

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»

Одной из наиболее широко используемых гетероструктур для изготовления фотоприемников с множественными квантовыми ямами (QWIP-структур) для областей среднего и дальнего ИК-диапазонов является гетеропара GaAs/AlGaAs. Принцип работы QWIP основан на переходах электронов между квантоворазмерными уровнями в квантовых ямах, и особенностью таких переходов, связанной с правилами отбора, является требование перпендикулярности электрического поля волны к плоскости роста структуры с квантовыми ямами. Для достижения максимальной эффективности работы таких устройств, существует необходимость в разработке новых подходов, обеспечивающих более эффективные механизмы взаимодействия электромагнитного поля с электронной подсистемой квантовых ям. Один из таких подходов в области видимого и ближнего инфракрасного диапазонов основан на использовании ближнего поля металлических наночастиц, например, известно гигантское усиление комбинационного рассеяния при использовании металлических нанокристаллов на поверхности изучаемого вещества. В диссертационной работе Л.Н. Григорьевой развивается альтернативный подход, подразумевающий использование ближнего поля фонон-поляритонного резонанса микрочастиц полярных кристаллов карбида кремния (SiC). Это определяет **актуальность** диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, основной части, состоящей из трех глав, заключения и списка литературы из 138

наименований. Общий объем работы составляет 107 страниц текста, включая 40 рисунков.

В работе получен ряд оригинальных результатов, из которых хотелось бы выделить следующие, определяющие научную **новизну** работы.

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. Этот способ является оригинальной альтернативой уже известным методам создания сложных металлических или диэлектрических резонаторов, сочетает в себе простоту изготовления «резонаторной» части и позволяет избежать потерь, характерных для плазмонов в металлических нанобъектах.

В ходе работы с помощью численного моделирования был установлен механизм, вследствие которого микрочастицы SiC могут усиливать поглощение в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. В данной части работы было показано, что за счет взаимодействия электромагнитного поля с микронной частицей карбида кремния 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 также показали, что ближнее поле микрочастицы SiC эффективно взаимодействует с верхними квантовыми ямами GaAs/AlGaAs.

Интересным эффектом является обнаруженная в спектрах ИК-фотопроводимости гибридных устройств несимметричность передачи возбуждения в электронную подсистему квантовых ям относительно положения фонон-поляритонного резонанса в микрочастицах SiC, и, как следствие, зависимость величины усиления поля микрочастицами от длины волны излучения. Этот результат может дополнительно подтверждать то, что усиление фоточувствительности гибридного фотоприемного устройства

происходит благодаря фонон-поляритонному резонансу в частицах полярного кристалла SiC.

С практической точки зрения важным результатом является то, что нанесение микрочастиц SiC на поверхность фотоприемного устройства с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs 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 фотоприемного устройства к электромагнитному излучению с поляризацией вдоль плоскости квантовых ям.

Полученные в диссертационной работе 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. Данные о распределении концентрации носителей заряда в микрочастицах SiC и предложенные методы варьирования их среднего размера и фонон-плазмонных мод могут быть использованы для контроля свойств при синтезе микрочастиц SiC с высоким структурным совершенством.

Достоверность полученных Григорьевой Л.Н. результатов не вызывает сомнений и определяется тем, что все экспериментальные данные получены с использованием современной экспериментальной техники и апробированных методик измерений. Положения диссертации вполне обоснованы полученными экспериментальными и расчетными результатами. Научные результаты, составляющие основу диссертации, опубликованы в авторитетных российских и международных научных журналах и многократно докладывались на российских и международных научных конференциях высокого уровня.

По диссертации можно высказать некоторые замечания, которые, впрочем, имеют скорее характер пожеланий.

1. В разделе 3.1 указано, что для расчета высоты потенциального барьера для электронов в квантовых ямах было использовано правило 68/32%, а в литературном обзоре (в разделе 1.2) указано, что высоту энергетического барьера можно вычислить, зная концентрацию Al в барьерах (x), и высота барьера может быть равна величине от $0,75x$ до $1,1x$. Дают ли эти приближения схожие результаты или нет?

2. В разделе 3.1 диссертации описан обнаруженный в ходе работы факт взаимосвязи асимметрии квантовых ям с особенностями переходных процессов, происходящих в ростовой камере установки молекулярно-лучевой эпитаксии при закрытии и открытии ячейки с алюминием во время напыления барьерных слоев в гетероструктуре GaAs/AlGaAs. Однако в диссертационной работе не освещено применение этой полезной информации с целью, к примеру, возможной корректировки технологических параметров при напылении гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

3. Не совсем ясно, как удерживались нанесенные микрочастицы на поверхности фотодетектора. Для практических применений, возможно, следует рассмотреть помещение микрочастиц в матричную среду для фиксации микрочастиц и увеличения степени проникновения ближнего поля в полупроводниковую часть гетероструктуры.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. 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.

Таким образом, соискатель Григорьева Людмила Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников».

Официальный оппонент:
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
лаборатории нанооптики и плазмоники
Центра фотоники и двумерных материалов
Московского физико-технического института
(национального исследовательского университета)

«__» _____ 2022 г.



/ Целиков Г.И. /

Контактные данные:
тел.: 7(910)4530231, e-mail: celikov@physics.msu.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защита диссертация:
01.04.10 – Физика полупроводников

Адрес организации: 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский переулок, д. 9
E-mail: info@mipt.ru Телефон: +7 (495) 408-45-54

Подпись Целикова Глеба Игоревича заверяю:

Ученый секретарь МФТИ,
кандидат физико-математических наук, доцент

«__» _____ 2022 г.



/ Евсеев Е.Г. /