

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Григорьевой Людмилы Николаевны на тему: «Влияние частиц карбида кремния на фотопроводимость систем множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs» по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников»

Диссертационная работа Григорьевой Л.Н. посвящена исследованию структурных, оптических и фотоэлектрических свойств систем множественных полупроводниковых квантовых ям GaAs/AlGaAs с нанесенными на поверхность структур микрочастицами SiC, а также изучению возможности создания на их основе фотодетекторов среднего ИК-диапазона. **Актуальность** темы исследования определяется ее направленностью на создание новых типов гибридных фотоприемных устройств, в которых реализована резонансная ближнеполюсная связь между локализованным фонон-поляритоном и электронной подсистемой полупроводниковых квантовых ям GaAs/AlGaAs.

Гетеропара GaAs/AlGaAs является одной из наиболее широко используемых для изготовления фотоприемников среднего и дальнего ИК-диапазона с множественными квантовыми ямами – так называемых QWIP-структур. При целом ряде преимуществ QWIP-структур на основе GaAs/AlGaAs, существует проблема, связанная с тем, что в стандартной геометрии «на просвет», когда излучение падает перпендикулярно на поверхность структуры, электромагнитное излучение практически не поглощается. Существующие механизмы решения данной проблемы не способны радикально увеличить фоточувствительность. В диссертационной работе Григорьевой Л.Н. предложен оригинальный способ увеличения фотопроводимости, и, соответственно, фоточувствительности структуры множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs путем использования ближнего поля фонон-поляритонного резонанса микрочастиц SiC, нанесенных на поверхность структуры.

Диссертационная работа имеет классический вид и включает следующие части: введение, три главы, заключение и список литературы. Объем работы составляет 107 страниц, работа содержит 40 рисунков. Список литературы состоит из 138 наименований.

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. Приведена энергетическая структура квантовых ям GaAs/AlGaAs, описаны устройства фотодетекторов на их основе. 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. В данной главе также представлены спектры фотолюминесценции структур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, схожими по характеристикам с исследованными в работе образцами, описаны свойства фонон-поляритонных резонансов в полярных диэлектриках и, в частности, в полярных кристаллах SiC, и рассмотрено влияние электрического поля на энергетический спектр носителей, локализованных в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. Литературный обзор, которому посвящена эта глава, полностью раскрывает тему диссертации и ее проблематику.

Вторая глава посвящена методике эксперимента и основным технологическим этапам по созданию гибридных фотоприемников среднего ИК-диапазона на основе множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs и микрочастиц SiC. Следует заметить, что в рамках диссертационной работы

Григорьевой Л.Н. были использованы и охарактеризованы нано- и микрочастицы SiC, полученные оригинальным методом синтеза – путем пиролиза органосилана $C_{12}H_{36}Si_6$ при высоких давлениях при высоких температурах, что вносит вклад в базу знаний о полярных кристаллах с высоким структурным совершенством и открывает новые перспективы их использования, в частности, в задачах фотоники ИК-диапазона. Гетероструктуры GaAs/AlGaAs, используемые в работе, были изготовлены уже известным и хорошо отработанным методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Наиболее сложной задачей при изготовлении гибридных фотоприемников являлось согласование между собой параметров гетероструктур и микрочастиц так, чтобы было возможно осуществление резонансного электромагнитного взаимодействия между ними. Эта задача в рамках диссертационной работы Григорьевой Л.Н. была успешно решена.

В третьей главе представлены результаты по экспериментальному определению положений уровней энергии в квантовых ямах GaAs/AlGaAs на основе анализа спектров низкотемпературной фотолюминесценции. Это позволило осуществить прецизионный контроль положения уровней энергии в квантовых ямах. В рамках такой характеристики обнаружены электронные переходы, запрещенные правилами отбора, что позволило выявить особенности технологических переходных процессов при закрытии и открытии ячейки с алюминием в ростовой камере установки МЛЭ. В результате для создания гибридных фотодетекторов были отобраны 2 серии образцов квантовых ям GaAs/AlGaAs с длинами волн детектирования излучения 8,7 мкм и 10,6 мкм как наиболее подходящие с точки зрения оптимальных параметров и качества гетерограниц. Следует отметить удачный выбор исследуемых образцов – 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 диссертанту выявить особенности ближнепольной

передачи локализованного фонон-поляритона в электронную подсистему квантовых ям GaAs/AlGaAs.

