

На правах рукописи



Махов Иван Сергеевич

**Примесная люминесценция терагерцового диапазона
в квантовых ямах GaAs/AlGaAs
при межзонном оптическом возбуждении**

Специальность: 01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2020

Работа выполнена на кафедре «Физика полупроводников и наноэлектроника» института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель:

Фирсов Дмитрий Анатольевич

доктор физико-математических наук, профессор, профессор высшей инженерно-физической школы института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты:

Вербин Сергей Юрьевич

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник (доцент), заведующий кафедрой физики твердого тела физического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет"

Зубков Василий Иванович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры микро- и наноэлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)"

Ведущая организация:

Институт физики микроструктур РАН - филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород


Защита состоится «10» декабря 2020 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 212.238.04 на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте www.eltech.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Санкт-Петербург, улица Профессора Попова, д. 5.

Автореферат разослан «09» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.04

 / В. А. Мошников /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Под терагерцовым излучением, как правило, подразумевается электромагнитное излучение с длинами волн 30 мкм - 1 мм (0.3 - 10 ТГц). Интерес к излучению терагерцового диапазона определяется рядом особенностей, которые делают перспективным его применение в науке и технике [1-3]. Одним из характерных свойств терагерцового излучения является его высокая проникающая способность для сухих неметаллических объектов, что позволяет применять его в области неразрушающего контроля и в системах безопасности. В терагерцовом диапазоне частот многие органические молекулы имеют характерные полосы поглощения, связанные с дипольно-разрешенными вращательными и колебательными переходами, что позволяет выявить форму объектов и различить их химический состав. Кроме того, ввиду малости энергии терагерцовых фотонов, такое излучение не является ионизирующим, в отличие, например, от рентгеновского, используемого в медицинской диагностике, что делает его более безопасным для живых организмов. Тем не менее, несмотря на обширные области возможного применения терагерцового излучения, его использование существенно ограничено ввиду отсутствия подходящих компактных и эффективных источников терагерцового излучения.

На сегодняшний день наиболее эффективным и компактным источником терагерцового излучения является квантово-каскадный лазер, принцип действия которого основан на межподзонных переходах электронов при их вертикальном транспорте в наноструктурах с туннельно-связанными квантовыми ямами [4]. Максимальная рабочая температура "классических" терагерцовых квантово-каскадных лазеров до сих пор является достаточно низкой и не превышает 210 К для импульсного [5] и 129 К для непрерывного [6] режимов генерации, а работа при комнатной температуре реализована только в терагерцовых квантово-каскадных лазерах, в основе которых лежит принцип разностной частотной генерации [7]. Основные трудности таких лазеров связаны с эффективностью вывода излучения из структуры и с выполнением условий фазового синхронизма. Наиболее важным фактором, который ограничивает широкое применение терагерцовых квантово-каскадных лазеров, является то, что они до сих пор остаются крайне сложными устройствами с точки зрения технологии их изготовления. Поэтому задача поиска и разработки альтернативных механизмов и схем генерации терагерцового излучения в настоящее время является актуальной.

Один из перспективных методов получения терагерцового излучения основан на оптических переходах неравновесных носителей заряда при их релаксации через состояния мелких примесных центров в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах после оптического или электрического возбуждения. Такие примесные терагерцовые оптические переходы носителей заряда уже наблюдались в спектрах низкотемпературной люминесценции объемных полупроводников [8] и наноструктур с квантовыми ямами [9] при пробое мелких примесей электрическим полем, а также при внутризонном [10] и межзонном [11] оптическом возбуждении объемных полупроводников. Кроме

того, в условиях внутризонного фотовозбуждения удалось добиться даже лазерной генерации на внутризонных переходах в кремнии [10].

До настоящего времени еще не сообщалось о наблюдении примесной терагерцовой люминесценции в условиях межзонного фотовозбуждения неравновесных носителей заряда в наноструктурах с легированными квантовыми ямами. Терагерцовое излучение при межзонной оптической накачке легированных квантовых ям по аналогии со случаем объемных полупроводников [11] может возникать при захвате неравновесных электронов (дырок) на донорные (акцепторные) примесные состояния, опустошение которых происходит за счет спонтанной электронно-дырочной рекомбинации при переходах типа «основное донорное (акцепторное) состояние – подзона тяжелых дырок (электронов)». При этом помещение примесного центра в квантовую яму открывает возможности управления его энергетическим спектром за счет эффекта размерного квантования путем изменения параметров легированных квантовых ям, а следовательно, и возможности управления частотой примесной терагерцовой люминесценции, что также определяет актуальность настоящей работы.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование излучательных свойств наноструктур с легированными квантовыми ямами в терагерцовом диапазоне частот при межзонном оптическом возбуждении неравновесных носителей заряда.

Увеличение скорости опустошения основных примесных состояний в квантовых ямах может привести к увеличению интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции, определяемой, в значительной степени, заселенностью основных примесных состояний. Это может быть достигнуто за счет опустошения основных примесных состояний стимулированным излучением, а также за счет существенной компенсации примесей в квантовых ямах. При этом компенсация примесей приведет к возникновению дополнительного канала рекомбинации типа "донор-акцептор", а также понизит равновесную заселенность примесных состояний.

В соответствии с изложенным выше в работе поставлены следующие **задачи**:

1. Рассчитать энергетический спектр электронов и дырок в квантовых ямах GaAs/AlGaAs различной ширины. Основываясь на литературных источниках, определить энергетический спектр донорных состояний в исследуемых квантовых ямах GaAs/AlGaAs различной ширины.

2. Исследовать спектры терагерцовой и ближней инфракрасной фотолюминесценции в наноструктурах с легированными донорами квантовыми ямами GaAs/AlGaAs различной ширины при различных температурах кристаллической решетки в условиях межзонного оптического возбуждения.

