

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Ушанова Виталия Игоревича
«Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb»,
представленной к защите на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.10 – физика полупроводников

Арсенид галлия и родственные полупроводниковые материалы активно исследуются и широко используются в промышленности. В настоящее время найдено применение для большого числа весьма сложных наноструктур на основе арсенида галлия. Несмотря на это, поиск новых возможностей для улучшения параметров полупроводниковых устройств продолжается. Одним из существенных ограничений является невозможность получения материалов, сочетающих высокие коэффициенты оптического поглощения с высоким быстродействием. В этом отношении перспективным представляется включение в полупроводниковые матрицы металлических наноструктур, обладающих плазмонными резонансами. В этом случае время жизни носителей может быть сокращено без ущерба для эффективности, так как одновременно возрастает и концентрация электромагнитной энергии в ближнем поле плазмонных наночастиц. Несмотря на значительные усилия, направленные на исследование композитных сред описанного выше состава, многие вопросы остаются невыясненными. В связи с этим, выполненные в диссертации исследования, несомненно, актуальны.

В рассматриваемой диссертации сделана успешная попытка реализовать включение металлических наноструктур в полупроводниковую матрицу, не компрометируя совершенство ее кристаллической структуры. Основываясь на отработанных технологиях эпитаксиального роста полупроводниковых наноструктур, соискатель предложил, организовал создание и подробно исследовал новые полупроводниковые структуры, содержащие металлические включения. Важной особенностью полученных наноструктур является их полная совместимость с традиционными техническими приемами, принятыми в полупроводниковой промышленности, что открывает перспективы масштабирования их производства. Выбор материалов, порядок их нанесения и последующей обработки был заранее продуман и обоснован теоретическими оценками, а полученные результаты осмысленны и интерпретированы на основе надежных физических моделей.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, и заключения. Список цитируемой литературы содержит 218 наименований и включает последние работы в области исследования. Материал диссертации представлен на 143 страницах.

Во введении автор формулирует цель работы и перечисляет решенные в ходе ее выполнения задачи, приводит защищаемые положения, отмечает новизну проведенных исследований и их значение для практики.

Первая глава посвящена подробному литературному обзору, охватывающему как общие представления об оптических свойствах полупроводниковых и композитных структур, включающих металлические наночастицы, так и конкретные результаты исследований. Описываются связи между энергетической структурой полупроводниковых материалов и их диэлектрической проницаемостью. Приводятся формулы для оптического поглощения и положение окон прозрачности. Особое внимание уделено экситонным возбуждениям в квантовых ямах. Обсуждаются оптические свойства периодических структур, содержащих квантовые ямы. Применительно к процессам с участием металлических наночастиц излагаются основные положения теории эффективной среды. Приводятся результаты расчетов плазмонных резонансов на основе теории Ми. Подробно излагается методика получения нановключений, могущих проявлять металлические свойства и обладать плазмонными резонансами в области прозрачности полупроводникового материала.

Во второй главе изложены детали технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, использованной для получения образцов, содержащих металлические нановключения. Описываются температурные режимы постобработки, позволяющие восстановить кристаллическое совершенство полупроводниковой матрицы, полученной при пониженной ростовой температуре и искаженной преднамеренно внесенными примесями и отклонениями от оптимальной стехиометрии. Подробно описано получение образцов, исследованию которых посвящена диссертационная работа, их состав, число и толщины отдельных слоев, входящих в образцы, а также результаты исследований, которые подтверждают получение спроектированных структур.

В третьей главе приводятся результаты оптических экспериментов с полученными образцами. Прежде всего, описываются спектры отражения, и делается вывод о существенном влиянии плазмонных возбуждений в сурмяно-мышьяковистых включениях на интерференционные явления в тонких слоях арсенида алюминия-галлия в его окне прозрачности. На основе экспериментальных данных рассчитывается коэффициент экстинкции в указанных слоях и дается феноменологическое описание наблюдаемых особенностей с использованием теории Ми. Для сурмяно-мышьяковистых включений определяются параметры модели Друде, которые соответствуют измеренным оптическим свойствам слоев с металлическими включениями.

