x, y, z, t) = \left(\frac{4\pi k_{PC}}{hc} \right) P_s(x, y, z) \exp \left(4 \ln(0,5) \frac{(t-t_0)^2}{D_t^2} \right) \quad (14)$$

где k_{PC} - мнимая часть показателя преломления для полупроводника, h - постоянная Планка, c - скорость света в вакууме, t_0 - время центра импульса, а D_t - длительность импульса, $P_s(x, y, z)$ - плотность потока света, которая рассчитывается по формуле [76]:

$$P_s(x, y, z) = \left(|P_{0x}(x, y, z)|^2 + |P_{0y}(x, y, z)|^2 + |P_{0z}(x, y, z)|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

, где

$$P_{0x}(x, y, z) = \frac{1}{2\hat{\eta}} \operatorname{Re} \left(|E_y|^2 - |E_z|^2 \right)$$

$$P_{0y}(x, y, z) = \frac{1}{2\hat{\eta}} \operatorname{Re} (|E_z|^2 - |E_x|^2)$$

$$P_{0z}(x, y, z) = \frac{1}{2\hat{\eta}} \operatorname{Re} \left(|E_x|^2 - |E_y|^2 \right)$$

векторные компоненты плотности потока света, $E_{x,y,z}$ - компоненты напряженности по трем координатам, $\hat{\eta}$ - волновой импеданс материала.

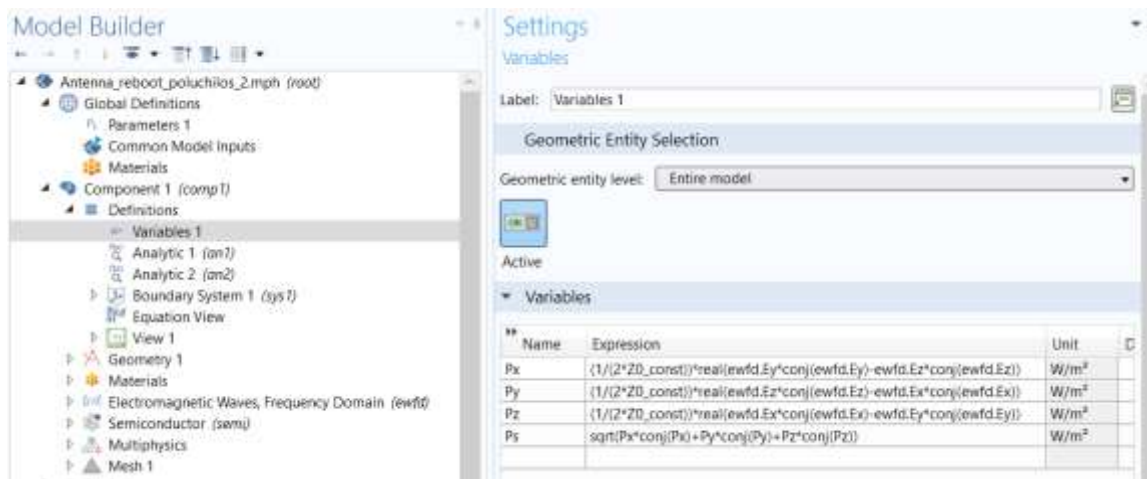


Рисунок 28. Задание переменной P_s - плотность потока и переменных P_x, P_y, P_z в таблице Variables

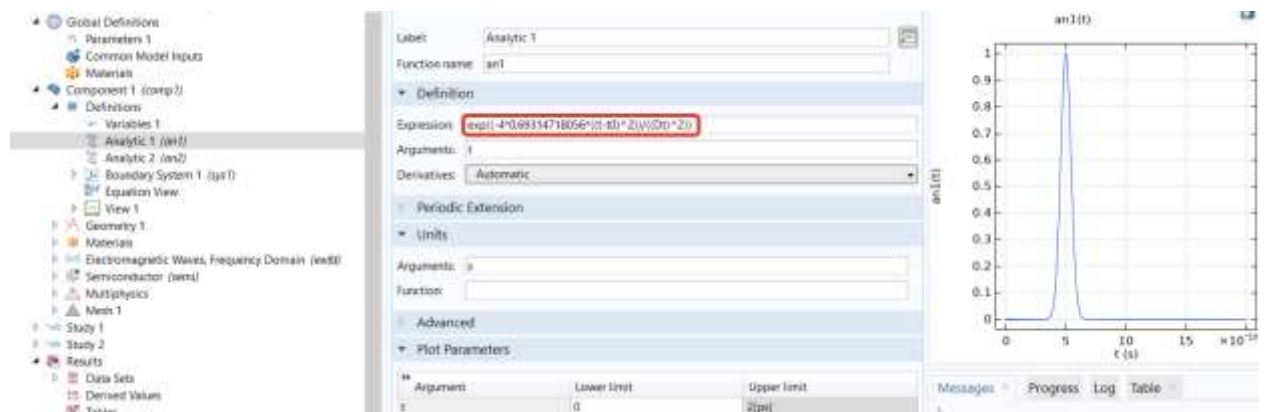


Рисунок 29. Задание временной формы импульса $an1(t)$ в окне ввода Expression

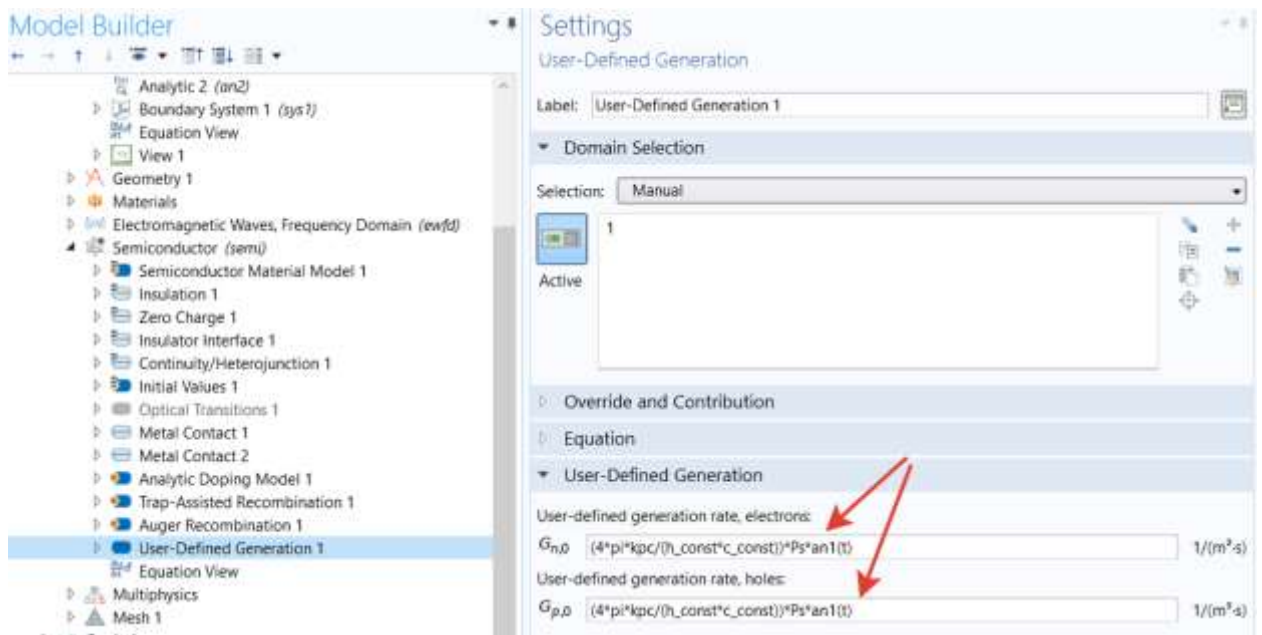


Рисунок 30. Учет фотовозбуждения с помощью инструмента User Defined Generation 1, где в окна ввода $G_{n,0}$ и $G_{p,0}$ вводится формула (14)

В работе Moreno и соавторов [78] продемонстрировано, что учёт мобильности носителей заряда, зависящей от поля, оказывает значительное влияние на результаты численного моделирования ТГц в фотопроводящей антенне через уравнения дрейфа-диффузии. Чтобы учесть это, была использована эмпирический модель Коаги - Томаса для зависимости подвижности электронов и дырок от напряженности поля [86]. Рекомбинация носителей заряда была описана моделями рекомбинации Шоттки - Рида - Холла и Оже рекомбинации.