3. Провести совместный анализ полученных экспериментальных данных по исследованию спектров фотолюминесценции терагерцового и ближнего инфракрасного диапазонов с результатами расчета энергетического спектра электронных и дырочных состояний в квантовых ямах, а также с энергетическим спектром доноров в квантовых ямах. Определить основные оптические переходы,

дающие вклад в спектры ближнего инфракрасного и терагерцового излучения при различных температурах кристаллической решетки.

4. Исследовать спектры фотолюминесценции ближнего инфракрасного диапазона в лазерных наноструктурах с легированными донорами квантовыми ямами и с волноводом для ближнего инфракрасного излучения при различных интенсивностях межзонного оптического возбуждения. Определить пороговую мощность для возникновения лазерной генерации ближнего инфракрасного излучения в образце.

5. Исследовать спектры терагерцовой фотолюминесценции в лазерных наноструктурах с легированными донорами квантовыми ямами с волноводом для ближнего инфракрасного излучения при различных интенсивностях межзонного оптического возбуждения. Определить влияние стимулированного ближнего инфракрасного излучения на спектры и интенсивность примесной терагерцовой фотолюминесценции в квантовых ямах.

6. Исследовать спектры фотолюминесценции ближнего инфракрасного и терагерцового диапазонов в наноструктурах с квантовыми ямами, легированными как донорной, так и донорной и акцепторной примесью при различных температурах кристаллической решетки в условиях межзонного оптического возбуждения. Определить влияние компенсации доноров акцепторами в квантовых ямах на интенсивность примесной терагерцовой фотолюминесценции.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Научная значимость настоящей работы заключается в том, что в ней впервые проведены исследования терагерцовой фотолюминесценции, связанной с оптическими переходами неравновесных электронов с участием состояний мелких доноров в наноструктурах с легированными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs различной ширины при межзонном оптическом возбуждении неравновесных носителей заряда. Анализ полученных результатов позволил определить оптические переходы неравновесных электронов, дающие основной вклад в спектры терагерцовой фотолюминесценции в наноструктурах с квантовыми ямами различной ширины. Продемонстрирован сдвиг полосы примесной терагерцовой фотолюминесценции при изменении ширины легированной квантовой ямы, связанный с изменением энергетического спектра доноров вследствие эффекта размерного квантования. Предложены механизмы увеличения интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции при межзонной оптической накачке легированных квантовых ям, основанные на организации стимулированного ближнего инфракрасного излучения в лазерных наноструктурах, а также компенсации примесных центров в квантовых ямах. Полученные в настоящей работе результаты могут быть использованы для разработки нового типа источников терагерцового излучения на основе квантовых ям, легированных мелкими примесными центрами. При этом использование удобного и физически наглядного способа межзонного оптического возбуждения, реализованного в настоящей работе, является первым шагом на пути к созданию источников терагерцового излучения с электрической накачкой, пригодных для практического применения.

Методология и методы исследования. Исследован ряд наноструктур с множественными легированными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, выращенными методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Экспериментальные исследования выполнены с использованием традиционных и вновь разработанных методик, среди которых спектроскопия терагерцовой и ближней инфракрасной фотолюминесценции, а также спектроскопия терагерцовой фотопроводимости. Обработка полученных в экспериментах результатов проводилась в программных пакетах OPUS и Origin.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Межзонная оптическая накачка квантовых ям GaAs/AlGaAs, легированных донорной примесью, при низкой температуре кристаллической решетки приводит к спонтанной эмиссии терагерцового излучения, связанного с оптическими переходами неравновесных электронов из первой электронной подзоны и возбужденного донорного состояния в основное состояние доноров в квантовых ямах.

2. В легированных квантовых ямах GaAs/AlGaAs в условиях межзонной оптической накачки стимулированное ближнее инфракрасное излучение при примесных переходах носителей заряда существенно влияет на характеристики примесной терагерцовой фотолюминесценции.

3. Компенсация доноров акцепторами в квантовых ямах GaAs/AlGaAs приводит к возрастанию интенсивности терагерцовой фотолюминесценции, связанной с примесными состояниями, при межзонном оптическом возбуждении.

Апробация работы. Результаты настоящей работы были доложены на международном симпозиуме "Semiconductor sources and detectors of THz frequencies" (Монпелье, Франция, 2013); 15, 19 и 20 Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2013, 2017, 2018); 22 и 25 Международных симпозиумах "Nanostructures: Physics and Technology" (Санкт-Петербург, 2014, 2017); XVIII, XXII и XXIII Международных симпозиумах "Нанозифика и наноэлектроника" (Нижний Новгород, 2014, 2018, 2019); 1 Международной школе и конференции по оптоэлектронике, фотонике, проектированию и наноструктурам Saint-Petersburg OPEN (Санкт-Петербург, 2014); 43, 44, 46 и 47 Научно-практических конференциях с международным участием Неделя Науки СПбПУ (Санкт-Петербург, 2014, 2015, 2017, 2018); 41 и 43 Международных конференциях "Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)" (Копенгаген, Дания, 2016; Нагоя, Япония, 2018); 13 Всероссийской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург, 2017).

