МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Григорьева Людмила Николаевна

Влияние частиц карбида кремния на фотопроводимость систем множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs

1.3.11 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре общей физики и молекулярной электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

Научный руководитель	***Форш Павел Анатольевич*** *– доктор физико-математических наук, доцент*
Официальные оппоненты	***Кульбачинский Владимир Анатольевич*** *– доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости*
	Володин Владимир Алексеевич *– доктор физико-математических наук, доцент, Институт физики полупроводников имени А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории неравновесных полупроводниковых систем*
	Целиков Глеб Игоревич *– кандидат физико-математических наук, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), старший научный сотрудник лаборатории нанооптики и плазмоники Центра фотоники и двумерных материалов*

Защита диссертации состоится «16» марта 2023 г. в 15:20 на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, корпус кафедры физики низких температур и сверхпроводимости, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.5/2400.

Автореферат разослан «___» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук Т.Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из наиболее привлекательных и отработанных систем фотоприемных устройств (ФПУ) для средневолновой и длинноволновой областей инфракрасного (ИК) спектра излучения является гетероструктура GaAs/AlGaAs, на основе которой изготавливаются фотоприемники с множественными квантовыми ямами – QWIP-структуры (от англ. Quantum Well Infrared Photodector). Принцип их работы основан на переходах электронов между уровнями размерного квантования в квантовых ямах при поглощении внешнего электромагнитного излучения. Однако особенностью оптических переходов между локализованными уровнями в квантовых ямах является диктуемое правилами отбора требование перпендикулярности вектора напряженности электрического поля падающей электромагнитной волны к плоскости роста структуры с квантовыми ямами. В стандартной геометрии «на просвет», когда электромагнитная волна падает перпендикулярно на поверхность структуры, электромагнитное поле имеет только компоненты, лежащие в плоскости квантовых ям. Это делает невозможным переходы между уровнями размерного квантования.

Наиболее распространенный способ решения данной проблемы заключается в использовании нестандартной геометрии, когда падающее излучение вводится под некоторым углом к нормали. Однако это значительно усложняет технологический процесс изготовления фотодетекторов на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs, поскольку требует либо создания полированных фасок на торцах структуры, либо использования дифракционных решеток. Поэтому разработка новых подходов для увеличения эффективности фотодетекторов на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs является актуальным вопросом.

Один из таких подходов основан на использовании ближнего поля металлических наночастиц. Однако применение данного подхода для среднего ИК-диапазона подразумевает использование материалов с резонансами, также расположенными в среднем ИК-диапазоне, свойства которых пока еще изучены не в полной мере, а существующие технологии, как правило, оперируют лишь с отдельными лабораторными образцами.

В то же время альтернативой металлическим частицам (и, соответственно, плазмонному резонансу) является использование ближнего поля фонон-поляритонов в полупроводниковых микрокристаллах, характеризующихся, с одной стороны, заметной долей полярной связи, а с другой стороны, высокочастотными решеточными резонансами, покрывающими спектральный диапазон 6–12 мкм. К материалам данной группы следует, в частности, отнести полярные кристаллы карбида кремния (SiC). Микрокристаллы полярного диэлектрика могут быть использованы в качестве посредника для передачи энергии электромагнитных волн в электронную подсистему полупроводниковой структуры QWIP. Они являются эффективными резонаторами как во временном, так и в пространственном масштабе. Создаваемое вокруг них электромагнитное поле, по интенсивности значительно превышающее интенсивность возбуждающей световой волны, может непосредственно передаваться в полупроводниковую структуру с квантовыми ямами. Эти поля вблизи микрочастицы должны иметь заметную компоненту, перпендикулярную плоскости слоя, что имеет решающее значение для преодоления описанного выше ограничения, вызванного правилами отбора для оптических переходов в QWIP. До последнего времени не предпринимались попытки создания систем, в которых реализована связь между электронной подсистемой квантовых ям и локализованными фонон-поляритонными резонансами. Во многом это связано с отсутствием понимания фундаментальных физических процессов, происходящих в таких системах.

Цель диссертационной работы. Определить влияние на фотоэлектрические свойства систем множественных полупроводниковых квантовых ям GaAs/AlGaAs добавления на их поверхность микрочастиц SiC, проанализировать возможность создания на основе таких гибридных систем фотодетекторов среднего ИК-диапазона.

Научная новизна. В данной работе впервые показана возможность увеличения взаимодействия электромагнитного поля падающей волны с электронной подсистемой структуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs за счет использования ближнего поля фонон-поляритонного резонанса микрочастиц SiC, нанесенных на поверхность структуры. Используемый подход является оригинальной альтернативой уже известным методам создания сложных металлических или диэлектрических резонаторов. Он сочетает в себе простоту изготовления «резонаторной» части и позволяет избежать потерь, характерных для плазмонов в металлических нанообъектах.

В ходе работы, в частности, путем численного моделирования было показано, что за счет взаимодействия электромагнитного поля с микронной частицей полярного кристалла SiC на поверхности структуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs происходит поворот вектора напряженности электрического поля в ближней зоне микрочастицы. В результате этого появляется компонента электрического поля, направленная вдоль оси роста квантовых ям. Расчеты показали, что ближнее поле микрочастицы SiC эффективно взаимодействует с верхними квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

Использование микрочастиц SiC позволяет частично преодолеть ограничения, связанные с правилами отбора для переходов между квантоворазмерными энергетическими уровнями в квантовых ямах GaAs/AlGaAs и приблизительно в 2 раза увеличить чувствительность ФПУ к электромагнитному излучению с поляризацией вдоль плоскости квантовых ям.

Практическая значимость диссертационной работы. Впервые реализовано гибридное ФПУ на основе множественных полупроводниковых квантовых ям GaAs/AlGaAs, в котором для увеличения взаимодействия электромагнитного поля падающей волны с электронной подсистемой квантовых ям используется ближнее поле микрочастиц SiC, нанесенных на поверхность устройства. Полученные экспериментальные результаты закладывают основу для создания новых гибридных ФПУ среднего ИК-диапазона, в которых реализована резонансная ближнепольная связь между локализованным фонон-поляритоном и электронной подсистемой полупроводниковых квантовых ям.