Для получения результата для сравнения была выбрана следующая сетка разбиения:

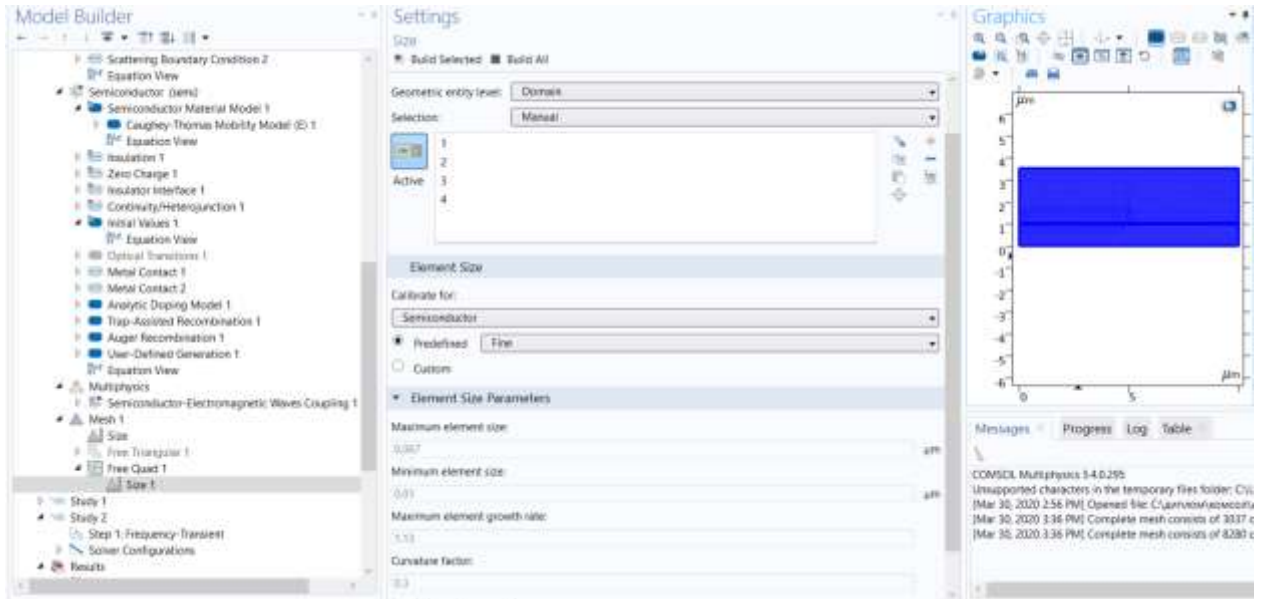


Рисунок 31. Задание сетки во вкладке Mesh 1 с помощью автоматического выбора размеров элементов. На данном этапе выбрана калибровка для физики полупроводников (Calibrated for=> Semiconductor) и выбран размер элемента fine

Для уменьшения времени расчета и устранения ошибок, связанных с начальными условиями, расчет был разделен на два этапа: стационарный- для расчета распределения напряженности электрического поля, и нестационарный- для расчета динамики носителей заряда с заданием в качестве входных в расчет данных результата стационарного расчета:

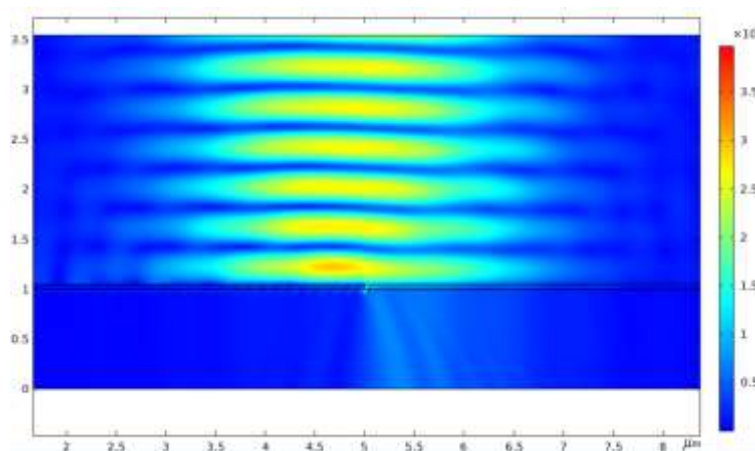


Рисунок 32. Распределение напряженности

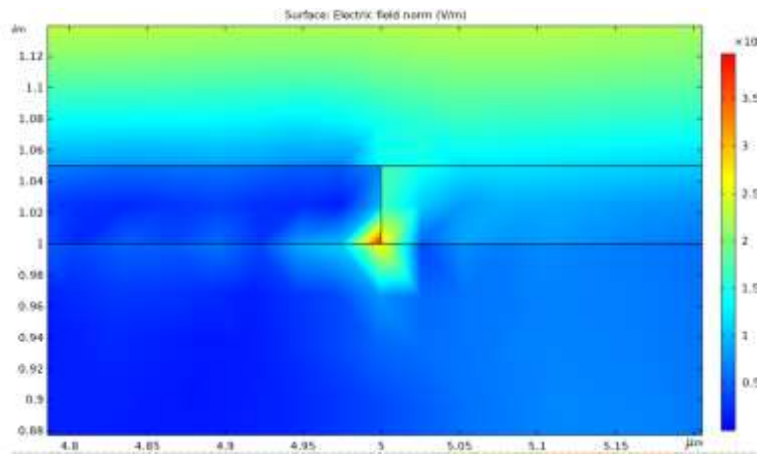


Рисунок 33. Распределение напряженности (увеличенное изображение)

Шаг по времени был выбран 0.001 пс для получения зависимости с высоким разрешением по времени. Далее выводим на экран ток на контакте:

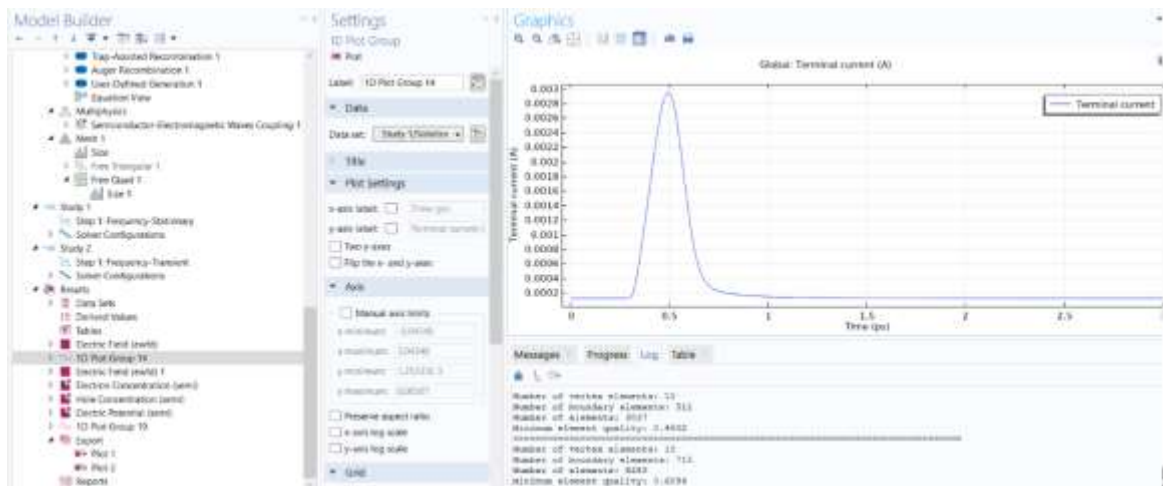


Рисунок 34. Зависимость тока на электроде от времени (Global: Terminal current). Для вызова графика использован инструмент 1D Plot Group в выпадающем списке при нажатии правой конки мыши на Results и выбран Global в выпадающем списке в 1D Plot Group

Временная форма терагерцового импульса получена по формуле:

$$E_{THz}(t) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{A}{z} \frac{d}{dt} J_s(t)$$

где A- площадь освещаемого зазора, z- расстояние от источника.