Результаты проведенных исследований также были доложены на научном семинаре в лаборатории оптики спина им. И.Н. Уральцева СПбГУ (2019).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе в 6 научных статьях и 17 тезисах докладов на российских и международных конференциях. Список научных статей приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка опубликованных научных статей и списка литературы. Объем диссертации составляет 145 страниц, включая 39 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 122 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, определены цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в работе, а также сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет собой литературный обзор по теме диссертации, который, главным образом, посвящен рассмотрению существующих и реализованных на практике схем генерации терагерцового излучения на основе примесных переходов неравновесных носителей заряда в полупроводниках. Параграф 1.1 посвящен рассмотрению энергетического спектра мелких доноров в объемных полупроводниках и наноструктурах с квантовыми ямами. В параграфе 1.2 обсуждаются результаты исследований терагерцовой электролюминесценции с участием локализованных и резонансных состояний примесей в условиях пробоя нейтральных примесей электрическим полем. Параграф 1.3 посвящен рассмотрению основных результатов работ, связанных с наблюдением терагерцового излучения при примесных переходах носителей заряда, инжектированных из сильнолегированных *p*- и *n*-областей. В параграфе 1.4 излагаются основные результаты исследований примесной терагерцовой люминесценции при внутризонной и внутрицентральной оптической накачке легированных объемных полупроводников. Параграф 1.5 наиболее тесно связан с оригинальной частью диссертации и посвящен обзору по генерации терагерцового излучения при межзонном фотовозбуждении объемных полупроводников.

Вторая глава диссертации посвящена первым исследованиям примесной терагерцовой фотолюминесценции в наноструктурах с легированными мелкими донорами квантовыми ямами GaAs/AlGaAs различной ширины в условиях межзонного оптического возбуждения неравновесных носителей заряда. В параграфе 2.1 рассмотрен принцип генерации терагерцового излучения при примесных переходах неравновесных носителей заряда. Параграфы 2.2 и 2.3 содержат сведения об образцах и методиках их исследований.

В параграфе 2.4.1 приводятся и обсуждаются результаты исследований фотолюминесценции терагерцового и ближнего инфракрасного диапазонов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs шириной 30 нм, легированных донорами кремния с поверхностной концентрацией $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В спектре терагерцовой фотолюминесценции наноструктуры наблюдаются две полосы излучения с максимумами интенсивности вблизи энергий кванта 8 и 20 мэВ. Поскольку полоса терагерцового излучения вблизи энергии кванта 20 мэВ присутствует в спектрах фотолюминесценции как наноструктуры, так и подложки GaAs, не содержащей эпитаксиальных слоев, то она связывается с оптическими

переходами неравновесных носителей заряда через состояния неконтролируемых акцепторных примесей углерода и цинка, возникающих в процессе роста GaAs методом Чохральского [12] и методом молекулярно-пучковой эпитаксии [13].

Полоса терагерцового излучения с максимумом интенсивности вблизи энергии кванта 8 мэВ, присутствующая только в спектре излучения наноструктуры и исследованная более подробно в диапазоне энергий кванта 2 - 14 мэВ, представлена на рисунке 1а. Основываясь на расчете энергетического спектра доноров для исследуемых квантовых ям [9], эту широкую полосу терагерцовой фотолюминесценции можно связать с оптическими переходами неравновесных электронов из возбужденных донорных состояний $2p_{x,y}$ и первой электронной подзоны $e1$ в основное состояние доноров $1s$. Спектральные положения расчетных значений энергий кванта для этих оптических переходов показаны на рисунке 1а стрелками.

Спектральное положение этой полосы терагерцовой люминесценции хорошо согласуется с результатами исследования примесной терагерцовой фотопроводимости, представленными в работе [9] для аналогичных квантовых ям, где наблюдалась широкая полоса фототока, которая связывалась авторами с оптическими переходами электронов $1s-2p_{x,y}$ и $1s-e1$.

Значительная ширина спектра терагерцовой фотолюминесценции наноструктуры объясняется уширением донорных состояний из-за относительно высокого уровня легирования квантовых ям, а также из-за зависимости энергетического спектра доноров от их положения в квантовой яме. Спад интенсивности терагерцового излучения с ростом температуры решетки связывается с уменьшением вероятности излучательного захвата неравновесных носителей заряда на ионизованный донор с ростом температуры решетки. Подобное температурное гашение интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции наблюдалось ранее в легированных объемных полупроводниках [11].

В соответствии с механизмом примесной терагерцовой фотолюминесценции в квантовых ямах в спектре низкотемпературной ближней инфракрасной фотолюминесценции наноструктуры с квантовыми ямами, представленном на рисунке 1б, наблюдается пик люминесценции, связанный с излучательной рекомбинацией электронов из основного донорного состояния $1s$ с дырками из первой подзоны размерного квантования тяжелых дырок $hh1$. Этот пик излучения отмечен стрелкой $1s-hh1$ на рисунке 1б. Кроме него в спектре ближней инфракрасной фотолюминесценции наблюдаются пики излучения, связанные с излучательной рекомбинацией свободных и связанных на донорной примеси экситонов (отмечены на рисунке 1б стрелками $Xe1-hh1$ и $Si-X$, соответственно), а также широкая полоса люминесценции, отмеченная скобкой "фоновые примеси", которая связана с излучательной рекомбинацией неравновесных носителей заряда через состояния неконтролируемых акцепторных примесей, влияние которых также проявляется в спектрах терагерцовой фотолюминесценции наноструктуры и полуизолирующей подложки GaAs.