Данные о распределении концентрации носителей заряда в микрочастицах SiC и предложенные методы варьирования их среднего размера и фонон-плазмонных мод могут быть использованы при синтезе микрочастиц SiC.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, и микрочастицы SiC политипа 3C с высоким структурным совершенством, полученные оригинальным методом синтеза при высоком давлении и высоких температурах. Эксперименты проводились с помощью следующих методов:

- Просвечивающая электронная микроскопия;
- Сканирующая электронная микроскопия;
- Рентгеновская дифракция;
- Низкотемпературная фотолюминесцентная и микрофото-люминесцентная спектроскопия;
- Спектроскопия комбинационного рассеяния света;

- ИК-спектроскопия;
- Спектроскопия ИК-фотопроводимости;

Для отождествления уровней энергии в квантовых ямах по спектрам фотолюминесценции был использован метод огибающей волновой функции, также было проведено численное моделирование ближнего поля микрочастицы SiC, размещенной на поверхности гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

Положения, выносимые на защиту

1) Микрочастицы SiC, получаемые методом пиролиза органосилана $C_{12}H_{36}Si_6$, имеют неравномерное распределение концентрации носителей заряда и состоят из ядра с повышенным содержанием носителей и оболочки, обедненной носителями. Возникновение повышенной концентрации носителей заряда в микрочастицах SiC связано с образованием мелких донорных уровней на подрешетке углерода.

2) Изменение режимов роста микрочастиц SiC в сочетании с последующей их термообработкой позволяет контролировать не только средний размер кристаллов, но и фонон-плазмонные моды LO в кристаллах.

3) За счет взаимодействия электромагнитного поля с микронной частицей полярного кристалла SiC на поверхности структуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs в ее ближней зоне происходит поворот вектора напряженности электрического поля. Ближнее поле микрочастицы SiC эффективно взаимодействует с верхними квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

4) Использование микрочастиц SiC позволяет частично преодолеть ограничения, связанные с правилами отбора для переходов между квантоворазмерными энергетическими уровнями в квантовых ямах GaAs/AlGaAs и приблизительно в 2 раза увеличить чувствительность ФПУ к электромагнитному излучению с поляризацией вдоль плоскости квантовых ям, что указывает на принципиальную возможность передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов.

5) Синтезированные микрочастицы SiC, нанесенные на поверхность структуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, вдали от их фонон-поляритонного резонанса изменяют форму спектра фотопроводимости, что связано с несимметричным относительно положения резонанса механизмом передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов.

Достоверность полученных результатов. Результаты, представленные в данной работе, были получены на современном оборудовании и подтверждались повторяемостью экспериментальных данных. Достоверность и обоснованность результатов определяется также сопоставлением некоторых данных экспериментов и численного моделирования с результатами работ других авторов, выполненных на схожих образцах.

Апробация работы. Результаты, изложенные в диссертационной работе, представлены в 10 докладах на профильных всероссийских и международных конференциях по физике полупроводников и спектроскопии: XXXII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова (Москва, 6 апреля – 11 июня 2021), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2021» (Москва, 12–23 апреля 2021), XXV Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 9–12 марта 2021), Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (Москва, 24–26 ноября 2020), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2020» (Москва, 10–27 ноября 2020), XVI Курчатовская молодежная школа (Москва, 2–5 декабря 2019), 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, Долгопрудный, 18–23 ноября 2019), VII Международный Симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Москва, 18–20 ноября 2019), Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (Москва, 12–14 ноября 2019).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ: 5 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, РИНЦ и 10 тезисов докладов и трудов международных и российских конференций.

Личный вклад автора. Формулировка цели и постановка задач проведены диссертантом совместно с научным руководителем. Измерения спектров низкотемпературной фотолюминесценции, комбинационного рассеяния света, спектров ИК-пропускания и ИК-фотопроводимости, сбор и юстирование соответствующих экспериментальных установок для вышеперечисленных измерений, а также реализация гибридного ФПУ на основе гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и микрочастиц SiC были выполнены автором лично. Измерения методами рентгеновской дифракции, просвечивающей электронной микроскопии и сканирующей электронной микроскопии, а также анализ спектров низкотемпературной фотолюминесценции и численное моделирование были проведены совместно с соавторами работ, в которых изложены основные результаты диссертации.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 107 страницах машинописного текста, иллюстрирована 40 рисунками и состоит из введения, основной части, состоящей из трех глав, заключения и списка литературы из 138 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована цель диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и структуре диссертации.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященный структурным, оптическим и фотоэлектрическим свойствам гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и микрочастицам SiC. **В разделе 1.1** описываются энергетическая структура квантовых ям GaAs/AlGaAs [1], устройство фотодетекторов на их основе и методики, с помощью которых возможно изменение энергетического расстояния между квантоворазмерными уровнями в квантовых ямах. Перечислены проблемы, ограничивающие эффективность работы фотодетекторов на основе GaAs/AlGaAs в силу квантовомеханических ограничений, существующие методы обхода этих ограничений и обоснован поиск новых методов для увеличения поглощения электромагнитного излучения системой квантовых ям GaAs/AlGaAs. Перечислены преимущества использования локализованных фонон-поляритонных резонансов в качестве микрорезонаторов в среднем ИК-диапазоне.

Поскольку для того, чтобы согласовать между собой локализованный фонон-поляритонный резонанс и электронный переход с основного уровня размерного квантования на первый возбужденный уровень в квантовых ямах, важно знать положение энергетических уровней в квантовых ямах, **в разделе 1.2** изложен метод огибающей волновой функции для невырожденного и вырожденного случаев как наиболее репрезентативный и широко используемый для описания состояния электрона в гетероструктурах [2]. Также в данном разделе приведены другие методы расчета квантоворазмерных энергетических уровней и показано, что все использованные теоретические методы расчета энергетических уровней во множественных квантовых ямах GaAs/AlGaAs дают весьма близкие друг к другу результаты. Дано квантовомеханическое описание механизма перехода электронов при поглощении электромагнитного излучения и таким образом обоснованы правила отбора для симметричных квантовых ям. Подчеркивается, что сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными показывают, что положение уровней размерного квантования чувствительно к чрезвычайно малым флуктуациям параметров квантовых ям, поэтому необходимо проанализировать возможности экспериментального определения положения уровней размерного квантования в квантовых ямах [3].

