

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Елисеева Ильи Александровича

**«Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в
двумерных и квазидвумерных структурах графена, дисульфида
молибдена и нитридов металлов третьей группы»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.8 – физика
конденсированного состояния.**

Рецензируемая диссертация посвящена изучению комбинационного рассеяния света (КРС) и фотолюминесценции в различных двумерных и квази-двумерных структурах. В настоящее время это направление исследований является одним из наиболее **актуальных** в физике конденсированного состояния. Свидетельством этого является быстрый рост числа публикаций по данной тематике в ведущих международных научных журналах. Причина такого интереса состоит в том, что двумерные и квази-двумерные материалы и структуры обладают электронными и оптическими свойствами, которые невозможно реализовать в традиционных материалах. К числу наиболее изучаемых двумерных материалов относятся графен и дисульфид молибдена. Структуры на основе этих двумерных материалов изучаются в диссертации. Квази-двумерные структуры, изучаемые в диссертации, представляют собой короткопериодные сверхрешетки GaN/AlN. Несмотря на интенсивные исследования всех трех выбранных объектов, их свойства остаются не до конца изученными, а границы использования соответствующих моделей не полностью верифицированы. **Новизна** представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Все полученные в диссертации результаты основаны на использовании современных методик мирового уровня и опубликованы в ведущих научных

журналах. Проведено сравнение собственных экспериментальных результатов с теоретическими расчетами и данными других авторов. Это обеспечивает **достоверность** полученных результатов.

Диссертация состоит из **введения, четырех глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований и задачи, которые необходимо было решить применительно к каждому из выбранных объектов исследований. Автор отмечает новизну и практическую значимость исследований, обосновывает достоверность полученных результатов. Указан личный вклад автора в коллективные исследования. Приведен список Российских и международных конференций, на которых докладывались результаты работы.

Первая глава посвящена методическим вопросам проводимых исследований. Описана технология формирования углеродных пленок (графена и буферного слоя) на поверхности подложек $4H$ - и $6H$ -SiC методом сублимации. Подробно описана процедура переноса на профилированную подложку моно- и бислоев дисульфида молибдена, в реализации которой автор принимал непосредственное участие. Кратко описана технология выращивания сверхрешеток GaN/AlN и твердых растворов AlGaIn методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Подробно описаны установки для исследований комбинационного рассеяния света и фотолюминесценции, на которых проводились эксперименты, и их программное обеспечение.

Во **второй главе** представлены результаты исследования методом спектроскопии КРС графена, сформированного на подложке SiC. Автор приводит результаты комплексных исследований структурных характеристик графеновых пленок, полученных коллегами по совместной работе. Комплексный подход позволяет автору связать параметры комбинационного рассеяния света со структурой и физическими параметрами изучаемых образцов. Автор доказал, что анализ формы линии 2D КРС является достоверным методом определения толщины графеновой пленки, сформированной на SiC, а оценка ее ширины – быстрым и надежным

способом отличить монослойный графен на SiC от графена с двумя и более слоями. Путем анализа сдвигов двух линий КРС автору удалось разделить вклады, связанные с деформацией и со сдвигом уровня Ферми. На этой основе построена и верифицирована количественно-точная методика определения деформаций и концентрации электронов. По результатам исследований структур с пленками графена сформулировано **первое защищаемое научное положение** о необходимости учета диэлектрической проницаемости подложки при анализе характеристик КРС. Положение надежно обосновано экспериментальными данными и анализом физики наблюдаемых явлений. Вторая часть главы посвящена исследованию интеркалированных структур. На основании результатов этих исследований вполне могло быть сформулировано еще одно положение на защиту, поскольку они обладают новизной и значимы для практики. Эти исследования обеспечили понимание процессов, происходящих при интеркаляции пленок графена на SiC, и привели к успешной реализации новых структур, перспективных для приборного использования. Хочется отметить большой объем проведенных экспериментальных исследований структур с пленками графена.