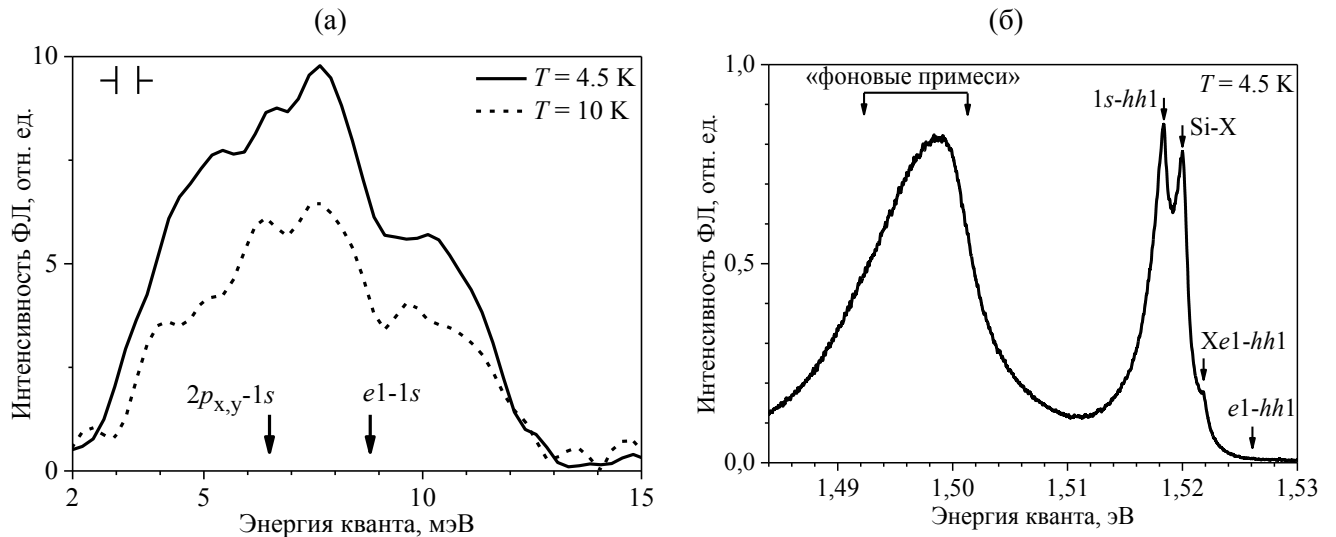


Рисунок 1 - Спектры фотолюминесценции терагерцового (а) и ближнего инфракрасного (б) диапазонов наноструктуры с квантовыми ямами шириной 30 нм.

В параграфе 2.4.2 диссертации обсуждаются результаты исследований фотолюминесценции терагерцового и ближнего инфракрасного диапазонов в наноструктуре с более узкими квантовыми ямами GaAs/AlGaAs шириной 16.1 нм. Уменьшение ширины легированной квантовой ямы от 30 до 16.1 нм должно привести к возрастанию энергии связи доноров и соответствующему коротковолновому смещению полосы примесной терагерцовой фотолюминесценции [15].

Спектр терагерцовой фотолюминесценции этой наноструктуры, как и в предыдущем случае, содержит две полосы излучения, первая из которых имеет максимум интенсивности вблизи энергии кванта 22 мэВ и связывается с наличием фоновых акцепторных примесей в эпитаксиальных слоях GaAs и в подложке наноструктуры. Вторая полоса излучения с максимумом интенсивности вблизи энергии кванта 12 мэВ связана с оптическими переходами неравновесных фотовозбужденных электронов из первой электронной подзоны $e1$ в основное состояние донорной примеси $1s$ в квантовых ямах. Спектральное положение данной полосы терагерцового излучения хорошо согласуется с расчетным значением энергии связи мелких доноров для квантовых ям GaAs/AlGaAs шириной 16.1 нм, составляющим величину примерно 10 мэВ [15].

Сравнение спектров примесной терагерцовой фотолюминесценции квантовых ям различной ширины продемонстрировало возможность изменения длины волны примесной терагерцовой фотолюминесценции при изменении ширины квантовой ямы.

В низкотемпературных спектрах ближней инфракрасной фотолюминесценции наноструктуры с квантовыми ямами шириной 16.1 нм также обнаружена полоса излучательной рекомбинации неравновесных электронов и дырок через основное донорное состояние $1s$ в квантовой яме, которая приводит к опустошению основного донорного состояния $1s$, участвующего в терагерцовых переходах неравновесных электронов.

В параграфе 2.5 кратко представлены основные результаты второй главы диссертации, которые опубликованы в научных статьях [А1-А3].

В третьей главе рассмотрено влияние ближнего инфракрасного стимулированного излучения на интенсивность и спектры терагерцовой фотолюминесценции легированных донорами квантовых ям в условиях межзонного оптического возбуждения. В параграфе 3.1 обсуждается метод увеличения интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции в легированных квантовых ямах за счет организации вынужденных оптических переходов неравновесных носителей заряда между основным донорным состоянием и состояниями валентной зоны. В параграфах 3.2 и 3.3 приводится описание исследуемых образцов и методики исследований. Исследования, обсуждаемые в третьей главе, были выполнены на наноструктуре с 10 легированными донорами квантовыми ямами GaAs/AlGaAs шириной 7.6 нм, заключенными в симметричный градиентный волновод для ближнего инфракрасного излучения. Для достижения лазерной генерации в ближнем инфракрасном диапазоне исследуемый образец был выполнен в форме высокодобротного «четырёхсклоного» резонатора полного внутреннего отражения со сторонами примерно 600×600 мкм².

В параграфе 3.4 приводятся и обсуждаются результаты исследований терагерцовой и ближней инфракрасной люминесценции лазерных наноструктур с легированными квантовыми ямами, выполненных в широком диапазоне мощностей межзонного фотовозбуждения. При слабых уровнях фотовозбуждения до возникновения ближней инфракрасной лазерной генерации в спектрах терагерцовой фотолюминесценции наноструктуры наблюдается одна полоса излучения с максимумом вблизи энергии кванта 20 мэВ (см. рисунок 2а), которая в соответствии с расчетом энергетического спектра донорных состояний в квантовой яме [15] связывается с оптическими переходами неравновесных электронов из первой электронной подзоны $e1$ на основное состояние донорной примеси $1s$. Отметим, что при таких же условиях терагерцовое излучение из полуизолирующей подложки GaAs не наблюдалось.

В спектрах низкотемпературной спонтанной фотолюминесценции ближнего инфракрасного диапазона проявляются пики излучения, связанные с рекомбинацией свободных тяжелых экситонов, связанных на донорной примеси экситонов, а также с излучательной рекомбинацией неравновесных электронов и тяжелых дырок через донорные состояния в квантовых ямах.