Полученные расчетные данные коррелируют с полученными данными методом зонда-накачки антенной Menlo TERA8-1, которая используется в качестве генератора в ряде работ [66,87–89] :

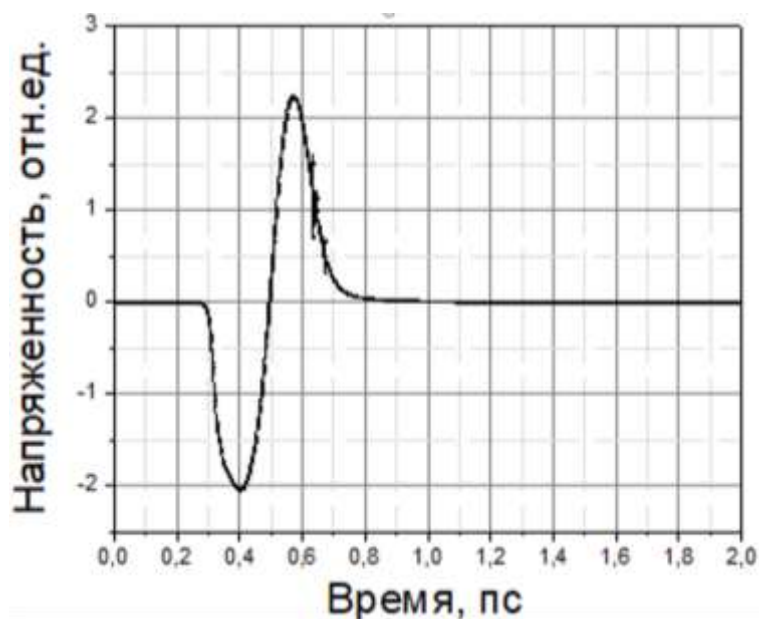


Рисунок 35. Результат моделирования

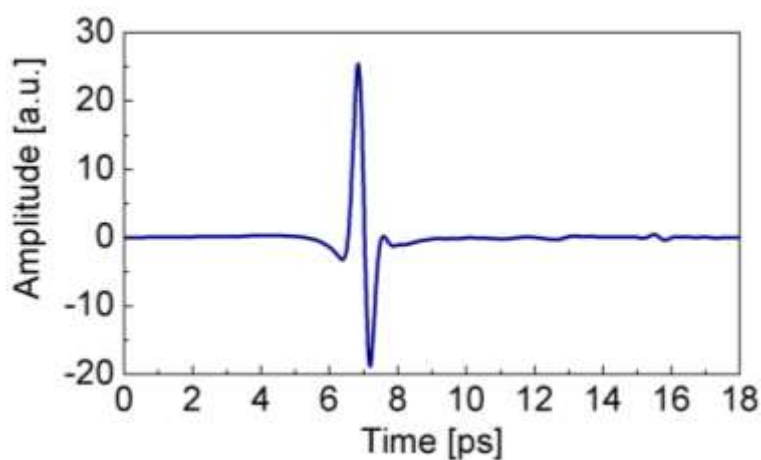


Рисунок 36. ТГц импульс антенны Menlo TERA8-1[90].

Далее для исследования оптимальных характеристик была выбрана более грубая сетка:

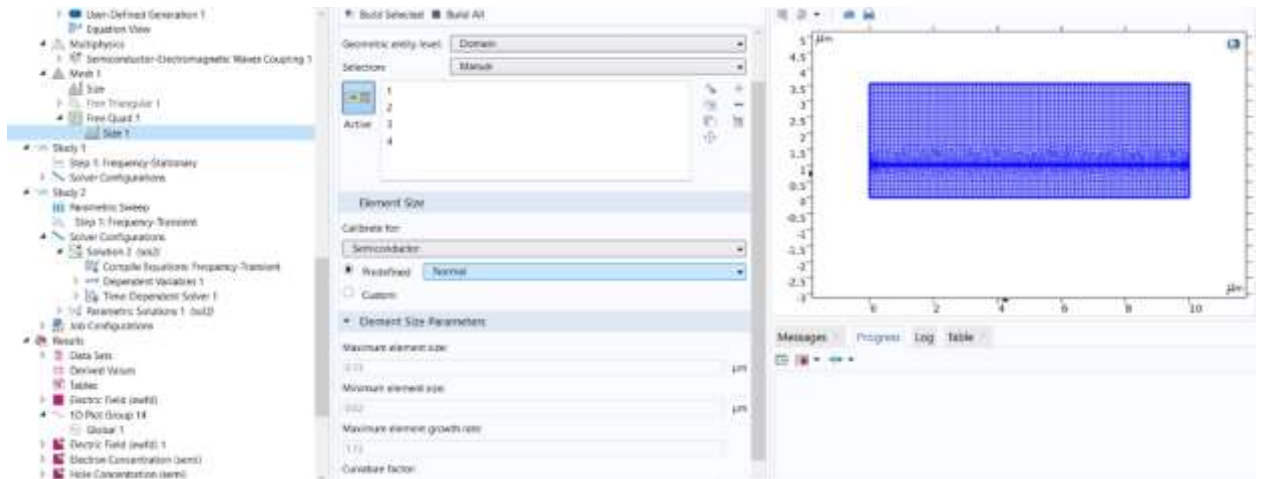


Рисунок 37. Задание сетки. На данном этапе выбран размер Normal

Было исследовано влияние ширины зазора. Из результатов моделирования видно, что с уменьшением зазора с 8 до 3 мкм наблюдается увеличение пика фотоотклика.

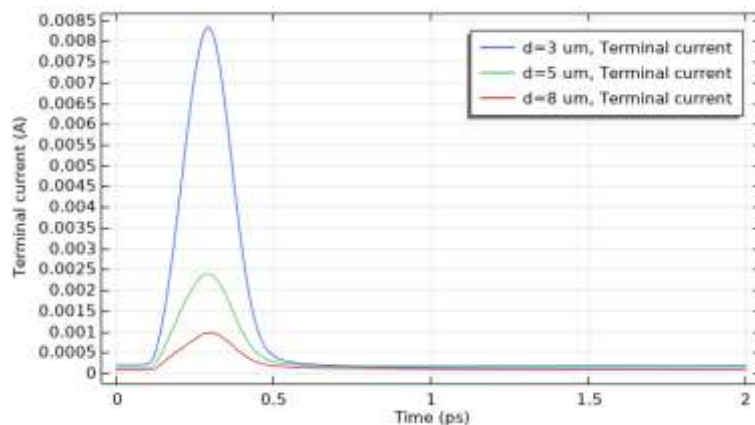


Рисунок 38. Влияние ширины зазора на отклик. Синяя кривая соответствует ширине зазора $d=3$ мкм, зеленая- $d=5$ мкм, красная- 8 мкм.

При создании модели возник вопрос об оптимальной толщине электрода. По результатам моделирования было выявлено, что толщина электрода не влияет на отклик.

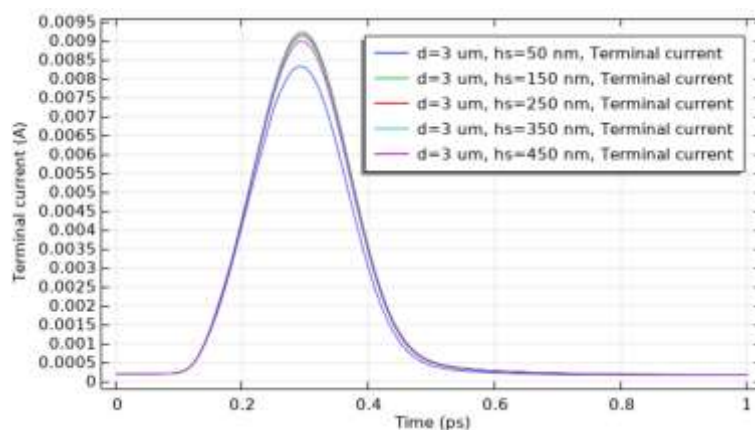


Рисунок 39. Исследование влияния толщины электрода на форму фототока

Дополнительно было проведено исследование влияния полуширины светового пучка на формы тока и терагерцового импульса. Обнаружено, что существует оптимальная полуширина с наибольшим фототоком в пике.

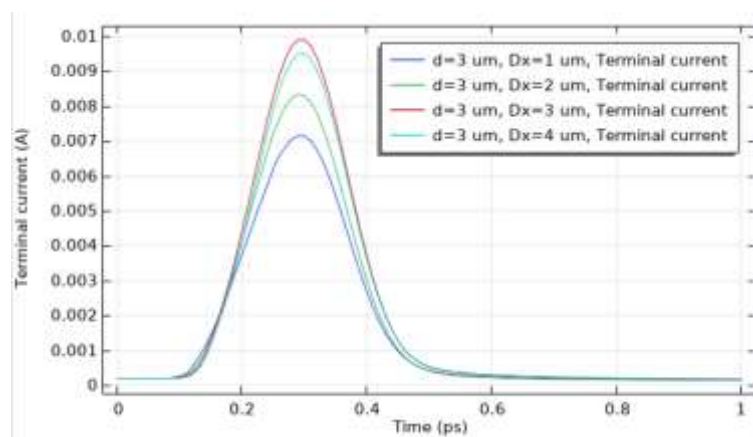


Рисунок 40. Влияние полуширины оптического пучка накачки на фототок

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том что, используя метод компьютерного моделирования процессов генерации переходного тока с последующей оценкой ТГц излучения, является возможным оптимизация геометрических параметров фотопроводящей антенны при прототипировании и создании новых дизайнов.