В разделе 1.3 показано, что совокупность методов, включающих в себя измерение спектров низкотемпературной фотолюминесценции, спектров возбуждения фотолюминесценции и спектров микрофотолюминесценции является одним из комплексных и полных подходов для экспериментального определения положения энергетических уровней и характеризации гетероструктур с квантовыми ямами и, в частности, гетероструктур GaAs/AlGaAs [4,5]. Приведены фотолюминесцентные спектры структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs с технологическими характеристиками, схожими с используемыми в диссертационной работе, показана взаимосвязь особенностей в спектрах возбуждения фотолюминесценции с размытием гетероинтерфейсов и локальными флуктуациями состава структуры GaAs/AlGaAs [6].

Раздел 1.4 посвящен описанию фонон-поляритонных резонансов в полярных диэлектриках и, в частности, в полярных кристаллах SiC. Приведены основные характеристики фонон-поляритонных резонансов в SiC и описаны факторы, которые влияют на положения фонон-поляритонных резонансов [7]. Также обоснована важность поиска новых методов синтеза микрокристаллов SiC, обладающих высоким структурным совершенством и выраженными решеточными резонансами.

В разделе 1.5 описано влияние электрического поля на энергетический спектр носителей, локализованных в квантовых ямах GaAs/AlGaAs и приведены основные характеристики процессов, которые происходят в таких гетероструктурах под действием приложенного внешнего электрического поля. Более подробно, чем в разделе 1.1, освещаются методы для увеличения эффективности поглощения падающего излучения системой GaAs/AlGaAs и приводятся величины усиления фототока, полученные разными способами для систем с квантовыми ямами, обладающими схожими с используемыми в диссертационной работе характеристиками [8,9]. Также важным дополнением к основным фотоэлектрическим эффектам является рассмотрение в данном разделе влияния дефектов в гетероструктуре, связанных с диффузией доноров в квантовых ямах, что может проявляться непосредственно в спектрах фотопроводимости и приводить к бистабильности в работе фотодетекторов на основе квантовых ям.

Во второй главе описаны методики изготовления исследуемых образцов, а также основные методики исследования их структуры, оптических и фотоэлектрических свойств. В данной главе также описаны основные технологические этапы по созданию гибридных ФПУ среднего ИК-диапазона на основе множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs и микрочастиц SiC.

Гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs были получены методом молекулярно-пучковой эпитаксии на установке Riber Epineat 3-5 в НПО «Орион». Для эпитаксиального роста использовались полуизолирующие GaAs-подложки с ориентацией (100). На первом этапе выращивался сравнительно толстый (до 1 мкм) буферный слой GaAs, в некоторых случаях содержащий вспомогательные слои $Al_xGa_{1-x}As$, по которым осуществлялась калибровка скорости роста; далее выращивалась гетероструктура, состоящая из квантовых ям GaAs, разделенных $Al_xGa_{1-x}As$-барьером. Толщина барьерных слоев варьировалась от 50 до 100 нм при содержании алюминия x = 15−35%. В работе исследовались структуры, содержащие 10−50 номинально одинаковых квантовых ям с толщиной в диапазоне от 3 до 7 нм. Для того, чтобы увеличить количество носителей в квантовых ямах, в центре каждой квантовой ямы был размещен δ-слой кремния. Первичная характеризация структуры была проведена с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Для реализации верхнего и нижнего омических контактов, необходимых для создания ФПУ, в структуре были предусмотрены слои GaAs толщиной до 200 нм, легированные кремнием до 10^{17} см$^{-3}$. Таким образом были получены ФПУ на основе выращенной гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, средние латеральные размеры которых составляли 2×4 мм.

Для получения микрочастиц SiC, пригодных для нанесения на поверхность ФПУ с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, была специально разработана и реализована методика на основе пиролиза органосилана $C_{12}H_{36}Si_6$ при высоком давлении (8 ГПа) и высоких температурах (1170–2000 K) в Институте физики высоких давлений РАН. Данная методика позволила получить кристаллы SiC, характеризующиеся высоким структурным совершенством, низкой дисперсией размеров и выраженными решеточными резонансами для отдельных частиц. Анализ спектров рентгеновской дифракции показал, что можно контролировать средний размер частиц от нескольких нанометров до нескольких микрометров при повышении температуры синтеза от 1170 K до 2000 K. Оценка размеров частиц SiC методом сканирующей электронной микроскопии дала согласие с результатами, полученными с помощью спектров рентгеновской дифракции.

Измерения спектров фотолюминесценции проводились в геометрии «на отражение» в диапазоне температур 5−77 K. Образцы помещались в проточный гелиевый криостат и возбуждались излучением непрерывного лазера, работающего на длине волны 472 нм. При исследовании спектров возбуждения фотолюминесценции сигнал люминесценции образца возбуждался излучением лампы накаливания, пропущенным через монохроматор. Рекомбинационное излучение фокусировалось на входную щель решеточного спектрографа, оснащенного многоканальным ПЗС-приемником. Для отождествления фотолюминесцентных спектров применялись расчеты в рамках приближения огибающей волновой функции.

Спектры комбинационного рассеяния света измерялись с помощью следующих двух устройств: портативного рамановского спектрометра EnSpectr R532, соединенного с оптическим микроскопом Olympus S41 (с длиной волны возбуждения 532 нм), и лабораторного рамановского спектрографа, оснащенного охлаждаемым ПЗС-детектором. Длины волн возбуждения лабораторного спектрографа составляли 472 нм и 632 нм.

Для измерения спектров ИК-пропускания в области решеточных резонансов SiC (400−2000 см$^{-1}$) использовался ИК-фурье-спектрометр Bruker Optics IFS-66v/S.