Лазерная генерация в ближнем инфракрасном диапазоне возникает при мощности накачки около 0.12 кВт/см². Она характеризуется пороговым характером зависимости интегральной интенсивности излучения от мощности накачки, а также появлением высокоинтенсивной узкой линии стимулированного излучения вблизи энергии кванта 1.554 эВ, которая связывается с излучательной электрон-дырочной рекомбинацией между возбужденным донорным состоянием $2s$ и первой дырочной подзоной $hh1$. Возникновение лазерной генерации в ближнем инфракрасном диапазоне через возбужденное, а не через основное

донорное состояние может быть вызвано большим усилением при оптических переходах через возбужденное донорное состояние.

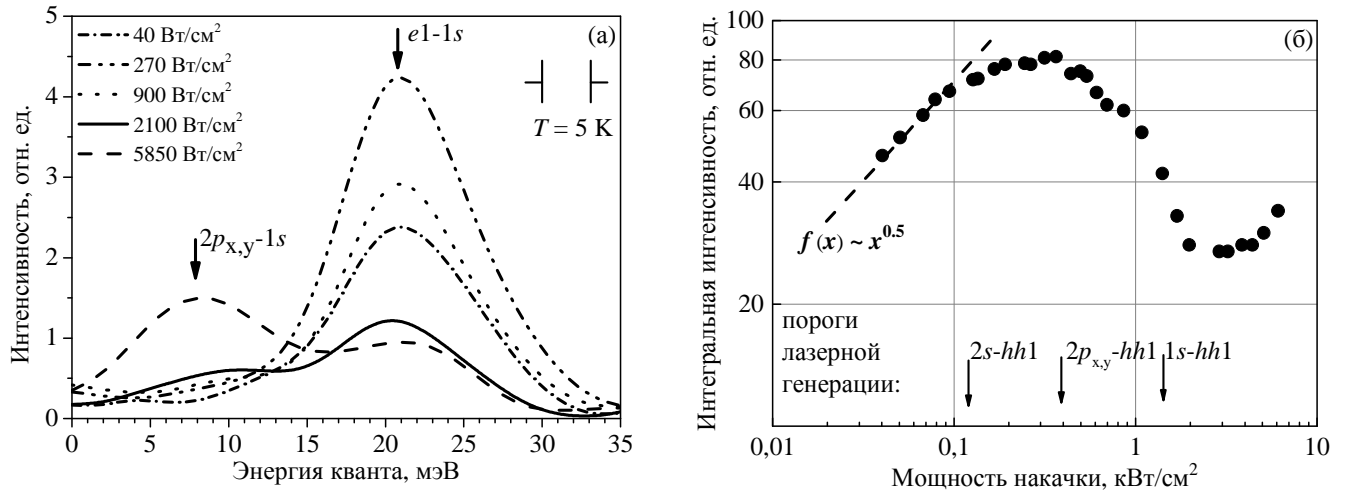


Рисунок 2 - Спектры терагерцовой фотолюминесценции лазерных наноструктур с легированными донорами квантовыми ямами (а) и зависимость интегральной интенсивности терагерцовой фотолюминесценции от мощности оптической накачки (б).

При относительно слабых уровнях возбуждения (до порога лазерной генерации в ближнем инфракрасном диапазоне) интегральная интенсивность терагерцовой люминесценции пропорциональна корню из мощности оптической накачки (см. рисунок 2б), что согласуется с результатами для легированных объемных полупроводников [11]. Возникновение лазерной генерации при переходах $2s-hh1$ приводит к спаду скорости роста интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции с ростом мощности фотовозбуждения (см. рисунок 2б). Поскольку интенсивность терагерцовой фотолюминесценции, связанной с переходами $e1-1s$ (см. рисунок 2а), зависит от концентрации электронов в подзоне $e1$ и концентрации свободных донорных состояний $1s$, способных захватить на себя электрон, то, вероятно, вынужденные оптические переходы $2s-hh1$ приводят к эффективному опустошению возбужденного донорного состояния $2s$ и соответствующему эффективному захвату электронов из подзоны $e1$ в состояние $2s$. Таким образом, с возникновением вынужденных переходов $2s-hh1$ может происходить уменьшение скорости роста концентрации электронов в подзоне $e1$ с ростом накачки, а также уменьшение концентрации свободных донорных состояний $1s$, способных захватить электрон.

Увеличение мощности оптического возбуждения свыше 300 Вт/см^2 приводит к возникновению второй линии стимулированного ближнего инфракрасного излучения вблизи энергии кванта 1.551 эВ , которая связывается с излучательной электрон-дырочной рекомбинацией между возбужденным $2p_{x,y}$ донорным состоянием и первой подзоной тяжелых дырок $hh1$. Лазерная генерация при переходах $2p_{x,y}-hh1$ приводит к спаду интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции с ростом мощности накачки (см. рисунки 2а и 2б), что можно объяснить ещё большим изменением концентрации электронов в первой

электронной подзоне $e1$ и концентрации свободных основных донорных состояний $1s$, способных захватить электрон.

Увеличение мощности оптической накачки свыше 1 кВт/см^2 приводит к возникновению третьей линии стимулированного ближнего инфракрасного излучения, связанной с оптическими переходами носителей заряда между основным донорным состоянием $1s$ и первой подзоной тяжелых дырок $hh1$. Вынужденные оптические переходы $1s-hh1$ приводят к эффективному опустошению основного донорного состояния $1s$, которое является конечным для примесных терагерцовых переходов неравновесных электронов, что в свою очередь приводит к возрастанию интегральной интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции с ростом мощности накачки (см. рисунок 2б). В спектрах терагерцовой фотолюминесценции возникновение лазерной генерации при переходах $1s-hh1$ приводит к возникновению новой полосы терагерцового излучения вблизи энергии кванта 9 мэВ (см. рисунок 2а), которая связывается с внутрицентровыми оптическими переходами неравновесных электронов между возбужденным $2p_{x,y}$ и основным $1s$ донорными состояниями в квантовых ямах.