Четвёртая глава посвящена рассмотрению более сложных композитов, состоящих

из периодически расположенных слоев наночастиц. Здесь автор приводит результаты измерений для отражения света при различных углах падения для обеих поляризаций падающего света. Обсуждаются различия в смещениях спектрального пика отражения для образцов, содержащих 12 и 24 периодов металлических нановключений, и отмечается их соответствие теории. Особое внимание уделено доказательству того, что наблюдаемые эффекты обусловлены возбуждением плазмонного резонанса в металлических наночастиц, слои которых образовывали периодическую структуру.

В пятой главе дано описание экспериментов по электроотражению. Эта мощная экспериментальная техника удачно применена в трудных условиях эксперимента при понижении температуры образца вплоть до 6 К. На основе количественного анализа формы линий электроотражения идентифицированы различные экситонные состояния. Из полученных экспериментальных данных сделан вывод о существенном сокращении времени жизни носителей заряда.

В заключении перечислены основные результаты работы.

Достоверность результатов и обоснованность выводов сомнений не вызывают. Выполненные автором эксперименты тщательно подготовлены, подробно описаны, а их результаты интерпретированы на основе твердо установленных физических принципов. Диссертация написана хорошим ясным языком. Описание физических явлений, исследованных в диссертации, раскрывает понимание автором их сути. **Основные результаты диссертации** полно и своевременно опубликованы, автореферат полно и правильно отражает ее содержание.

В то же время по работе можно сделать следующие замечания.

1. Представляется неудачной фраза, приведенная на стр.13 «Экситонные состояния в континууме соответствуют *пассивным* энергетическим решениям ...». Что означает здесь слово *пассивным* неясно.
2. На стр. 60 сказано, что формулой (2.2.1.2) определена «Полная интенсивность прошедшего через слой излучения с учетом многократных отражений». На самом же деле это не интенсивность, а амплитуда поля. Это тем более очевидно, так как эта величина – комплексная. Применимость следующей формулы, в том виде, как она приведена под номером (2.2.1.3), ограничена теми случаями, когда все среды прозрачны, но во многих частях диссертации поглощение должно учитываться.
3. На стр. 70 в формуле (2.3.2.8) пропущены знаки модуля комплексных величин амплитудных коэффициентов отражения и пропускания.
4. На стр. 80 сказано, что «Средний радиус нановключений AsSb ... варьировался в диапазоне от 2.5 до 7.5 нм». В этих условиях применение полной теории Ми

представляется неоправданным. Приближенная формула (4.2.1.3) дала бы вполне приемлемые результаты.

5. Малый радиус металлических наночастиц может вести также к изменению их оптических свойств по сравнению с объемным материалом. В особенности, малый размер сказывается на времени затухания плазмона, которое сокращается из-за рассеяния носителей на поверхности металлической наночастицы. Этот важный для наноплазмоники аспект остался необсужденным в тексте диссертации.

Сделанные замечания не носят принципиального характера, не затрагивают основные защищаемые положения и сформулированные выводы, то есть не снижают научную и практическую ценность полученных результатов.

На основании проведенного анализа считаю, что работа Ушанова Виталия Игоревича «Оптические свойства метаматериалов и структур на основе AlGaAs/AsSb», представленная к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, по актуальности решаемых задач, научной новизне, степени достоверности и практической значимости результатов полностью отвечает требованиям ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 ред. от 01.10.2018), а её автор, Ушанов Виталий Игоревич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Официальный оппонент:

Вартанян Тигран Арменакович

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Центр «Информационные оптические технологии»

Главный научный сотрудник

Кронверкский пр., д.49, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197101

E-mail: tigran@vartanyan.com