3.3. Исследование ФПА со сверхрешетчатой структурой и брэгговской решеткой методом спектроскопии во временной области (метод “зонда-накачки”)

Структура сверхрешетчатой антенны с брэгговской решеткой (рис. 21) была выбрана исходя из следующих соображений:

- 1) InGaAs обладает высокой концентрацией носителей заряда (10^{16} см^{-3}) [62,63];
- 2) InAs обладает феноменальной подвижностью по сравнению с другими полупроводниками III-V на основе As [91], что увеличивает переходной ток, тем самым увеличивается мощность ТГц импульса;
- 3) InAlAs проявляет повышенное включение дефектов на которых рекомбинируют носители заряда, связанный с кластеризацией сплава из-за к взаимодействию кинетики поверхности и термодинамики в процессе роста [92], что уменьшает времена жизни электронно-дырочных пар;
- 4) Благодаря тому что упаковки атомов этих полупроводников совпадают и близки параметры решеток, можно получать сверхрешетчатую структуру с уникальными электронными свойствами, которые превосходят отдельно взятые полупроводники;
- 5) Добавление брэгговской решетки, которая выступает в роли полупрозрачного зеркала, в структуру увеличивает поглощение функциональным слоем длин волн в диапазоне с 900 нм и выше [69], что увеличивает количество генерируемых электронно-дырочных пар, тем самым увеличивая мощность импульса;

- б) Буферный слой предназначен для уменьшения механического напряжения между функциональным слоем и подложкой GaAs(100).

Исследование сверхбыстрой динамики спиральной антенны со сверхрешетчатой структурой и брэгговской решеткой проводилось методом зонда- накачки, источником излучения с длиной волны 780 нм выступает эрбиевый волоконный лазер с длительностью импульсов ~90 фс и частотой повторений 70 МГц. Схема эксперимента изображена ниже:

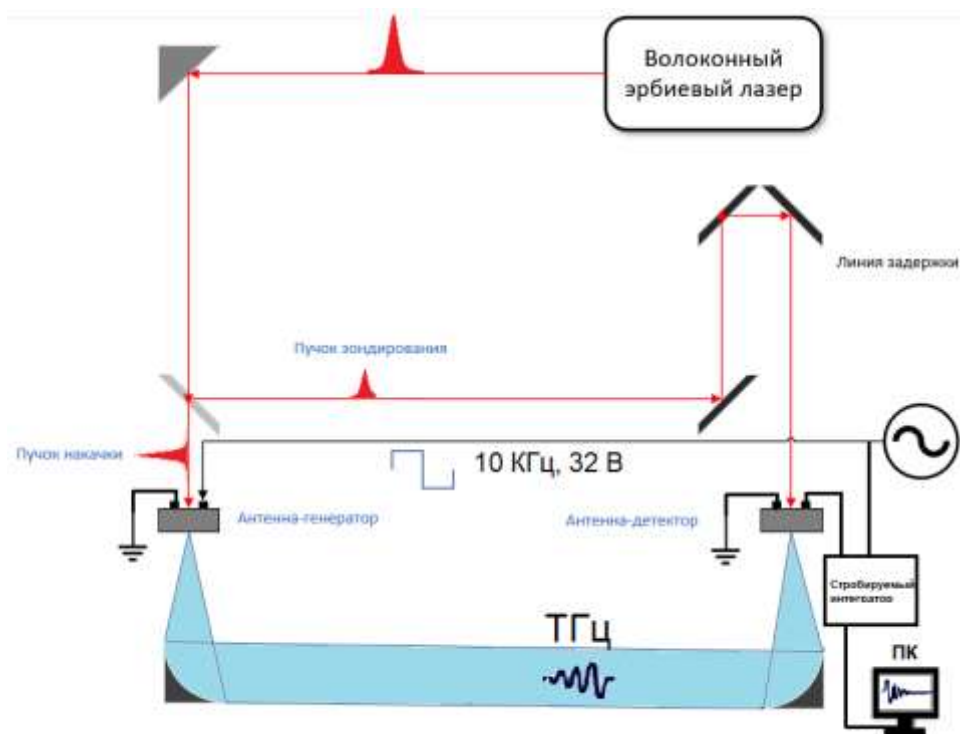


Рисунок 41. Метод накачки- зондирования

Пучок, выходящий из лазера, делится полупрозрачным зеркалом (beam splitter) на два пучка: зонд и накачку. Накачка попадает на антенну-генератор и вызывает генерацию ТГц излучения. Зонд, проходя линию задержки, попадает на антенну-детектор. В качестве генератора выступает антенна Menlo TERA8-1. TERA8-1 представляет собой закрученную дипольную структуру на основе выращенного при низкой температуре арсениде галлия (LT-GaAs). Исследуемая спиральная антенна со сверхрешетчатой структурой

и брэгговской решеткой использовалась в качестве детектора. В схеме с полупроводниковой ФПА принцип детектирования ТГц излучения основан на методе электрооптического стробирования широкого терагерцевого импульса короткими фемтосекундными импульсами. Принцип работы основан на возбуждении зондом носителей заряда и модуляции напряжения между электродами терагерцевой волной. Сканирование фазы терагерцевой волны осуществляется с помощью временной линии задержки. Интеграл по току (т.е. заряд), протекший между электродами после возбуждения зондом, пропорционален напряженности поля терагерцевого импульса в момент прихода зонда. Сигнал с электродов подается на стробируемый интегратор для усиления. В результате проведенного измерения была получена временная форма ТГц импульса при средней мощности накачки 10 mW, зарегистрированного исследуемым образцом:

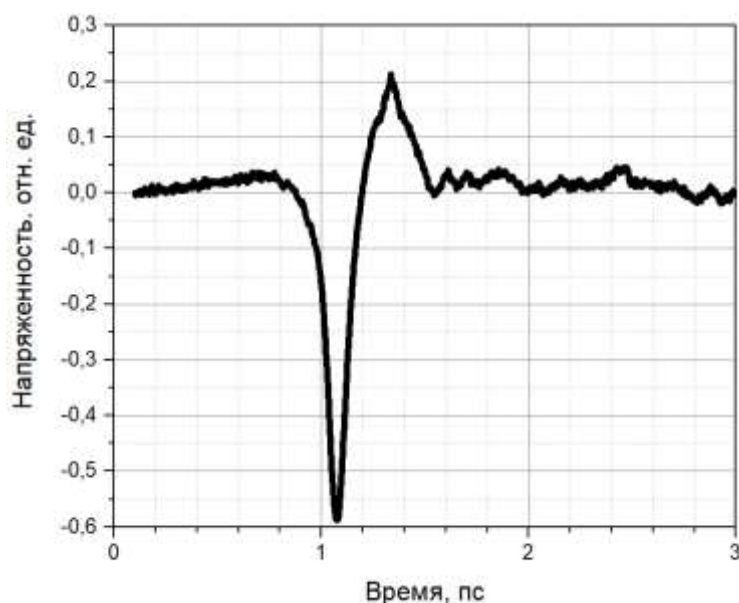


Рисунок 42. ТГц импульс при 10 mW

На рисунке 42 видно, что генерация носителей заряда в нашей антенне происходит достаточно быстро (с 0,9 пс по 1,2 пс на рис. 42), однако последующая релаксация происходит медленнее. Сравнивая

экспериментальную кривую с расчетом, выявлена схожесть форм импульсов(рис. 43):

