

**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 Людмилы Николаевны «Влияние частиц карбида кремния на фотопроводимость систем множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs» посвящена фотоприемным устройствам на основе полупроводниковых квантовых ям GaAs/AlGaAs, которые широко используются в настоящее время для детектирования электромагнитного излучения среднего и дальнего ИК-диапазона. В диссертационной работе Григорьевой Л.Н. предложен новый метод, позволяющий частично преодолеть фундаментальные квантовомеханические ограничения в эффективности работы таких устройств. Данный метод предполагает использование ближнего поля фонон-поляритонных резонансов в микрочастицах полярных кристаллов карбида кремния и является перспективным для усиления ближнего поля в среднем и дальнем ИК-диапазонах по аналогии с плазмонным резонансом в металлических наночастицах в областях видимого и ближнего ИК-диапазонов.

В рамках проведенных исследований впервые создан прототип гибридного фотоприемника, состоящего из структуры с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и размещенных на ее поверхности микрочастиц карбида кремния (SiC), для которого достигнуто существенное увеличение фоточувствительности (в полтора-два раза) за счет непосредственной резонансной передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов в микрочастицах SiC. **Актуальность и новизна** работы Григорьевой Л.Н. не вызывают сомнений.

Настоящая диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 138 ссылок. Первая глава носит обзорный характер и посвящена квантовым ямам GaAs/AlGaAs и фотодетекторам на их основе с подробным описанием их энергетической структуры, фотолюминесцентных и фотоэлектрических свойств, а также фонон-поляритонным резонансам в микрочастицах полярных кристаллов SiC. Данная глава в полной мере раскрывает проблему необходимости поиска новых методов в преодолении фундаментальных ограничений, связанных с запретом на поглощение такими фотодетекторами излучения, падающего по нормали к поверхности.

Во второй главе приведены методики изготовления, исследования структуры, оптических и фотоэлектрических свойств исследуемых образцов. Описаны экспериментальные установки по измерению фотолюминесцентных спектров при низких температурах, спектров комбинационного рассеяния света (КРС), спектров ИК-пропускания и ИК-фотопроводимости. Следует отметить, что каждый этап по созданию прототипов гибридных фотоприемников требовал особой пробоподготовки – так, для получения микрочастиц SiC с высоким структурным совершенством и выраженными решеточными резонансами был применен оригинальный метод синтеза при высоком давлении и в интервале высоких температур, что позволило осуществлять плавную подстройку фононных резонансов в SiC. Большой объем работы проведен для экспериментального определения положения энергетических уровней в квантовых ямах так, чтобы согласовать фонон-поляритонный резонанс и электронные переходы между квантоворазмерными уровнями.

Глава 3 посвящена исследованию улучшения фотоэлектрических свойств систем множественных квантовых ям GaAs/AlGaAs при добавлении на их поверхность микрочастиц SiC. В данной главе изложено много интересных и значимых фактов, одним из которых является разработанная методика по комплексной характеристике технологических особенностей гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs фотолюминесцентными методами.

Проведенные фотолюминесцентные исследования позволили не только осуществить экспериментальное определение положения энергетических уровней электронов в квантовых ямах, но и, в частности, получить данные о влиянии несимметричности профиля квантовых ям в исследованных образцах на их электронный спектр. Данные результаты не вошли в число основных выводов по диссертационной работе, но являлись критически важными при создании гибридного фотодетектора на основе GaAs/AlGaAs и микрочастиц SiC.

Полученные в рамках Главы 3 данные о распределении концентрации носителей заряда в микрочастицах SiC и предложенные методы варьирования их среднего размера, положения и интенсивности фонон-плазмонных мод могут быть полезны при подборе условий синтеза микрочастиц SiC.

Для того, чтобы выяснить какой механизм лежит в основе усиления электромагнитного поля через ближнее поле фонон-поляритонов в микрокристаллах SiC, были выполнены численные расчеты и получен результат, который позволил установить физические механизмы локального усиления напряженности электромагнитного поля ИК-диапазона вблизи поверхности фотоприемного устройства с расположенными на ней микрочастицами SiC. Таким образом было показано, что ближнее поле микрочастицы SiC эффективно взаимодействует с верхними квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

Центральным результатом работы является достигнутое впервые усиление фототока в 2 раза для гибридного фотоприемного устройства (с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs и частицами SiC) по сравнению со стандартным устройством с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. Также выявлены некоторые особенности, связанные с несимметричным относительно положения резонанса механизмом передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям через ближнее поле локализованных фонон-поляритонов.

