

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Елисеева Ильи Александровича «Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в двумерных и квазидвумерных структурах графена, дисульфида молибдена и нитридов металлов третьей группы», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа И.А. Елисеева посвящена комплексным исследованиям колебательных и электронных свойств 2D структур графена и  $\text{MoS}_2$ , а также квази-2D структур – сверхрешеток GaN/AlN с периодами в несколько моно слоёв и разработке новых методик оптической диагностики подобных структур. Особое внимание к физике таких систем обусловлено их уникальными физическими свойствами и огромным потенциалом для создания приборов нового поколения, поэтому актуальность темы исследований не вызывает сомнений.

Последние десятилетия в физике твердого тела пристальное внимание было приковано к графену - яркому представителю двумерных (2D) систем. Графен в настоящее время является предметом обширных исследований, как фундаментального, так и прикладного характера, что обусловлено его уникальными физическими свойствами и потенциальными возможностями в сфере создания приборов нового поколения. Исследованный в работе графен, был получен одним из наиболее перспективных, с точки зрения последующего потенциального применения, способов формирования высококачественного графена большой площади методом сублимации поверхности подложек SiC диаметром до 6 дюймов. Это позволяет надеяться на то, что подобные структуры реально могут быть использованы в стандартных технологических процессах при изготовлении полупроводниковых приборов. Следует особо отметить, что детальная диагностика пленок большого числа исследованных образцов графена на SiC была проведена автором на высоком современном уровне, с использованием большого набора комплиментарных экспериментальных методик и большого массива измерений, что существенно поднимает рейтинг работы. Автором использован весь, имевшийся в его распоряжении комплекс современных поверхностно-чувствительных методик, таких как: атомно-силовая микроскопия (АСМ), кельвин-зондовая микроскопия (КЗМ), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением (ФЭСУР), спектроскопия рентгеновского поглощения вблизи К-края углерода (NEXAFS) и дифракция медленных электронов (ДМЭ).

Использованный автором комплиментарный подход, построенный на использовании большого арсенала современных методик, а также глубокое теоретическое осмысление полученных экспериментальных результатов и компьютерное моделирование позволили получить следующие новые научные результаты:

1. Впервые показано, что для правильной оценки концентрации электронов и значений деформации в графене по данным спектроскопии КРС, необходимо учитывать величину скорости Ферми электронов в графеновом слое. Этот вывод справедлив не только для графена на SiC, но и для графена на любой другой подложке, так как на скорость Ферми влияет диэлектрическая проницаемость подложки.
2. В результате исследований создан новый экспрессный метод диагностики графена, позволяющий по данным КРС оценивать концентрацию электронов и величину деформации с учетом скорости Ферми электронов в исследуемом графене.
3. Выполнены систематические исследования влияния концентрации электронов и величины деформации на спектры КРС монослойного графена, полученного методом термодеструкции Si-границ подложки SiC.
4. С использованием комплекса оптических методик, включающего в себя спектроскопию КРС и ФЛ с временным разрешением установлена тонкая структура экситонных



состояний в моно- и би-слоynom MoS<sub>2</sub> и впервые продемонстрировано ее изменение с возникновением деформации сжатия. Данные результаты интересны не только с фундаментальной, но и с практической точки зрения, в частности, они указывают на необходимость учета влияния деформации для получения желаемых оптических свойств в атомарно тонких наноструктурах на основе MoS<sub>2</sub>.

5. Обнаружение бозонного пика в низкочастотной области спектра КРС легло в основу нового экспрессного метода диагностики, позволяющего идентифицировать наличие нанокластеров Ga в короткопериодных CPGaN AlN и слоях AlGa<sub>x</sub>N, выращенных в Ga-обогащенных условиях. Показано, что спектроскопию КРС можно эффективно использовать в качестве экспрессного неразрушающего диагностического метода при оптимизации технологических параметров метода МПЭ с целью достижения атомарно-гладкой морфологии поверхности и высокого структурного качества в гетероструктурах на основе широко зонных полупроводниковых соединений (Al,Ga)N.

Результаты опубликованы в ведущих научных журналах и докладывались на ряде международных и российских научных конференциях. Особо следует отметить высокий профессионализм автора при получении и интерпретации экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов работы не вызывает сомнений.

На основании анализа результатов, изложенных в автореферате считаю, что диссертационная работа Елисеева Ильи Александровича «Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в двумерных и квазидвумерных структурах графена, дисульфида молибдена и нитридов металлов третьей группы» по объему и уровню выполненных исследований, научной и практической значимости полученных результатов 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 ее автор Елисеев Илья Александрович, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук

Отзыв составлен 10.08.2022

Ведущий научный сотрудник ИНЭОС РАН, д.х.н, к.ф.-м.н.

Букалов С.С.

01.04.05 – Оптика

Подпись С.С. Букалова удостоверяю

Ученый секретарь ИНЭОС РАН, к.х.н.

Гулакова Елена Николаевна, [larina@ineos.ac.ru](mailto:larina@ineos.ac.ru)

Я, Букалов Сергей Сергеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и их дальнейшую обработку

Букалов Сергей Сергеевич e-mail: [buklei@ineos.ac.ru](mailto:buklei@ineos.ac.ru)

тел. +7 (699) 1001070

Адрес: 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 28, стр. 1,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова

Российской академии наук (ИНЭОС РАН).