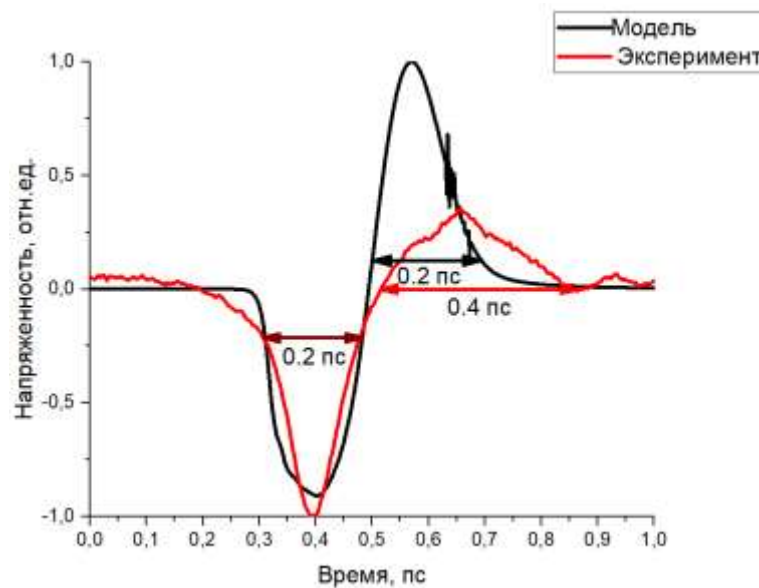


Рисунок 43. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

При сравнении результата эксперимента с моделированием видно, что время генерации у антенны и модели сравнимы между собой ($\sim 0,2$ пс), однако времена релаксации отличаются примерно в два раза ($\sim 0,4$ пс и $\sim 0,2$ пс), что влечет за собой растяжению во времени импульса ТГц и уменьшение спектра пропускания. Возможно, это следствие задержки электронов в квантовой яме в слое InAs без возможности рекомбинации на границе со слоем InAlAs[56,68].

Для исследования спектра пропускания антенной было применено Фурье-преобразование для перехода из временной области в частотную. В результате было получено разложение в спектр ТГц сигнала:

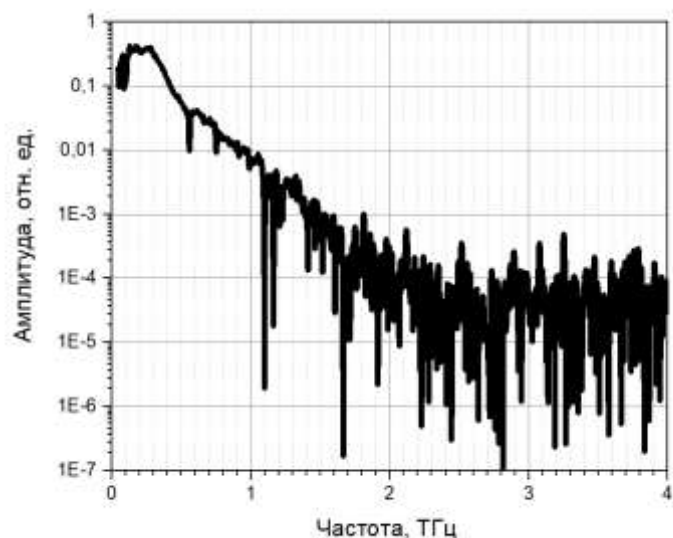


Рисунок 44. Частотный спектр ТГц- импульса при 10 mW накачки, полученный методом Фурье-преобразования

На рисунке 44 видно, что полоса пропускания исследуемой антенны ограничена значением $\sim 1,5$ ТГц при максимуме в диапазоне от 0,1 до 0,3 ТГц. Данный результат хуже чем полосы пропускания, полученные похожими антеннами[48,62,65,68,93], однако, учитывая среднюю мощность накачки 10 mW, при частотах в диапазоне от 0,1 до 0,3 ТГц сигнал превосходит уровень шумов на 3 порядка (рисунок 45):

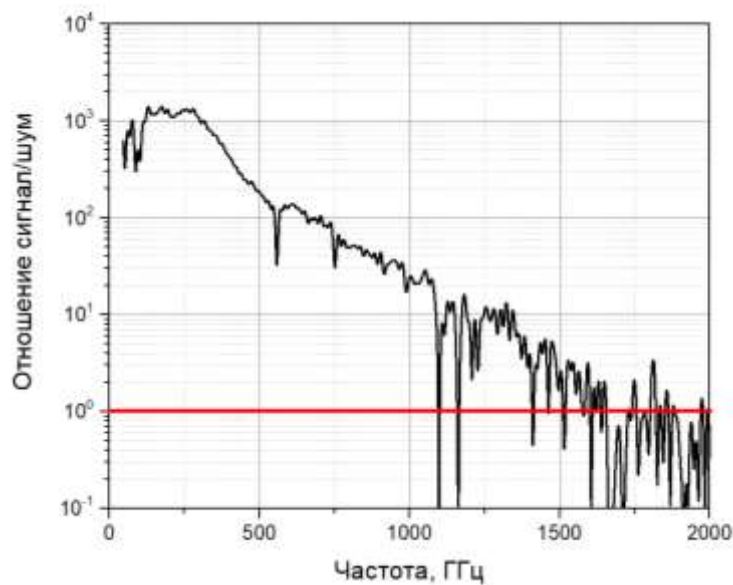


Рисунок 45. Отношение сигнал/шум при различных частотах. Видно, что диапазон регистрируемых частот ограничен значением примерно 1,5 ТГц, а максимальное отношение сигнала к шуму достигается в диапазоне от 0,1 до 0,3 ТГц

4. Выводы

По результатам выпускной квалификационной работы бакалавра были сделаны следующие выводы:

1. По результатам моделирования распределения электрического поля в сверхрешетчатой структуре с брэгговской решеткой и без выявлено, что внедрение брэгговского отражателя в антенну увеличивает поглощение. Отношение поглощения в этих структурах достигает отметки 1,75.
2. На примере модели антенны с планарными электродами были проведены исследования влияния зазора между электродами, толщины электрода и ширины пучка лазерной накачки на временную форму фототока. Данные результаты можно использовать при изготовлении фотопроводящих антенн для получения наиболее эффективных изделий,

что позволит в дальнейшем обходиться без прототипирования. По результатам моделирования следующие выводы:

- 1) Уменьшение зазора с 8 до 3 мкм приводит к увеличению максимального значения тока в 8,3 раза.
- 2) Толщина электрода не влияет на временную форму импульса фототока.
- 3) Наблюдается локальный максимум переходного тока при полуширине падающего гауссового пучка накачки равной 3 мкм.
3. Была выявлена корреляция между моделью и экспериментальными данными, что говорит о применимости модели. Для свехрешчатых фотопроводящих антенн моделирование годится для оценки параметров излучения.
4. Исследованная антенна имеет полосу пропускания 1,5 ТГц с отношением сигнал/шум, равный 10^3 , в диапазоне от 0,1 до 0,3 ТГц при средней мощности накачки 10 mW.

Благодарю институт общей физики российской академии наук ИОФ РАН и его сотрудников за предоставленную возможность проведения эксперимента.

5. Экономический раздел

5.1. Разработка бизнес-плана проекта

5.1.1. Описание созданного продукта (товара)

В данной выпускной квалификационной работе моделировались процессы излучения в антенне со свехрешётчатой структурой с учетом брэгговской решетки. Было показано, что данная модель позволяет оценивать параметры антенн с оптимальными выходными характеристиками в случае пленки с усредненными характеристиками.

5.1.2. Анализ рынка сбыта

Результаты моделирования можно использовать для создания передовых терагерцевых фотопроводящих антенн, которые, в свою очередь применяются в многих областях: визуализации, спектроскопии (обнаружение взрывчатых веществ и вредных газов), неdestructивного контроля в промышленности, медицине и фармакологии и др.

5.1.3. Конкурентоспособность созданного продукта (товара)

Фотопроводящие антенны со сверхрешетчатой структурой с брэгговской решеткой имеют лучшее поглощение на 800 нм по сравнению с другими антеннами, что увеличивает эффективность оптико-терагерцевого преобразования.

5.1.4. План маркетинга

Маркетинговые мероприятия по продвижению товара:

1. Выступления на научных конференциях с устными и стендовыми докладами;
2. Публикации в научных изданиях.