Измерения спектров стационарной фотопроводимости проводились при температуре T = 67 K по стандартной схеме при напряжении на образце U = 3 В. Освещение поверхности образца осуществлялось модулированным с частотой ν = 12,5 Гц излучением глобара через монохроматор ИКС-31. Спектральное разрешение спектроанализатора составляло 0,1 мкм. В большинстве случаев измерения фотопроводимости проводились перпендикулярно плоскости образца.

Для создания гибридного ФПУ микрочастицы SiC наносились на гетероструктуру GaAs/AlGaAs из раствора с изопропиловым спиртом. Пробирки с раствором предварительно перед нанесением на поверхность ФПУ помещали в ультразвуковую ванну при температуре 50 ºС на время около 5 минут. После нанесения микрочастиц SiC на верхней поверхности структуры формировалось покрытие, включающее как отдельные частицы SiC размером ~ 0,5 мкм, так и их агломераты размером ~ 1–1,5 мкм. Среднее расстояние между соседними частицами (агломератами) составляло ~ 3 мкм.

Основные результаты работы и их обсуждение изложены **в третьей главе**. Эта глава посвящена исследованию влияния на фотоэлектрические свойства систем множественных полупроводниковых квантовых ям GaAs/AlGaAs добавления на их поверхность микрочастиц SiC. **В разделе 3.1** описаны результаты по экспериментальному определению положений уровней энергии в квантовых ямах GaAs/AlGaAs на основе анализа спектров низкотемпературной фотолюминесценции и спектров возбуждения фотолюминесценции, что было необходимо для прецизионного контроля положения уровней в квантовых ямах. На рис. 1 изображены типичные спектры низкотемпературной фотолюминесценции гетероструктуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs при перестройке температуры от 5 К до 80 К. Интенсивность всех спектров на рис. 1 соответствует одному и тому же положению и шкале, они нанесены на один рисунок для того, чтобы можно было проследить эволюцию низкотемпературной фотолюминесценции в структуре с ростом температуры. В этих спектрах низкоэнергетичная часть соответствует люминесценции GaAs-буферных слоев, в центральной части спектров излучения

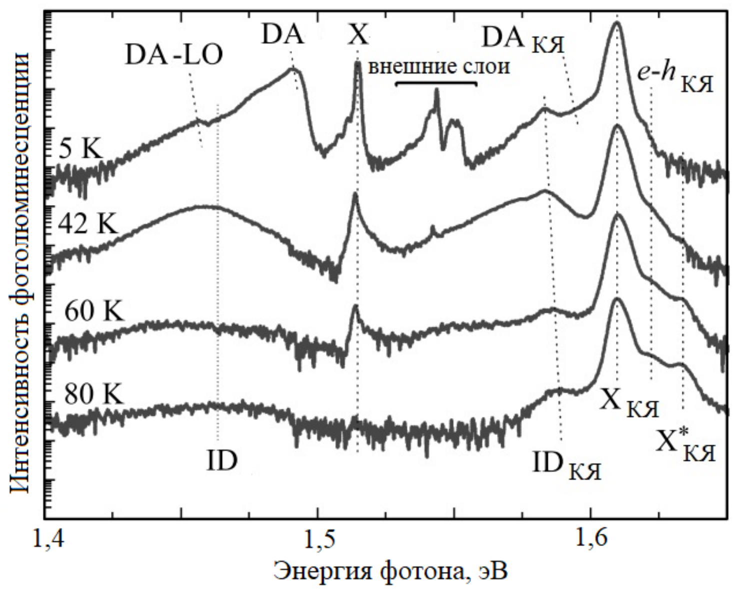

Рис. 1. *Спектры фотолюминесценции гетероструктур GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами шириной 5 нм, измеренные при различных температурах [A1].*

при температуре 5 К регистрируется экситонное излучение калибровочных слоев AlGaAs (подпись «внешние слои» на рис. 1), высокоэнергетичная часть спектров определяется излучательной рекомбинацией носителей в квантовых ямах (слоях GaAs). Линии X, $X_{КЯ}$, $X_{КЯ}^*$ соответствуют экситонному излучению, линии DA, DA-LO, ID, $DA_{КЯ}$, $ID_{КЯ}$ –излучению дефектных состояний, высокоэнергетичное плечо $e\text{-}h_{КЯ}$ интерпретировано как люминесценция несвязанных носителей на основном электронном уровне и основном уровне тяжелых дырок. Данные линии были идентифицированы с помощью расчетов методом огибающей волновой функции и с помощью дополнительных измерений спектров микрофотолюминесценции. Описанные результаты представлены в публикации [А1].

Особое внимание в данном разделе уделено спектрам возбуждения фотолюминесценции. Так, например, для ряда образцов с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs с содержанием алюминия в барьерных слоях 21,8% с помощью данного метода в спектре был обнаружен переход E_2-HH_1 (с первого возбужденного уровня электронов на основной уровень тяжелых дырок), который является запрещенным для квантовых ям, имеющих симметричный профиль потенциала. Его появление указывает на отклонение профиля гетерограниц от прямоугольной формы, что может быть вызвано особенностями технологических переходных процессов при закрытии и открытии ячейки с алюминием в ростовой камере установки молекулярно-пучковой эпитаксии.

В результате экспериментов, описанных в данном разделе, были отобраны 2 серии образцов с длинами волн детектирования излучения 8,7 мкм и 10,6 мкм как наиболее подходящие с точки зрения оптимальных параметров и качества гетерограниц. К тому же, в одной серии образцов пик фоточувствительности приблизительно соответствовал спектральному положению локализованного фонон-поляритонного резонанса в сферических микрочастицах SiC (10,6 мкм), а в другой был расположен вдали от него (8,7 мкм). Это позволило выявить особенности ближнепольной передачи локализованного фонон-поляритона в электронную подсистему квантовых ям GaAs/AlGaAs. Полученные с помощью измерений спектров возбуждения фотолюминесценции данные о влиянии несимметричности профиля квантовых ям в некоторых исследованных образцах на электронный спектр квантовых ям GaAs/AlGaAs изложены в работах [А2, А3].