В параграфе 3.5 кратко изложены основные результаты третьей главы диссертации, которые опубликованы в научных статьях [A4, A5].

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию влияния компенсации доноров в квантовых ямах акцепторами на примесную терагерцовую фотолюминесценцию в условиях межзонного оптического возбуждения. В параграфе 4.1 обсуждается предложенный метод увеличения интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции за счет компенсации доноров в квантовых ямах. В параграфах 4.2 и 4.3 приводится описание исследуемых образцов и методик их исследований. Исследования, обсуждаемые в четвертой главе, были выполнены на двух наноструктурах с 50 легированными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs шириной 7.6 нм . Для сравнения квантовые ямы в первой наноструктуре легировались только донорной примесью, во второй структуре легирование осуществлялось как донорами, так и акцепторами. Концентрации всех легирующих примесей в квантовых ямах были одинаковы.

В параграфе 4.4.1 приводятся и обсуждаются результаты исследований вольт-амперных характеристик и спектров терагерцовой фотопроводимости наноструктур. Сигнал терагерцовой фотопроводимости от наноструктуры с компенсированными квантовыми ямами не был обнаружен, что объясняется существенной компенсацией примесей. При этом в спектре фотопроводимости наноструктуры с легированными донорами квантовыми ямами содержатся две полосы фототока, связанные с оптическими переходами электронов из основного донорного состояния $1s$ в возбужденные состояния доноров $2p_{x,y}$ и в первую электронную подзону $e1$. Интегральный фототок наноструктуры немонотонно зависит от температуры кристаллической решетки. При низких температурах наблюдается рост фототока с температурой, который связывается с возрастанием вклада оптических переходов электронов $1s-2p_{x,y}$ с ростом температуры. Последующий спад интегрального фототока с ростом температуры связывается со

спадом концентрации нейтральных доноров в квантовых ямах вследствие их термической ионизации.

Параграф 4.4.2 посвящен сравнительным исследованиям ближней инфракрасной фотолюминесценции обеих наноструктур. В низкотемпературных спектрах ближней инфракрасной фотолюминесценции обеих наноструктур с квантовыми ямами проявляются полосы излучения свободных тяжелых и легких экситонов, связанных на примеси экситонов, а также полоса излучательной рекомбинации электронов и дырок через донорные состояния в квантовых ямах. Для наноструктуры с компенсированными квантовыми ямами также наблюдается высокоинтенсивная полоса люминесценции в диапазоне энергий кванта 1.52-1.56 эВ, которая связывается с излучательными переходами неравновесных электронов из первой электронной подзоны на состояния акцепторной примеси бериллия в квантовых ямах, а также с рекомбинацией носителей заряда между состояниями доноров и акцепторов в ямах.

В параграфе 4.4.3 приводятся сравнительные исследования терагерцовой фотолюминесценции обеих наноструктур. В спектрах терагерцовой фотолюминесценции обеих наноструктур присутствуют две полосы излучения с максимумами интенсивности вблизи энергий кванта 10 и 20 мэВ, которые связываются с оптическими переходами неравновесных электронов $2p_{x,y}-1s$ и $e1-1s$. Отметим, что никакого сигнала терагерцовой фотолюминесценции от полуизолирующей подложки GaAs в аналогичных экспериментальных условиях не наблюдалось. Спектральное положение данных полос излучения хорошо согласуется с результатами расчета энергетического спектра доноров в квантовых ямах [15], а также с результатами исследования спектров терагерцовой фотопроводимости. В спектре терагерцовой фотолюминесценции наноструктуры с компенсированными квантовыми ямами присутствует дополнительная полоса люминесценции вблизи энергии кванта 36 мэВ, которая связывается с оптическими переходами электронов между основным состоянием акцепторной примеси и первой подзоной тяжелых дырок. Ее спектральное положение хорошо согласуется с величиной энергии связи акцептора бериллия в квантовых ямах шириной 7.6 нм, равной примерно 35 мэВ [16].

Для сравнения интенсивности излучения терагерцового диапазона в двух наноструктурах с компенсацией доноров в квантовых ямах и без компенсации были исследованы зависимости интегральной интенсивности терагерцового излучения от мощности фотовозбуждения (см. рисунок 3). Данные исследования были выполнены с использованием фотоприемника Ge:Ga, чувствительного к терагерцовому излучению с энергиями кванта $8 \div 30$ мэВ. В данный диапазон чувствительности фотоприемника попадают полосы терагерцовой фотолюминесценции, связанные только с донорными примесными переходами $e1-1s$ и $2p_{x,y}-1s$. Как видно из рисунка 3, интегральная интенсивность терагерцовой фотолюминесценции, связанной с донорными оптическими переходами электронов, почти на порядок больше для наноструктуры с компенсированными квантовыми ямами. Обе зависимости ведут себя практически одинаково с ростом мощности оптической накачки. При слабом

уровне накачки эти зависимости близки к линейным, а при высоких - к корневым, что согласуется с подобными исследованиями интегральной интенсивности примесной терагерцовой люминесценции в объемных полупроводниках [11].

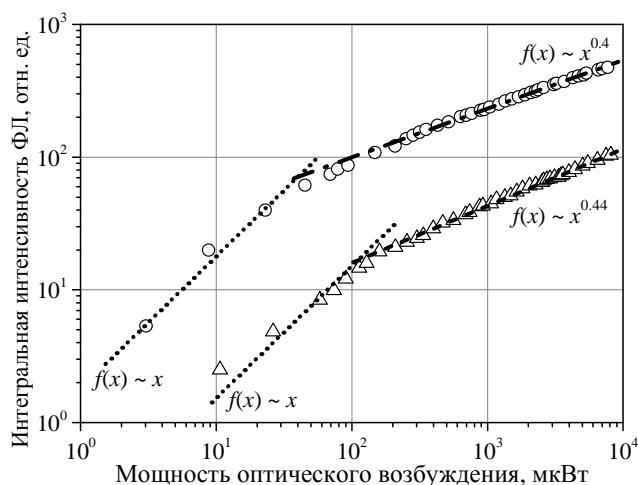


Рисунок 3 - Зависимости интегральной интенсивности терагерцовой фотолюминесценции от мощности накачки наноструктур с квантовыми ямами, легированными донорами (треугольники) и донорами и акцепторами (круги). Диаметр пятна засветки образца 1 мм.