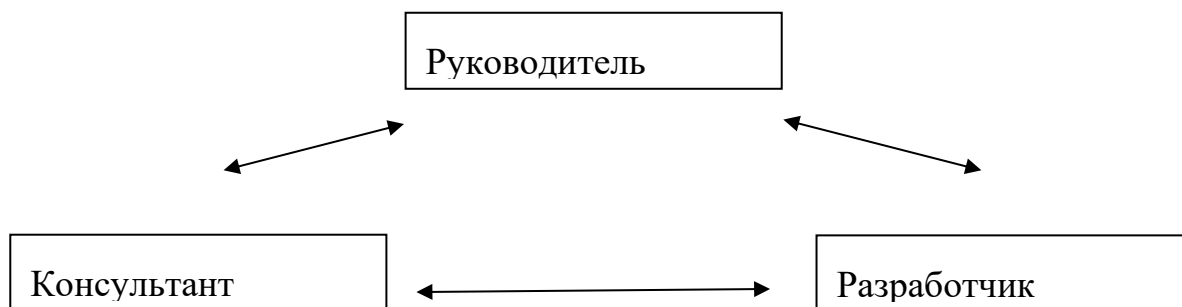
5.2. Организация и планирование работ по теме

В составе работы задействовано 3 человека:

- 1) руководитель (руководитель выпускной квалификационной работы) – отвечает за грамотную постановку задачи, контролирует отдельные этапы работы, вносит необходимые коррективы и оценивает выполненную работу в целом;
- 2) консультант (консультант по экономической части ВКР) – отвечает за консультирование экономической части выпускной квалификационной работы;

3) разработчик (Студент 4-го курса) – реализация всех поставленных задач, в том числе проведение тестирования готового продукта и подготовка проектной документации.

Состав задействованных в работе участников представлен на схеме.



5.2.1. Организация работ

На разработку отводится 100 рабочих дней.

Этапы разработки представлены в таблице 1.

№	Название этапа	Исполнитель	Трудоемкость, чел/дни	Продолжительность работ, дни
1	Разработка и утверждение технического задания	Руководитель	7	7
		Разработчик	7	
2	Технические предложения	Руководитель	7	7
		Разработчик	7	

3	Эскизный проект:	Разработчик	9	21
3.1	Анализ исходных данных и требований	Разработчик	5	
3.2	Постановка задачи	Руководитель	2	
3.3	Разработка общего описания алгоритма функционирования	Разработчик	7	
4	Технический проект:	Руководитель	2	15
4.1	Определение формы представления входных и выходных данных	Разработчик	5	
		Руководитель	2	
		Разработчик	10	
5	Рабочий проект:	Разработчик	24	50

5.1	Моделирование и отладка модели	Разработчик	4	
5.2	Испытание модели	Разработчик	5	
5.3	Корректировка модели по результатам испытаний	Разработчик	3	
5.4	Подготовка технической документации на программный продукт	Разработчик	7	
		Руководитель	2	
5.5	Сдача готового продукта	Разработчик	7	
				100

5.2.2. График проведения работ

Календарный график исполнения работы представлен на рисунке 46. Из рисунка 46 так же видно, что общий срок разработки составит 100 дней.

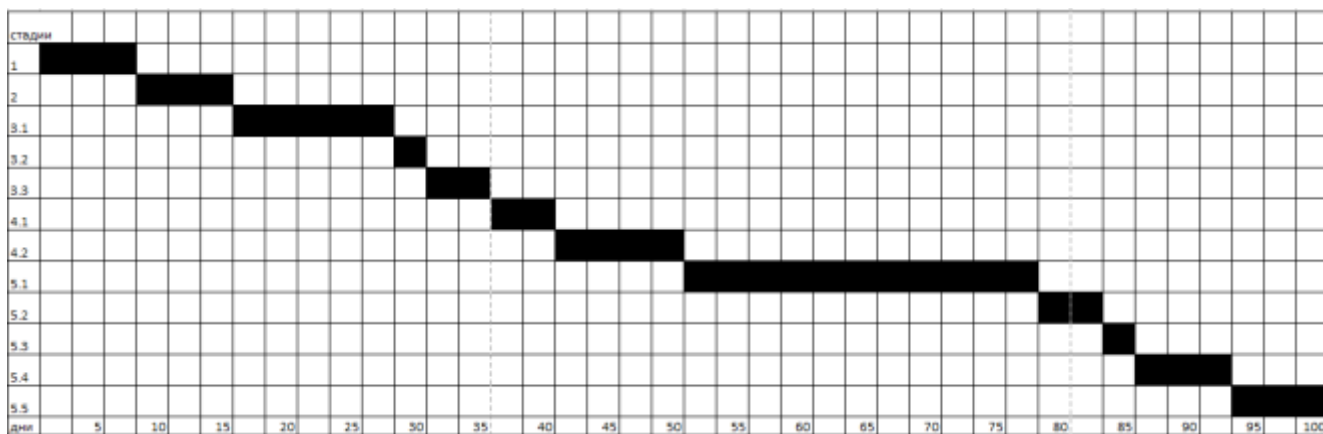


Рисунок 46. Календарный план

5.3. Расчёт стоимости проведения работ

В выпускной квалификационной работе объем затрат на НИР и ОКР был проведен методом калькулирования.

1 статья «Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты».

№ пп	Наименование материалов	Единицы измерения	Количество	Цена за единицу (руб)	Стоимость (руб)
1	2	3	4	5	6
1	Флешка 16Гб	шт	1	600	600
2	Бумага А 4	пачка	1	300	300
3	Картридж для принтера	шт	1	1250	1250
4	Ручка	шт	10	17	170

5	Карандаш	шт	10	10	100
Итого материалов					2 420
Транспортно-заготовительные расходы					600
Итого					3 020

2 статья «Специальное оборудование»

Затрат нет.

3 статья «Основная заработная плата»

Расчет основной заработной платы

№ пп	Наименован ие этапа	Исполнитель (должность)	Мес. оклад (руб)	Трудоемк ость (чел/дни)	Оплата за день (руб)	Оплата за этап (руб)
1	2	3	4	5	6	7
1	ТЗ	Руководитель	40 000	7	1818	12726
		Разработчик	29 000	7	1318	9226
2	ТП	Руководитель	40 000	7	1818	12726
		Разработчик	29 000	7	1318	9226
3	Эскизный проект	Руководитель	40 000	2	1818	3636
		Разработчик	29 000	21	1318	27678
4	Технический проект	Разработчик	29 000	15	1318	19770
		Руководитель	40 000	4	1818	7272

5	Рабочий проект	Разработчик	29 000	50	1318	65900
		Руководитель	40 000	4	1818	7272
Всего						175432

4 статья «Дополнительная заработная плата»

Дополнительная заработная плата научного и производственного персонала составляет по проекту 52629 руб.

5 статья «Страховые отчисления»

Отчисления на социальные нужды составляют 68418.5 руб.

6 статья «Командировочные расходы»

Расходы по данному разделу отсутствуют.

7 статья «Контрагентские услуги»

В процессе разработки данного проекта услуги сторонних организаций не использовались.

8 статья «Накладные расходы»

Накладные расходы по проекту составили 456 123.2 руб.

9 статья «Прочие расходы»

По статье «прочие расходы» затрат нет.

Полная себестоимость проекта

№ пп	Номенклатура статей расходов	Затраты (руб)
1	2	3
1	Материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)	3 020
2	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	-
3	Основная заработная плата научного и производственного персонала	175432
4	Дополнительная заработная плата научного и производственного персонала	52629
5	Страховые взносы в социальные фонды	68418.5
6	Расходы на научные и производственные командировки	-
7	Оплата работ, выполненных сторонними организациями и предприятиями	-

8	Накладные расходы	456123.2
9	Прочие прямые расходы	
Итого		755622,7

Норма прибыли составляет 20-30% от расчета полной себестоимости проекта (стоимости разработки).

Прибыль равна: $\Pi = 755622,7 \times 0.3 = 226686,8$ руб.

Если разработка ведется для коммерческой организации, то данный вид работы облагается налогом на добавочную стоимость (НДС) в размере 20%:

$\text{НДС} = (755622,7 + 226686,8) \times 0.20 = 196461,9$ руб.

Таким образом, формула договорной цены будет представлять собой:

$\text{ДЦ} = \text{ОЦ} + \text{НДС} = 982309,51 + 196461,9 = 1178771,4$ руб.

Договорная цена выполненной работы составила 1 178 771,4 руб.

5.4. Оценка экономической целесообразности проведения работ по теме

Результатом данной выпускной квалификационной работы является получение новых научных данных, отражающих прирост информации, предназначенной для дальнейшего «внутринаучного» потребления.

Полученные результаты можно использовать в разработке передовых излучателей.

В данной главе выпускной квалификационной работы рассматривалось технико-экономическое обоснование работы. Была рассмотрена организация и планирование работ. Произведен расчет затрат на выполнение темы.