В разделе 3.2 охарактеризованы структура и свойства синтезированных микрочастиц SiC в области их решеточных резонансов. Основными объектами изучения были синтезированные порошки со средним размером одиночных кристаллов 200–500 нм, полученные при температурах 1520–2000 К как наиболее перспективные для применения в качестве фонон-поляритонных «резонаторов» в среднем ИК-диапазоне. С помощью измерения спектров ИК-пропускания и комбинационного рассеяния света показано, что такие микрочастицы имеют сложную структуру и состоят из ядра с повышенным содержанием носителей и оболочки, обедненной носителями, в результате чего в области LO-фононного резонанса возникает смешанная LO-фонон-плазмонная мода, форма, интенсивность и положение которой зависят от концентрации носителей в ядре SiC, а также от соотношения между радиусом ядра и оболочки в микрочастице.

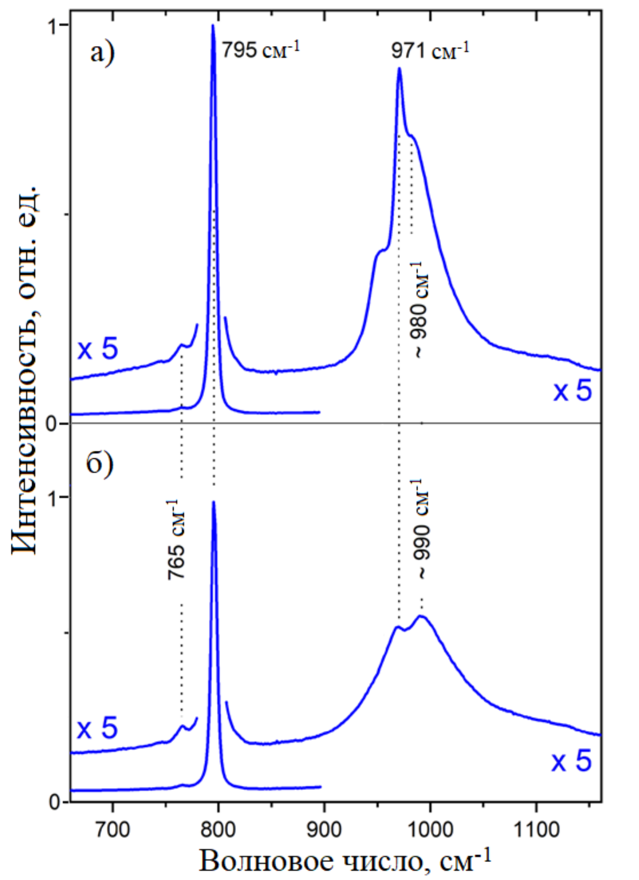

***Рис. 2.** Спектры комбинационного рассеяния микрочастиц SiC, синтезированных при температуре ~ 1600 К, до (а) и после (б) отжига в области, соответствующей процессам первого порядка с участием оптических фононов [A4].*

Продемонстрирована возможность управления смешанной LO-фонон-плазмонной модой при помощи отжига при температуре ~ 1800 К. Рис. 2 иллюстрирует переход после отжига от смешанного фонон-плазмонного режима в легированных кристаллах 3C-SiC (а) к рассеянию на обычных LO-фононах в нелегированном 3C-SiC (б) с сохранением областей внутри ядра микрочастицы, в которых концентрация носителей остается достаточно высокой. По спектральному положению и ширине смешанной LO-фонон-плазмонной моды оценена концентрация свободных носителей в ядре как ~ $3\cdot10^{18}$ см$^{-3}$ до отжига и ~ $1\cdot10^{18}$ см$^{-3}$ после отжига.

Для оценки примесно-дефектного состава и определения основной причины появления свободных носителей была проведена серия экспериментов по измерению спектров низкотемпературной фотолюминесценции синтезированных микрокристаллов SiC, описанная **в разделе 3.3**. На рис. 3 изображен один из таких полученных спектров, демонстрирующий, что низкотемпературная фотолюминесценция синтезированных микрокристаллов SiC связана с излучением донорно-акцепторной пары с азотом на подрешетке углерода и алюминием на подрешетке кремния, и фононными повторениями этой линии с участием LO и LA фононов. Энергия основного донорного состояния при комнатных температурах сопоставима с тепловой энергией, поэтому возникновение повышенной концентрации свободных носителей в микрочастицах SiC было соотнесено с фоновой неконтролируемо введенной в процессе синтеза примесью азота на подрешетке углерода. Этот вывод также подтверждался измерениями кинетики люминесценции, а также спектров люминесценции с временным разрешением.

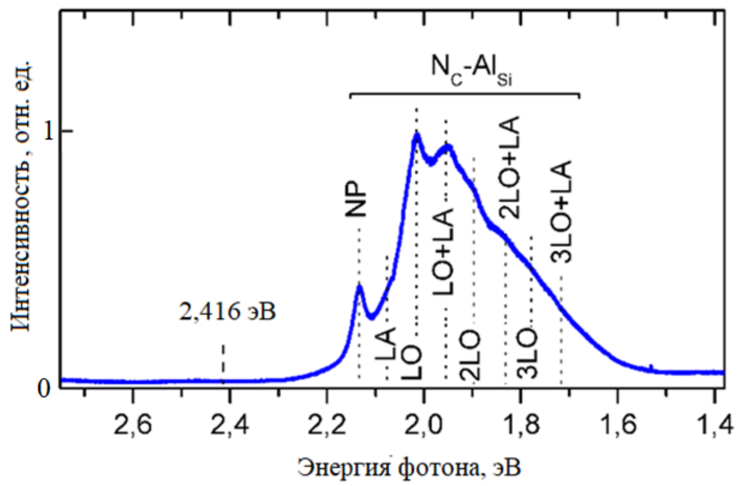

Рис. 3. *Спектр низкотемпературной фотолюминесценции микрочастиц SiC, измеренный при температуре 5 K [A4].*

В рамках данного раздела также показано, что отжиг микрочастиц практически не влияет на вид спектра низкотемпературной фотолюминесценции синтезированных микрочастиц, а значит и на тип доминирующих дефектов в микрочастицах SiC. Измеренные фотолюминесцентные спектры позволили обнаружить также в некоторых образцах наличие малого количества метастабильного кремния и алмаза, образовавшихся в процессе синтеза из $C_{12}H_{36}Si_6$ наряду с SiC, что не было выявлено при первичной характеризации нано- и микрочастиц SiC методом рентгеновской дифракции. Описанные результаты по характеризации синтезированных микрочастиц SiC изложены в публикации [A4].