С помощью методов комбинационного рассеяния света и низкотемпературной фотолюминесценции диссертантом было определено, что синтезированные микрочастицы SiC 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 плазменная мода, форма, интенсивность и положение которой зависят от концентрации носителей в ядре SiC, а также от соотношения между радиусом ядра и оболочки в микрочастице. Эти результаты могут быть положены в основу дальнейшей оптимизации свойств частиц для более тонкой настройки фонон-поляритонных резонансов.

С помощью численного моделирования показано, что микрочастица SiC эффективно взаимодействует с несколькими верхними квантовыми ямами в GaAs/AlGaAs структурах. Экспериментально установлено, что в результате нанесения микрочастиц SiC на поверхность фотоприемного устройства на основе GaAs/AlGaAs сигнал фотопроводимости возрастает практически в 1,5 раза для устройств с длиной волны детектирования 8,7 мкм, а для фотоприемников с длиной волны детектирования 10,6 мкм – в области, близкой к положению LO-фонон-поляритонного резонанса – фототок увеличивается еще на ~ 30%.

Заключение диссертации содержит основные результаты и выводы работы.

Результаты диссертационной работы Григорьевой Л.Н. обладают **новизной** и показывают принципиальную возможность реализации гибридной системы с ближнепольной резонансной связью между фонон-поляритонными резонансами микрочастиц SiC и электронной подсистемой множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методов исследования, применением взаимодополняющих

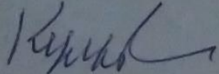
экспериментальных методик, сопоставлением некоторых данных экспериментов и численного моделирования с результатами работ других авторов, выполненных на схожих образцах. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5 научных статьях и доложены на 10 международных и всероссийских конференциях.

В то же время по диссертации имеются следующие замечания:

1. В литературном обзоре приведена схема излучательных переходов в квантовых ямах GaAs/AlGaAs, в которой есть переходы на акцепторные состояния, в то же время донорные состояния там отсутствуют. Однако исследованные образцы множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs были легированы донорами. Желательно было бы пояснить, как изменятся спектры фотолюминесценции структур с множественными квантовыми ямами GaAs/AlGaAs при учете донорных состояний.
2. В работе не приведены зонные диаграммы исследованных структур, было бы крайне полезно указать на этих диаграммах возможные излучательные переходы и соответствующие им энергии (длины волн). Осталось неясным, почему были взяты структуры с 10 и 50 квантовыми ямами и сколько нужно квантовых ям для эффективного поглощения света. Надо было проанализировать численно и экспериментально, как эффект влияния частиц SiC на фотопроводимость множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs зависит от числа квантовых ям.
3. В диссертации исследования фотопроводимости проведены при температуре ~ 70 К, а фотолюминесценции – при температуре ~ 5 К. Процессы рекомбинации неравновесных носителей заряда при столь различных температурах могут заметно отличаться. Однако в работе этот вопрос никак не обсуждается.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертация оформлена в соответствии с приложениями № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Соискатель Григорьева Людмила Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников».

Официальный оппонент: доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор  Кульбачинский Владимир Анатольевич

Контактные данные:

тел.: +7 (495) 939-11-47; e-mail: kulb@mig.phys.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Адрес места работы:

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, МГУ, Физический факультет, кафедра физики низких температур и сверхпроводимости

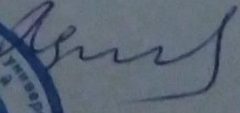
тел.: +7 (495) 939-16-82; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись В.А. Кульбачинского удостоверяю:

Ученый секретарь физического факультета МГУ

профессор



 В.А. Караваев