В параграфе 4.5 кратко изложены основные результаты четвертой главы диссертации, которые опубликованы в научных статьях [Аб].

В **Заключении** обобщены основные результаты диссертации:

1. Исследованы спектры спонтанной терагерцовой фотолюминесценции при межзонной оптической накачке наноструктур с легированными донорами квантовыми ямами GaAs/AlGaAs различной ширины. Основной вклад в спектры терагерцовой фотолюминесценции дают оптические переходы неравновесных электронов из первой электронной подзоны и возбужденных донорных состояний в основное состояние доноров.

2. Обнаружено смещение по спектру полос примесной терагерцовой фотолюминесценции, связанное с изменением энергетического спектра донорных примесных состояний вследствие изменения ширины легированных квантовых ям.

3. Обнаружено температурное гашение интенсивности терагерцовой фотолюминесценции, связанной с донорными примесными переходами электронов в квантовых ямах, которое может быть вызвано уменьшением вероятности захвата носителей заряда примесными центрами с ростом температуры решетки.

4. Предложен способ увеличения интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции в квантовых ямах за счет опустошения основного примесного состояния стимулированным излучением. В наноструктурах с квантовыми ямами, легированными донорами, с волноводными слоями для ближнего инфракрасного излучения реализована лазерная генерация ближнего инфракрасного излучения с участием донорных примесных состояний в образцах,

выполненных в форме четырёхсклолых резонаторов полного внутреннего отражения. Обнаружено и изучено существенное влияние стимулированного ближнего инфракрасного излучения при оптических переходах носителей заряда с участием основного и возбужденных донорных состояний в квантовых ямах на примесную терагерцовую фотолюминесценцию.

5. В спектрах низкотемпературной терагерцовой фотопроводимости наноструктуры с квантовыми ямами GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As, легированными донорами, присутствует широкая полоса фототока, которая связывается, главным образом, с оптическими переходами электронов из основного донорного состояния в возбужденные донорные состояния и состояния сплошного спектра первой электронной подзоны квантовых ям. Спектральное положение данной полосы фототока хорошо согласуется с результатами исследования спектров примесной терагерцовой фотолюминесценции в данной наноструктуре. Температурная зависимость интегрального фототока наноструктуры содержит два участка, характеризующиеся ростом и спадом фототока с ростом температуры решетки. Предложена модель, описывающая обнаруженную температурную зависимость фототока.

6. Предложен способ увеличения интенсивности примесной терагерцовой фотолюминесценции за счет существенной компенсации примесей в квантовых ямах. Для наноструктуры с квантовыми ямами, легированными одновременно донорами и акцепторами, в спектрах низкотемпературной ближней инфракрасной фотолюминесценции обнаружена широкая полоса излучения, связываемая как с переходами электронов из первой электронной подзоны на акцепторные состояния, так и с переходами электронов из донорных примесных состояний на акцепторные состояния в квантовых ямах. При этом в спектрах терагерцовой фотолюминесценции наноструктуры с компенсированными квантовыми ямами дополнительно присутствует полоса терагерцовой люминесценции, связываемая с оптическими переходами электронов из основного акцепторного состояния в состояния первой подзоны тяжелых дырок в квантовых ямах.

7. Интегральная интенсивность терагерцовой фотолюминесценции, связанной с донорными примесными переходами фотовозбужденных электронов, для компенсированных квантовых ям практически на порядок больше, чем для некомпенсированных квантовых ям в широком диапазоне мощностей межзонного оптического возбуждения.

Список научных статей, опубликованных по теме диссертации

[A1] Vorobjev, L. E. Near- and far-infrared emission from GaAs/AlGaAs quantum wells under interband optical excitation / L. E. Vorobjev, D. A. Firsov, V. Yu. Panevin, A. N. Sofronov, R. M. Balagula, I. S. Makhov // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. - 2013. - Вып. 4(182), ч. 2. - С. 109-114.

[A2] Фирсов, Д. А. Терагерцовое излучение, связанное с примесными переходами электронов в квантовых ямах при оптической и электрической

накачке / Д. А. Фирсов, Л. Е. Воробьев, В. Ю. Паневин, А. Н. Софронов, Р. М. Балагула, И. С. Махов, Д. В. Козлов, А. П. Васильев // Физика и техника полупроводников. - 2015. - Т. 49, вып. 1. - С. 30-35.

[A3] Vinnichenko, M. Ya. Terahertz radiation related to the electron relaxation after interband optical pumping in doped quantum wells / M. Ya. Vinnichenko, I. S. Makhov, V. Yu. Panevin, A. N. Sofronov, D. A. Firsov, L. E. Vorobjev, Yu. G. Sadofev, A. P. Vasiliev // International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. - 2016. - Vol. 2016. - num. 7758782.

[A4] Makhov, I. S. The effect of stimulated interband emission on the impurity-assisted far-infrared photoluminescence in GaAs/AlGaAs quantum wells / I. S. Makhov, V. Yu. Panevin, A. N. Sofronov, D. A. Firsov, L. E. Vorobjev, M. Ya. Vinnichenko, A. P. Vasil'ev, N. A. Maleev // Superlattices and microstructures. - 2017. - Vol. 112. - P. 79-85.