Раздел 3.4 посвящен численному моделированию ближнего поля микрочастицы SiC, размещенной на поверхности гетероструктуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. В рамках этой задачи рассматривалась плоская электромагнитная волна с длиной волны λ = 8,7 мкм в воздухе, которая падает перпендикулярно на слоистую структуру с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, на поверхности которой лежит сферическая частица SiC диаметром 1 мкм. Расчеты проводились путем решения уравнений Максвелла с граничными условиями для немагнитных сред с соответствующими диэлектрическими функциями. Для этого использовался пакет программ MEEP (MIT Electromagnetic Equation Propagation). Результаты такого моделирования показывают, что за счет взаимодействия излучения с микрочастицей в ее ближней зоне происходит поворот направления напряженности электрического поля (рис. 4), и поэтому внутри гетероструктуры с квантовыми ямами в области ближнего поля частицы возникает компонента электрического поля, направленная вдоль оси роста гетероструктуры. При этом, внутри структуры с квантовыми ямами существует слой, в котором вектор напряженности электрического поля ориентируется практически полностью вдоль оси роста. При данных входных условиях он соответствует глубине погружения внутрь слоев гетероструктуры на 200 нм. Таким образом, показано, что микрочастица SiC эффективно взаимодействует с верхними квантовыми ямами, причем рассчитанная эффективность преобразования поля одной микрочастицей SiC составляет 1,5 %.

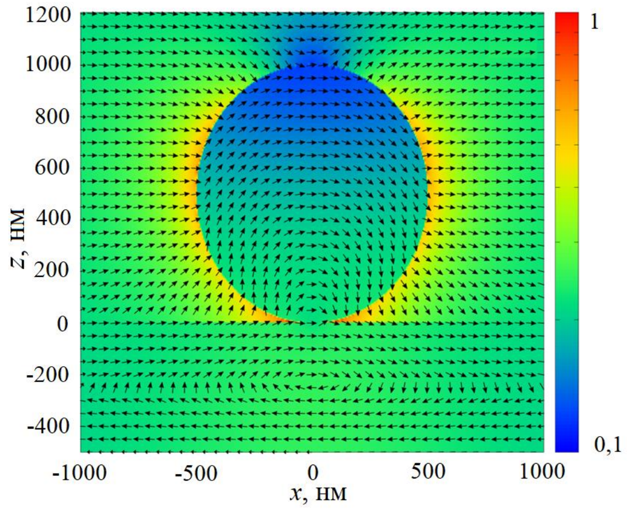

Рис. 4. *Пространственное распределение плотности электромагнитной энергии в плоскости, перпендикулярной направлению роста квантовых ям, на длине волны 8,7 мкм. Стрелки показывают направления напряженности электрического поля [А5].*

В разделе 3.5 приводятся спектры ИК-фотопроводимости для полученных гибридных ФПУ на основе квантовых ям GaAs/AlGaAs с микрочастицами SiC, нанесенными на поверхность гетероструктуры, и расчет из экспериментальных данных увеличения чувствительности такого ФПУ к электромагнитному излучению с поляризацией вдоль плоскости квантовых ям за счет нанесения микрочастиц. Показано, что в результате нанесения микрочастиц SiC на поверхность ФПУ на основе GaAs/AlGaAs сигнал фотопроводимости возрос практически в 1,5 раза для устройств с длиной волны детектирования 8,7 мкм (рис. 5), а для фотоприемников с длиной волны детектирования 10,6 мкм – в области, близкой к положению LO-фонон-поляритонного резонанса – фототок увеличился еще на ~ 30%. Также в данном разделе показано, что вдали от фонон-поляритонного резонанса микрочастицы SiC изменяют форму спектра фотопроводимости ФПУ с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, что связано с несимметричным относительно положения резонанса механизмом передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов. Также в этой главе предложены возможные пути оптимизации параметров гибридного ФПУ с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и микрочастицами SiC для дальнейшего увеличения фоточувствительности в подобной системе. Описанные в разделах 3.4 и 3.5 результаты опубликованы в работе [A5].

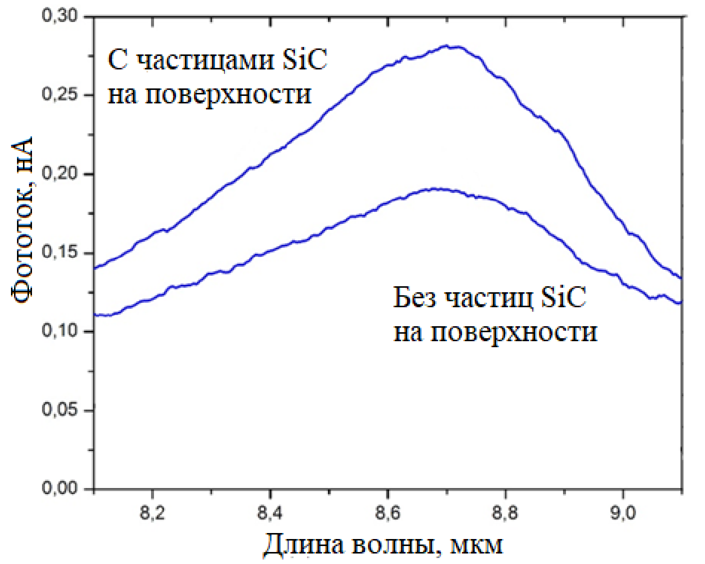

Рис. 5. *Изменение фотоотклика в результате нанесения микрочастиц SiC для ФПУ с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs с максимумом поглощения на длине волны 8,7 мкм [A5].*

<u>**В заключении**</u> представлены основные результаты и выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Установлено, что микрочастицы SiC, получаемые методом пиролиза органосилана $C_{12}H_{36}Si_6$, имеют неравномерное распределение концентрации носителей заряда и состоят из ядра с повышенным содержанием носителей и оболочки, обедненной носителями. Возникновение повышенной концентрации

свободных носителей в микрочастицах SiC связано с образованием мелких донорных уровней на подрешетке углерода.