Итоговая договорная цена составила 1 178 771,4 руб. Итоговое количество дней, потраченных на выполнение всех задач, составило 100 рабочих дней. Анализ рынка сбыта показал необходимость исследуемых материалов в различных областях науки и техники.

6. Список литературы

1. Arora N., Sengupta A., Bandyopadhyay A. MODELING AND OPTIMIZATION OF TERAHERTZ-PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA (THz-PCA).
2. Fattering C., Grischkowsky D. Terahertz beams // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54, № 6. P. 490–492.
3. Nahata A., Weling A.S., Heinz T.F. A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69, № 16. P. 2321–2323.
4. Fülöp J.A. et al. Design of high-energy THz sources based on optical rectification // Proc. - TERA-MIR 2009, NATO Adv. Res. Work. Terahertz Mid Infrared Radiat. Basic Res. Pract. Appl. 2009. Vol. 18, № 12. P. 21–22.
5. Tonoichi M. Cutting-edge terahertz technology // Nat. Photonics. 2007. Vol. 1. P. 97–105.
6. Ajito K., Ueno Y. THz chemical imaging for biological applications // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2011. Vol. 1, № 1. P. 293–300.
7. Mc Intosh A.I. et al. Terahertz spectroscopy: A powerful new tool for the chemical sciences? // Chem. Soc. Rev. 2012. Vol. 41, № 6. P. 2072–2082.
8. Bat inspires space tech for airport security.

9. Markelz A.G., Roitberg A., Heilweil E.J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and. 2000. № March. P. 42–48.
10. Luo Y., Gelmont L., Woolard D.L. Bio-molecular devices for terahertz frequency. 2007.
11. Ebbinghaus S. et al. Protein Sequence- and pH-Dependent Hydration Probed by Terahertz Spectroscopy. 2008. № Figure 1. P. 2374–2375.
12. Korter T.M. et al. Terahertz spectroscopy of solid serine and cysteine. 2006. Vol. 418. P. 65–70.
13. Leahy-hoppa M.R., Fitch M.J. Terahertz spectroscopy techniques for explosives detection. 2009. P. 247–257.
14. Hoshina H. Noninvasive mail inspection using terahertz radiation // SPIE Newsroom. 2009. P. 3–5.
15. Woodward R.M. et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING PHYSICS IN MEDICINE Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue // Biol. Phys. Med. Biol. 2002. Vol. 47. P. 3853–3863.
16. Nakajima S. et al. Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique // aip.scitation.org. 2007. Vol. 90, № 4.
17. Ueno Y., Song H.-J., Tamechika E. Terahertz Spectroscopic Imaging of Polymorphic Forms in Pharmaceutical Crystals // Taylor Fr. 2011. Vol. 538. P. 33–38.
18. Wang S., Zhang X.C. Pulsed terahertz tomography // J. Phys. D. Appl. Phys. 2004. Vol. 37, № 4.
19. Pawar A.Y. et al. Terahertz technology and its applications // Drug Invent. Today. 2013. Vol. 5, № 2. P. 157–163.
20. Federici J.F. et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // Semicond. Sci. Technol. 2005. Vol. 20, № 7. P. S266–S280.

21. Liu H.-B. et al. Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications // Proc. IEEE. 2007. Vol. 95, № 8. P. 1514–1527.
22. Appleby R., Wallace H.B. Standoff Detection of Weapons and Contraband in the 100 GHz to 1 THz Region // IEEE Trans. Antennas Propag. 2007. Vol. 55, № 11. P. 2944–2956.
23. Semenova V., Bepalov V. Terahertz Technologies // Photonics. 2015. Vol. 51, № 3. P. 126–141.
24. Cherry S. Edholm's law of bandwidth // IEEE Spectr. 2003. Vol. 41, № 7. P. 58–60.
25. Виокуров Н.А. Лазеры на свободных электронах.
26. Bosco L. et al. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics Inc., 2019. Vol. 115, № 1. P. 010601.
27. Burford N.M., El-Shenawee M.O. Review of terahertz photoconductive antenna technology // Opt. Eng. 2017. Vol. 56, № 1. P. 010901.
28. Benicewicz P.K., Roberts J.P., Taylor A.J. Scaling of terahertz radiation from large-aperture biased photoconductors // J. Opt. Soc. Am. B. 1994. Vol. 11, № 12. P. 2533.
29. Zhang X.-C., Xu J. Generation and Detection of THz Waves // Introduction to THz Wave Photonics. Boston, MA: Springer US, 2010. P. 27–48.
30. Bjarnason J.E. et al. ErAs:GaAs photomixer with two-decade tunability and 12 μ W peak output power // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85, № 18. P. 3983–3985.
31. Brown E.R. et al. Milliwatt output levels and superquadratic bias dependence in a low-temperature-grown GaAs photomixer // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 64, № 24. P. 3311–3313.
32. Preu S. et al. Tunable, continuous-wave Terahertz photomixer sources and applications // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109, № 6. P. 061301.
33. Gu P. et al. Study of terahertz radiation from InAs and InSb // J. Appl. Phys.

2002. Vol. 91, № 9. P. 5533–5537.
34. Ponomarev D.S. et al. Intensive Terahertz Radiation from In_xGa_{1-x}As due to Photo-Dember Effect // *Int. J. High Speed Electron. Syst.* 2016. Vol. 25, № 03n04. P. 1640023.
 35. Klatt G. et al. Terahertz emission from lateral photo-Dember currents // *Opt. Express.* 2010. Vol. 18, № 5. P. 4939.
 36. Smith F.W. et al. Picosecond GaAs-based photoconductive optoelectronic detectors // *Appl. Phys. Lett.* 1989. Vol. 54, № 10. P. 890–892.
 37. Loka H.S., Benjamin S.D., Smith P.W.E. Optical characterization of low-temperature-grown GaAs for ultrafast all-optical switching devices // *IEEE J. Quantum Electron.* 1998. Vol. 34, № 8. P. 1426–1437.
 38. Shen Y.C. et al. Ultrabroadband terahertz radiation from low-temperature-grown GaAs photoconductive emitters // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 83, № 15. P. 3117–3119.
 39. Zhang X.-C., Auston D.H. Optoelectronic measurement of semiconductor surfaces and interfaces with femtosecond optics // *J. Appl. Phys.* 1992. Vol. 71, № 1. P. 326–338.
 40. Berry C.W. et al. Significant performance enhancement in photoconductive terahertz optoelectronics by incorporating plasmonic contact electrodes // *Nat. Commun.* 2013. Vol. 4, № 1. P. 1622.
 41. Yardimci N.T. et al. High-Power Terahertz Generation Using Large-Area Plasmonic Photoconductive Emitters // *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2015. Vol. 5, № 2. P. 223–229.
 42. Berry C.W., Hashemi M.R., Jarrahi M. Generation of high power pulsed terahertz radiation using a plasmonic photoconductive emitter array with logarithmic spiral antennas // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104, № 8. P. 081122.
 43. Castro-Camus E. et al. An ion-implanted InP receiver for polarization resolved terahertz spectroscopy // *Opt. Express.* 2007. Vol. 15, № 11. P.

7047.

44. Mangeney J. THz Photoconductive Antennas Made From Ion-Bombarded Semiconductors // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2012. Vol. 33, № 4. P. 455–473.
45. Krotkus A. Semiconductors for terahertz photonics applications // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2010. Vol. 43, № 27. P. 273001.
46. Suzuki M., Tonouchi M. Fe-implanted InGaAs terahertz emitters for 1.56 μm wavelength excitation // *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86, № 5. P. 051104.
47. Schwagmann A. et al. Terahertz emission characteristics of ErAs:InGaAs-based photoconductive antennas excited at 1.55 μm // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96, № 14. P. 141108.
48. Globisch B. et al. Iron doped InGaAs: Competitive THz emitters and detectors fabricated from the same photoconductor // *J. Appl. Phys.* 2017. Vol. 121, № 5. P. 053102.
49. Globisch B. et al. Carrier dynamics in Beryllium doped low-temperature-grown InGaAs/InAlAs // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104, № 17. P. 172103.
50. Brozel M. Gallium Arsenide // *Springer Handb. Electron. Photonic Mater.* Boston, MA: Springer US, 2006. P. 499–536.
51. Milnes A.G., Polyakov A.Y. Indium arsenide: a semiconductor for high speed and electro-optical devices // *Mater. Sci. Eng. B*. 1993. Vol. 18, № 3. P. 237–259.
52. Galiev G.B. et al. Structural and electrophysical properties of In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{0.52}Al_{0.48}As/InP HEMT nanoheterostructures with different combinations of InAs and GaAs inserts in quantum well // *Crystallogr. Reports*. 2015. Vol. 60, № 3. P. 397–405.
53. Li E.H. Material parameters of InGaAsP and InAlGaAs systems for use in quantum well structures at low and room temperatures // *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures*. Elsevier Sci B.V., 2000. Vol. 5, № 4. P. 215–273.