В заключении диссертационной работы представлены основные результаты и выводы, которые свидетельствуют не только о том, что были получены новые фундаментальные результаты, но и о возможности широкого практического применения полученных явлений и результатов. Эти

экспериментальные результаты закладывают основу для создания новых гибридных фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона, в которых осуществлена непосредственная резонансная связь между фонон-поляритоном в микрочастицах SiC и резонансным электронным переходом между квантоворазмерными энергетическими уровнями в полупроводниковых квантовых ямах.

**Достоверность** результатов подтверждается тем, что они получены с использованием современных экспериментальных и аналитических методов на большом количестве образцов.

Результаты работы были представлены автором на 10 российских и международных конференциях и опубликованы в авторитетных научных журналах, таких как Физика и техника полупроводников, Письма в «Журнал технической физики», Nanomaterials. Таким образом можно говорить о хорошей апробации работы.

**Автореферат** в полной мере отражает материал диссертации.

Представленные в работе результаты и выводы являются **достаточно обоснованными**.

Однако диссертационная работа не свободна от недостатков.

1) Среди способов преодоления правил отбора для межподзонных переходов можно было бы отметить такой экзотический как формирование латеральных сверхрешёток на нанофасетрированных поверхностях с большими индексами Миллера, например работы Н.Н. Леденцова по сверхрешёткам на поверхности (311). Конечно, создание латеральных сверхрешёток с использованием подходов самоорганизации весьма фантастическая, но зато красивая задача.

2) В главе 3 температурные зависимости ФЛ были выполнены для структуры с квантовыми ямами шириной 5 нм (рисунок 3.1), а спектры возбуждения ФЛ (ВФЛ) были зарегистрированы от структур с различными ширинами квантовых ям, кроме 5 нм (рисунок 3.3). Для комплексного анализа стоило провести исследования ФЛ и ВФЛ для всех исследуемых структур.

Вообще, для удобства восприятия надо было составить таблицу с параметрами исследуемых образцов – ширина ям и барьеров, состав барьеров, количество периодов.

3) Необходимо было более подробно описать процедуру анализа спектров КРС от частиц SiC, с помощью которой был сделан вывод о том, что частицы имеют структуру “core-shell” с проводящим ядром и менее проводящей оболочкой. Также не вполне понятна причина такой структуры. Это слой обеднения на границе частиц? Отсутствуют количественные оценки какова толщина оболочки в сравнении с размером частиц SiC.

4) На странице 14 говорится о плазмонном резонансе как о способе усиления электромагнитного излучения. Возможно, я не прав, но я бы пояснил, что речь идёт о локальном усилении. Усиливаться излучение может только в инверсно-заселённой активной среде лазеров. В используемом подходе скорее подразумевается перераспределение интенсивности излучения и его концентрации в нужных «горячих» точках.

5) Также в тексте присутствуют ошибки и опечатки. В качестве примера приведу: стр. 14 «Фонон-полятонные» вместо «Фонон-поляритонные»; стр. 15 – спектры КРС наночастиц отличаются от спектров объёмного материала и для неполярных кристаллов, смотри например известную модель локализации фононов для наночастиц кремния, германия или алмаза; страница 20, подпись к рисунку 1.3, должны быть нанометры, а не мкм; страница 26 – 100 слоёв GaAs толщиной 11.2 нм, получается что толщина монослоя это 1.12 ангстрема, тогда как толщина монослоя для ориентации (100) должна составлять половину от постоянной решётки равную 5.65 ангстрема; страница 29 «возбуждения ВФЛ» это тавтология, так как ВФЛ – это уже возбуждение фотолуминесценции.

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, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, 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, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории неравновесных полупроводниковых систем Института физики полупроводников имени А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

Володин Владимир Алексеевич



Контактные данные:

тел.: +7(383)333-24-70, e-mail: v.volodin@g.nsu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.10 – «Физика полупроводников»

Адрес места работы:

630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13, ИФП СО РАН

Тел.: +7(383)330-90-55; e-mail: ifp@isc.nsc.ru

Подпись Володина Владимира Алексеевича заверяю,

Зам. директора ИФП СО РАН, к.ф.-м.н.



А.В. Каламейцев

«21» февраля 2023 г.