2) Установлена корреляция параметров синтеза микрочастиц SiC политипа 3C с концентрацией носителей и дефектов в них. Показано, что изменение режимов роста микрочастиц SiC в сочетании с последующей их термообработкой позволяет контролировать не только средний размер кристаллов, но и фонон-плазмонные моды LO в кристаллах.

3) Путем численного моделирования показано, что за счет взаимодействия электромагнитного поля с микронной частицей полярного кристалла SiC на поверхности структуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs в ее ближней зоне происходит поворот вектора напряженности электрического поля. Расчеты показали, что ближнее поле микрочастицы SiC эффективно взаимодействует с верхними квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

4) На основе прямых измерений ИК-фотопроводимости показано, что использование микрочастиц SiC позволяет частично преодолеть ограничения, связанные с правилами отбора для переходов между квантоворазмерными энергетическими уровнями в квантовых ямах GaAs/AlGaAs и приблизительно в 2 раза увеличить чувствительность ФПУ к электромагнитному излучению с поляризацией вдоль плоскости квантовых ям. Полученный результат указывает на принципиальную возможность передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов.

5) Показано, что микрочастицы SiC, нанесенные на поверхность структуры с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, вдали от их фонон-поляритонного резонанса изменяют форму спектра фотопроводимости, что связано с несимметричным относительно положения резонанса механизмом передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов.

Цитированная литература

[1]. Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Toropov A.I., Valisheva N.A., Dvoretsky S.A. Dmitriev D.V., Gulyaev D.V., Fateev V.A., Marchishin I.V., Protasov D.Yu., Savchenko A.P., Ovsyuk V.N., Zhuravlev K. AlGaAs/GaAs Quantum Well Infrared Photodetectors // Two-dimensional Materials for Photodetector. 2018. C. 139–160. DOI: 10.5772/intechopen.71266

[2]. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. URSS, 1990. 688 С.

[3]. Schneider H., Liu H.C. Quantum Well Infrared Photodetectors. Physics and Applications // Springer Series in optical sciences. 1999. С. 258. DOI: 10.4324/9781315152318-12

[4]. Алфёров Ж.И., Копьёв П.С., Бер Б.Я., Васильев А.М., Иванов С.В., Леденцов Н.Н., Мельцер Б.Я. , Уральцев И.Н., Яковлев Д.Р. Собственная и примесная люминесценция в GaAs−AlGaAs- структурах с квантовыми ямами // Физика и техника полупроводников. 1985. Т. 19, № 4. С. 715–721.

[5]. Kawai H., Kaneko K., Watanabe N. Photoluminescence of AlGaAs/GaAs quantum wells grown by metalorganic chemical vapor deposition // J. Appl. Phys. 1984. Т. 56, № 2. С. 463–467. DOI: 10.1063/1.333933

[6]. Miller R.C, Kleinman D. A., W.A. Nordland, Jr., and A. C. Gossard. Luminescence studies of optically pumped quantum wells in GaAs-$Al_xGa_{1-x}As$ multilayer structures // Phys. Rev. B. 1980. Т. 22, № 2. С. 863–871. DOI: 10.1103/PhysRevB.22.863

[7]. Foteinopoulou S., Devarapu G., Chinna R., Subramania G.S., Krishna S., Wasserman D. Phonon-polaritonics: enabling powerful capabilities for infrared photonics // Nanophotonics. 2019. Т. 8, № 12. С. 47. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0232

[8]. Liu L., Chen Y., Huang Zh., Du W., Zhan P., Wang Zh.. Highly efficient metallic optical incouplers for quantum well infrared photodetectors // Sci. Rep. 2016. Т. 6, С. 30414. DOI: 10.1038/srep30414

[9]. Kalchmair S., Detz H., Cole G. D., Andrews A. M., Klang P., Nobile M., Gansch R., Ostermaier C., Schrenk W., Strasser G. Photonic crystal slab quantum well infrared photodetector // Appl. Phys. Lett. 2011. Т. 98, № 011105. С. 3. DOI: 10.1063/1.3537954

Публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

[A1]. Кривобок В.С., Литвинов Д.А., Николаев С.Н., Онищенко Е.Е., Пашкеев Д.А., Чернопицский М.А., **Григорьева Л.Н.** Экситонные эффекты и примесно-дефектное излучение в GaAs/AlGaAs-структурах, применяемых для изготовления детекторов среднего ИК-диапазона // Физика и техника

полупроводников. 2019. Т. 53, № 12. С. 1632–1640 (DOI: 10.21883/FTP.2019.12.48617.9214).

Krivobok V.S., Litvinov D.A., Nikolaev S.N., Onishchenko E.E., Pashkeev D.A., Chernopittsky M. A., **Grigor'eva L. N.** Excitonic Effects and Impurity-Defect Emission in GaAs/AlGaAs Structures Used for the Production of Mid-IR Photodetectors // Semiconductors. 2019. Vol. 53, № 12, P. 1608–1616. (SJR Q3 IF: 0,263, DOI: 10.1134/S1063782619160139).

[А2]. Кривобок В.С., Пашкеев Д.А., Литвинов Д.А., **Григорьева Л.Н.**, Колосов С.А. Влияние интерфейсных эффектов на электронный спектр структур GaAs/AlGaAs, используемых для создания фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона // Письма в «Журнал технической физики». 2020. Т. 46, № 6, С. 3–6. (DOI: 10.21883/PJTF.2020.06.49155.18130).

Krivobok V.S., Pashkeev D.A., Litvinov D.A., **Grigor'eva L.N.**, Kolosov S.A. The Influence of Interfacial Effects on the Electron Spectrum of GaAs/AlGaAs Structures Used for the Creation of Mid-IR Photodetectors // Technical Physics Letters. 2020. Vol. 46, № 3, P. 256–259 (SJR Q3 IF: 0,306, DOI: 10.1134/S1063785020030256).