[A5] Makhov, I. S. Terahertz photoluminescence of the donor doped GaAs/AlGaAs quantum wells controlled by the near-infrared stimulated emission / I. S. Makhov, V. Yu. Panevin, D. A. Firsov, L. E. Vorobjev, A. P. Vasil'ev, N. A. Maleev // Journal of luminescence. - 2019. - Vol. 210. - P. 352-357.

[A6] Makhov, I. S. Impurity-assisted terahertz photoluminescence in compensated quantum wells / I. S. Makhov, V. Yu. Panevin, D. A. Firsov, L. E. Vorobjev, G. V. Klimko // Journal of applied physics. - 2019. - Vol. 126. - Iss.17. - P. 175702-1-6

Список литературы

[1] Mittleman, D. M. Perspective: Terahertz science and technology / D. M. Mittleman // Journal of applied physics. - 2017. - Vol. 122, iss. 23. - P. 230901.

[2] Yang, X. Biomedical applications of terahertz spectroscopy and imaging / X. Yang, X. Zhao, K. Yang, Y. Liu, Y. Liu, W. Fu, Y. Luo // Trends in biotechnology. - 2016. - Vol.34, no.10. - P. 810.

[3] Karuliūnas, M. Non-destructive inspection of food and technical oils by terahertz spectroscopy / M. Karuliūnas, K.E. Nasser, A. Urbanowicz, I. Kašalynas, D. Bražinskienė, S. Asadauskas, G. Valušis // Scientific reports. - 2018. - Vol. 8, iss. 1. - P. 18025.

[4] Köhler, R. Terahertz semiconductor-heterostructure laser / R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H.E. Beere, E.H. Linfield, A.G. Davies, D.A. Ritchie, R.C. Iotti, F. Rossi // Nature. - 2002. - Vol. 417. - P. 156.

[5] Bosco, L. Thermoelectrically cooled THz quantum cascade laser operating up to 210 K / L. Bosco, M. Frankié, G. Scalari, M. Beck, A. Wacker, J. Faist // Applied physics letters. - 2019. - Vol. 115. - P. 010601.

[6] Wienold, M. High-temperature, continuous-wave operation of quantum-cascade lasers with metal-metal waveguides and third-order distributed feedback / M. Wienold, B. Röben, L. Schrottke, R. Sharma, A. Tharaoui, K. Biermann, H.T. Grahn // Optics express. - 2014. - Vol. 22, iss. 3. - P. 3334.

[7] Fujita, K. Recent progress in terahertz difference-frequency quantum cascade laser sources / K. Fujita, S. Jung, Y. Jiang, J.H. Kim, A. Nakanishi, A. Ito, M. Hitaka, T. Edamura, M.A. Belkin // *Nanophotonics*. - 2018. - Vol. 7, iss. 11. - P. 1.

[8] Андрианов, А. В. Терагерцовая электролюминесценция в условиях пробоя мелкого акцептора в германии / А. В. Андрианов, А. О. Захарьин, И. Н. Ясиевич, Н. Н. Зиновьев // *Письма в ЖЭТФ*. - 2004. - Т. 79, вып. 8. - С. 448.

[9] Фирсов, Д. А. Излучение и фотопроводимость в квантовых ямах GaAs/AlGaAs *n*-типа в терагерцовой области спектра: роль резонансных состояний / Д. А. Фирсов, В. А. Шалыгин, В. Ю. Паневин, Г. А. Мелентьев, А. Н. Софронов, Л. Е. Воробьев, А. В. Андрианов, А. О. Захарьин, В. С. Михрин, А. П. Васильев, А. Е. Жуков, Л. В. Гавриленко, В. И. Гавриленко, А. В. Антонов, В. Я. Алешкин // *Физика и техника полупроводников*. - 2010. - Т. 44, вып. 11. - С. 1443.

[10] Pavlov, S. G. Far-infrared stimulated emission from optically excited bismuth donors in silicon / S. G. Pavlov, H. W. Hübers, M. H. Rummeli, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova, V. N. Shastin, H. Riemann // *Applied physics letters*. - Vol. 80, num. 25. - P. 4717.

[11] Андрианов, А. В. Примесная терагерцовая люминесценция при межзонном фотовозбуждении полупроводников / А. В. Андрианов, А. О. Захарьин, Ю. Л. Иванов, М. С. Кипа // *Письма в ЖЭТФ*. - 2010. - Т. 91, вып. 2 - С. 102.

[12] Wakefield, B. Characterization of semi-insulating liquid encapsulated Czochralski GaAs by cathodoluminescence / B. Wakefield, P. A. Leigh, M. H. Lyons, C. R. Elliot // *Applied physics letters*. - 1984. - Vol. 45, iss 1. - P. 66.

[13] Dingle, R. Characterization of high purity GaAs grown by molecular beam epitaxy / R. Dingle, C. Weisbuch, H. L. Störmer, H. Morkoc, A.Y. Cho // *Applied physics letters*. - 1982. - Vol. 40, iss. 6. - P. 507.

[14] Melngailis, I. Far-infrared recombination radiation from impact-ionized shallow donors in GaAs / I. Melngailis, G. E. Stillman, J. O. Dimmock, C. M. Wolfe // *Physical review letters*. - 1969. - Vol. 23, num. 19. - P. 1111.

[15] Chaudhuri, C. Effect of nonparabolicity on the energy levels of hydrogenic donors in GaAs-Al_xGa_{1-x}As quantum-well structures / C. Chaudhuri, K. K. Bajaj // *Physical Review B*. - Vol. 29, num. 4. - P. 1803.

[16] Zheng, W. M. Acceptor binding energy in δ -doped GaAs/AlAs multiple-quantum wells / W. M. Zheng, M. P. Halsall, P. Harmer, P. Harrison, M. J Steer // *Journal of applied physics*. - 2002. - Vol. 92, num. 10. - P. 6039.