Во **третьей главе** представлены результаты исследования экситонных состояний в монослое и бислое MoS₂. С помощью исследований температурных зависимостей спектров фотолюминесценции с временным разрешением автору удалось установить структуру темных и светлых экситонных состояний, и влияние на нее деформаций. На этой основе сформулировано **второе защищаемое научное положение**. Полученные результаты подтверждаются теоретическими расчетами и согласуются с экспериментальными данными других авторов. Тем самым обоснована **достоверность** как характера энергетической структуры, так и величин расщеплений. Важным достоинством работы является оценка погрешностей определения параметров.

Четвертая глава посвящена КРС сверхрешеток GaN и твердых растворов AlGaN. Предметом исследований является так называемый “бозонный” пик в спектре КРС, часто наблюдаемый в неупорядоченных средах, например, в стеклах или полимерах. Интересно, что исследованные материалы AlGaN являются кристаллическими, и обычная картина формирования “бозонного” пика в неупорядоченных материалах должна быть каким-то образом адаптирована. В диссертации для этого проведены расчеты фононного спектра кристаллического Ga и обсуждаются моды собственных колебаний малых частиц. Приведенные в диссертации результаты исследования образцов, выращенных в различных условиях, убеждают, что “бозонный” пик в спектре КРС возникает из-за наличия избыточного галлия, который, по-видимому, захватывается в кристаллическую решетку AlGaN во время эпитаксии в виде нановключений. На наблюдении корреляции интенсивности пика с условиями выращивания основано **третье защищаемое положение**. Наличие такой связи доказывается экспериментом.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. Приведенные в главе 2 результаты исследований графена делают методику КРС удобным инструментом характеристики материала, в частности позволяющим определять концентрацию электронов в графене, нанесенном на различные подложки. Для практического использования этого важного результата было бы чрезвычайно полезно провести анализ погрешностей метода.
2. Обзор литературы в диссертации разбит на части, которые присутствуют в каждой главе. В связи с тем, что объекты исследования являются существенно разными, такое разбиение по главам представляется оправданным. Однако в главе 2, посвященной графену, обзор литературы дан только в начале второго и пятого параграфов. Это значительно затрудняет понимание полученных результатов и их новизны.

3. Анализ тонкой структуры экситонов в монослое и бислое MoS_2 в главе 3 проведен в рамках упрощенной модели. При этом коллегами автора и, вероятно, при его участии была разработана и более сложная модель, включающая все имеющиеся экситонные состояния. К сожалению, в диссертации отсутствует анализ экспериментальных результатов с помощью этой модели.

4. Хотя связь “бозонный” пик в спектре КРС с избытком галлия в процессе эпитаксии не вызывает сомнений, физическая природа этого пика нуждается в дальнейших исследованиях, например, с помощью моделирования методом молекулярной динамики. Было бы также полезно привлечь альтернативные методы диагностики наноразмерных нановключений. В условиях отсутствия структурных данных оценка диаметра наночастиц галлия не может быть верифицирована. При этом из оценочных формул на стр. 130 приводятся значения диаметра 1.1 нм и 0.9 нм, отличающиеся менее чем на 1 период решетки.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация И.А. Елисеева представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задач, имеющих существенное фундаментальное значение для понимания колебательных и электронных свойств двумерных и квази-двумерных структур и прикладное значение для совершенствования технологии формирования таких структур и создания нового поколения фотонных, оптоэлектронных и электронных приборов. **Достоверность и обоснованность** результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов, полученных различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях. Название и содержание

диссертации соответствуют паспорту специальности. Автореферат правильно передает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа И.А. Елисеева «Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в двумерных и квазидвумерных структурах графена, дисульфида молибдена и нитридов металлов третьей группы» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 "Физика конденсированного состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор, И.А. Елисеев, безусловно заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

ведущий научный сотрудник лаборатории физики аморфных полупроводников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН,
доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников,

Чалдышев Владимир Викторович

«14» 09 2022 г.

Тел. (812) 292-73-93,

e-mail: chald.gvg@mail.ioffe.ru

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

Подпись В.В. Чалдышева заверяю

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Кандидат физ.-мат. наук



М.И. Патров