54. Blakemore J.S. Semiconducting and other major properties of gallium arsenide // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53, № 10. P. R123–R181.
55. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys // J. Appl. Phys. American Institute of Physics Inc., 2001. Vol. 89, № 11 I. P. 5815–5875.
56. Akazaki T. et al. Improving the mobility of an In_{0.52}Al_{0.48}As/In_{0.53}Ga_{0.47}As inverted modulation-doped structure by inserting a strained InAs quantum well // Appl. Phys. Lett. 1994. Vol. 65, № 10. P. 1263–1265.
57. Srivastava A. et al. Pressure induced phase transformation and electronic properties of AlAs // Mater. Chem. Phys. 2011. Vol. 125, № 1–2. P. 66–71.
58. Razeghi M. et al. Very high purity InP epilayer grown by metalorganic chemical vapor deposition // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics AIP, 1988. Vol. 52, № 2. P. 117–119.
59. Yeo W. et al. Material properties of bulk InGaAs and InAlAs/InGaAs heterostructures grown on (111)B and (111)B misoriented by 1° towards $\langle 211 \rangle$ InP substrates // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics Inc., 2000. Vol. 77, № 26. P. 4292–4294.
60. Goetz K.H. et al. Optical and crystallographic properties and impurity incorporation of Ga_xIn_{1-x}As (0.44 < x < 0.49) grown by liquid phase epitaxy, vapor phase epitaxy, and metal organic chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. American Institute of Physics Publishing LLC, 1983. Vol. 54, № 8. P. 4549–4552.
61. Medisetty S.J., Dutta P. Performance analysis of junctionless double gate MOSFET using Silicon and In_{0.53}Ga_{0.47}As // International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. P. 991–995.
62. Dietz R.J.B. et al. 64 μw pulsed terahertz emission from growth optimized InGaAs/InAlAs heterostructures with separated photoconductive and trapping regions // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103, № 6. P. 1–5.

63. Künzel H. et al. Material properties of Ga_{0.47}In_{0.53}As grown on InP by low-temperature molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1992. Vol. 61, № 11. P. 1347–1349.
64. Kawamura Y., Nakashima K., Asahi H. Improvements of electrical and optical properties of InAlAs grown by molecular beam epitaxy // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 58, № 8. P. 3262–3264.
65. Mittendorff M. et al. Large area photoconductive terahertz emitter for 1.55 μm excitation based on an InGaAs heterostructure // *Nanotechnology.* 2013. Vol. 24, № 21.
66. Hänsel W. et al. All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation // *Appl. Phys. B Lasers Opt.* Springer Berlin Heidelberg, 2017. Vol. 123, № 1. P. 1–6.
67. Sala K.L., Kenny-Wallace G.A., Hall G.E. CW Autocorrelation Measurements of Picosecond Laser Pulses // *IEEE J. Quantum Electron.* 1980. Vol. 16, № 9. P. 990–996.
68. Vieweg N. et al. Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range // *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves.* Springer New York LLC, 2014. Vol. 35, № 10. P. 823–832.
69. Han L. 1D Photonic Crystals : Principles and Applications in Silicon Photonics 1D Photonic Crystals : Principles and Applications in Silicon Photonics.
70. Joannopoulos J.D., Meade R.D., Winn J.N. Photonic Crystals: Molding The Flow Of Light. 1995.
71. Adachi S. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Al_xGa_{1-x}As, and In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} // *J. Appl. Phys.* 1989. Vol. 66, № 12. P. 6030–6040.
72. Huang Y. et al. Surface Optical Rectification from Layered MoS₂ Crystal by THz Time-Domain Surface Emission Spectroscopy // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017. Vol. 9, № 5. P. 4956–4965.

73. Operation and Service Manual, Model SR830, DSP Lock-In Amplifier // Stanford Res. Syst. 1993.
74. Луферов. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ // СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018.
75. Оменетто Н. Аналитическая лазерная спектроскопия // Мир. 1982.
76. Burford N., El-Shenawee M. Computational modeling of plasmonic thin-film terahertz photoconductive antennas // J. Opt. Soc. Am. B. 2016. Vol. 33, № 4. P. 748.
77. Burford N., El-Shenawee M. Modeling of plasmonic terahertz antennas using COMSOL® multiphysics // IEEE Antennas Propag. Soc. AP-S Int. Symp. 2015. Vol. 2015-Octob. P. 2107–2108.
78. Moreno E. et al. Time-domain numerical modeling of THz photoconductive antennas // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. 2014. Vol. 4, № 4. P. 490–500.
79. Criollo C.A., Ávila A. Simulation of photoconductive antennas for terahertz radiation // Ing. e Investig. 2015. Vol. 35, № 1. P. 60–64.
80. Isaac J., Batista S. Optical Response Analysis of THz Photoconductive Antenna Using COMSOL Multiphysics. 2019.
81. Adachi S. Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, Al_xGa_{1-x}As, and In_{1-x}Ga_xAs yP_{1-y} // J. Appl. Phys. American Institute of Physics AIP, 1989. Vol. 66, № 12. P. 6030–6040.
82. Dinges H.W. et al. Refractive indices of InAlAs and InGaAs/InP from 250 to 1900 nm determined by spectroscopic ellipsometry // Appl. Surf. Sci. 1992. Vol. 54, № C. P. 477–481.
83. Емельянов В.М. et al. Оптические свойства InGaAs/InAlAs метаморфных наногетероструктур для фотопреобразователей лазерного

- и солнечного излучения // Журнал Технической Физики. 2018. Vol. 44, № 19. P. 50.
84. Sweigart D.A., Hayden L.M. Designing and Simulating THz Waveguide Devices using Finite Element Techniques. 2013. Vol. 5858, № Figure 2. P. 21250.
 85. Chuang S.L. Physics of Photonic Devices // Book. 2nd Editio. Wiley, 2009. 1–841 p.
 86. Sotoodeh M., Khalid A.H., Rezazadeh A.A. Empirical low-field mobility model for III-V compounds applicable in device simulation codes // J. Appl. Phys. 2000. Vol. 87, № 6. P. 2890–2900.
 87. Wilk R. et al. OSCAT: Novel technique for time-resolved experiments without moveable optical delay lines // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2011. Vol. 32, № 5. P. 596–602.
 88. Hochrein T. et al. Optical sampling by laser cavity tuning // Opt. Express. 2010. Vol. 18, № 2. P. 1613.
 89. Smith R. et al. Design and fabrication of ultrasonic transducers with nanoscale dimensions // J. Phys. Conf. Ser. 2011. Vol. 278, № 1. P. 0–4.
 90. MenloSystems, TERA8-1 Photoconductive Antenna [Electronic resource]. URL: <https://www.menlosystems.com/de/products/thz-antennas-and-components/tera8-1/>.
 91. Harman T.C., Goering H.L., Beer A.C. Electrical properties of n-type InAs // Phys. Rev. 1956. Vol. 104, № 6. P. 1562–1564.
 92. Oh J.E. et al. The dependence of the electrical and optical properties of molecular beam epitaxial In_{0.52}Al_{0.48}As on growth parameters: Interplay of surface kinetics and thermodynamics // J. Electron. Mater. 1990. Vol. 19, № 5. P. 435–441.
 93. Jooshesh A. et al. Plasmon-enhanced LT-GaAs/AlAs heterostructure photoconductive antennas for sub-bandgap terahertz generation // Opt. Express. The Optical Society, 2017. Vol. 25, № 18. P. 22140.

94. Гавриленко Т.Ю., Григоренко О.В., Ткаченко Е.К. Корпоративная экономика и финансы. М.: РУСАЙНС, 2016-125с.
95. Григоренко О.В., Садовнича И.О., Мыльникова А. Экономика предприятия и управление организацией М.: РУСАЙНС, 2017-235с.
96. Методические рекомендации по выполнению организационно-экономической части выпускных квалификационных работ [Электронный ресурс]: метод. указания / Т. Ю. Гавриленко, О. В. Григоренко, Е. К. Ткаченко. — М.: РТУ МИРЭА, 2019. — Электрон. опт. диск (ISO)