[А3]. Литвинов Д.А., Пашкеев Д.А., **Григорьева Л.Н.**, Колосов С.А., Аминев Д.Ф. Исследование одноэлектронного спектра GaAs/AlGaAs-гетероструктуры для фотодетекторов среднего ИК-диапазона с помощью измерений низкотемпературной люминесценции // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2020. Т. 47, № 4.С. 9–16 (DOI: 10.3103/S1068335620040041).

Litvinov D.A., Pashkeev D.A., **Grigoreva L.N.**, Kolosov S.A., Aminev D.F. Study of Single-Electron Spectrum of GaAs/AlGaAs Heterostructure for Mid-IR Photodetectors via Low-Temperature Luminescence // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2020. Vol. 47, № 4. P. 105–109 (SJR Q3 IF: 0,229, DOI: 10.3103/S1068335620040041).

[А4]. Ekimov E.A., Krivobok V.S., Kondrin M.V., Litvinov D.A., **Grigoreva L.N.**, Koroleva A.V., Zazymkina D.A., Khmelnitskii R.A., Aminev D.F., Nikolaev S. N. Structural and Optical Properties of Silicon Carbide Powders Synthesized from Organosilane Using High-Temperature High-Pressure Method // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 11. P. 402–405 (SJR Q1 IF: 0,839, DOI: 10.3390/nano11113111);

[А5]. Кривобок В.С., Кондорский А.Д., Пашкеев Д.А., Екимов Е.А., Шабрин А.Д., Литвинов Д.А., **Григорьева Л.Н.**, Колосов С.А., Чернопицский М.А., Клековкин А.В., Форш П.А. Гибридный фотоприемник среднего инфракрасного диапазона на основе полупроводниковых квантовых ям // Письма в

«Журнал технической физики». 2021. Т. 47, № 8.С. 33–36 (DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50851.18656).

Krivobok V. S., Kondorskiy A. D., Pashkeev D.A., Ekimov E.A., Shabrin A.D., Litvinov D.A., **Grigoreva L.N.**, Kolosov S.A., Chernopitssky M.A., Klekovkin A.V., Forsh P.A.. A Hybrid Mid-IR Photodetector Based on Semiconductor Quantum Wells // Technical Physics Letters. 2021. Vol. 47, № 5, P. 388–391 (SJR Q3 IF: 0,306, DOI: 10.1134/S1063785021040210).

Иные публикации:

[А6]. Григорьева Л.Н., Кривобок В.С., Кондорский А.Д., Пашкеев Д.А., Екимов Е.А., Шабрин А.Д., Литвинов Д.А., Колосов С.А., Чернопицский М.А., Клековкин А.В., Форш П.А. Гибридный ИК-фотоприемник на основе полупроводниковых квантовых ям. Материалы Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», серия Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования, Нижний Новгород, т. 2, с. 622–623, 2021.

[А7]. Кривобок В.С., Кондорский А.Д., Пашкеев Д.А., Екимов Е.А., Шабрин А.Д., Литвинов Д.А., Григорьева Л.Н., Колосов С.А., Чернопицский М.А., Клековкин А.В., Форш П.А. Гибридный ИК-фотоприемник на основе полупроводниковых квантовых ям. Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2021» (электронный ресурс), 2021.

[А8]. Григорьева Л.Н., Кривобок В.С., Кондорский А.Д., Пашкеев Д.А., Екимов Е.А., Шабрин А.Д., Литвинов Д.А., Колосов С.А., Чернопицский М.А., Клековкин А.В., Форш П.А.Усиление поглощения электромагнитного излучения в GaAs/AlGaAs-гетероструктуре в присутствии частиц-микрорезонаторов SiC на поверхности. Труды школы-семинара «Волны-2021», секция Метаматериалы и фотонные кристаллы, Москва, с. 23–24, 2021.

[А9]. Кривобок В.С., Кондорский А.Д., Пашкеев Д.А., Екимов Е.А., Шабрин А.Д., Литвинов Д.А., Григорьева Л.Н., Колосов С.А., Чернопицский М.А., Клековкин А.В. Гибридный ИК-фотоприемник на основе полупроводниковых квантовых ям. Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике», Москва, с. 52–53, 2020.

[А10]. Григорьева Л.Н., Литвинов Д.А., Кривобок В.С. Метод оценки качества интерфейсов в QWIP-гетероструктурах по их спектрам возбуждения экситонной фотолюминесценции. Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2020» (электронный ресурс), 2020.

[А11]. Григорьева Л.Н. Исследование оптических свойств микрокристаллов SiC в области решеточных резонансов для создания гибридных систем с ближнепольной резонансной связью в среднем ИК-диапазоне. Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Фундаментальная и прикладная физика, Москва, с. 63–65, 2019.

[А12]. Григорьева Л.Н., Литвинов Д.А., Королева А.В. Оптическая спектроскопия нано- и микрокристаллов SiC, используемых для создания гибридных QWIP-структур. Сборник аннотаций XVI Курчатовской междисциплинарной молодежной научной школы, Москва, тезисы, с. 86, 2019.

[А13]. Кривобок В.С., Литвинов Д.А., Николаев С.Н., Онищенко Е.Е., Пашкеев Д.А., Чернопицский М.А., Григорьева Л.Н. Экситонные эффекты и примесно-дефектное излучение в GaAs/AlGaAs-структурах, применяемых для изготовления детекторов среднего ИК-диапазона. Сборник тезисов VII Международного Симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (КОИПСС-2019), Москва, с. 57–58, 2019.

[А14]. Кривобок В.С., Литвинов Д.А., Николаев С.Н., Онищенко Е.Е, Пашкеев Д.А., Чернопицский М.А., Григорьева Л.Н. Экситонные эффекты и примесно-дефектное излучение в GaAs/AlGaAs-структурах, применяемых для изготовления детекторов среднего ИК-диапазона. Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике», г. Москва, с. 42–44, 2019.

[А15]. Григорьева Л.Н. Исследование структурных особенностей микрокристаллов SiC с помощью метода комбинационного рассеяния света для использования их в гибридных системах с ближнепольной резонансной связью в среднем ИК-диапазоне». Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике», Москва, с. 15–19, 2019.