

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 29.09.2022 № 7

О присуждении Елисееву Илье Александровичу
Гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Комбинационное рассеяние света и фотолюминесценция в двумерных и квазидвумерных структурах графена, дисульфида молибдена и нитридов металлов третьей группы» по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 29 июня 2022 г., протокол №5, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 15 от 19.01.2021 г. и № 13 от 21.01.2022 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 г. о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Елисеев Илья Александрович, дата рождения - 31.07.1995, в 2018 году окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский Государственный университет» по специальности «Физика». С 2018 по 2022 гг обучался в аспирантуре Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе, получил диплом об окончании аспирантуры в 2022 году. Экзамены по специальности 1.3.8 (01.04.07) – «физика конденсированного состояния» успешно сданы соискателем в Физико-

техническом институте им. А. Ф. Иоффе в 2019 и 2021 гг. В настоящее время соискатель работает в должности исполняющего обязанности младшего научного сотрудника в лаборатории спектроскопии твердого тела Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории спектроскопии твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Давыдов Валерий Юрьевич, д.ф.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории спектроскопии твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Научный консультант - Шубина Татьяна Васильевна, д.ф.м.н., главный научный сотрудник лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Образцова Елена Дмитриевна, к.ф.м.н., доцент, заведующая лабораторией спектроскопии наноматериалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» дала положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания.
2. Чалдышев Владимир Викторович, д.ф.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики аморфных полупроводников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет” предоставила положительное заключение на диссертацию, содержащее 3 замечания. Заключение подготовлено

доктором физико-математических наук, профессором с возложением обязанностей заведующего кафедрой физики твердого тела СПбГУ Вербиным Сергеем Юрьевичем и доктором физико-математических наук, профессором кафедрой физики твердого тела СПбГУ Игнатьевым Иваном Владимировичем. В заключении указано, что содержание диссертации Елисеева И. А. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», а соискатель Елисеев И. А. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из них имеет ученую степень доктора наук, а второй - кандидата наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что СПбГУ ведет активные исследования в различных областях физики конденсированного состояния, в частности в области спектроскопии полупроводниковых гетероструктур. Кафедра физики твердого тела - одни из лидеров в России в области изучения полупроводниковых гетероструктур оптическими методами. В СПбГУ проходят защиты по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Основное содержание диссертации представлено в 11 научных статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science:

1. Исследование кристаллической и электронной структуры графеновых пленок, выращенных на 6H-SiC (0001) / В. Ю. Давыдов, Д. Ю. Усачёв, С. П. Лебедев, А. Н. Смирнов, В. С. Левицкий, И. А. Елисеев, П. А. Алексеев, М. С. Дунаевский, О. Ю. Вилков, А. Г. Рыбкин, А. А. Лебедев // Физика и техника полупроводников. — 2017. — Т. 51, № 8. — С. 1116—1124. — DOI: 10.1134/S1063782617080073.
2. Optical Estimation of the Carrier Concentration and the Value of Strain in Monolayer Graphene Grown on 4H-SiC / I. A. Elisayev, V. Yu. Davydov,

- A. N. Smirnov, M. O. Nestoklon, P. A. Dementev, S. P. Lebedev, A. A. Lebedev, A. V. Zubov, S. Mathew, J. Pezoldt, K. A. Bokai, D. Yu. Usachov // *Semiconductors*. — 2019. — Vol. 53, no. 14. — P. 1904—1909. — DOI: 10.1134/S1063782619140057
3. Transformation of the Buffer Layer Grown on 4H-SiC to Single-Layer Graphene by Ex Situ Hydrogen Intercalation / I. A. Eliseyev, A. N. Smirnov, S. P. Lebedev, V. N. Panteleev, P. A. Dementev, J. Pezoldt, G. Hartung, J. Kroger, A. V. Zubov, A. A. Lebedev // *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*. — 2020. — Vol. 28, no. 4. — P. 316—320. — DOI: 10.1080/1536383X.2019.1708733.
 4. Comparative Study of Conventional and Quasi-Freestanding Epitaxial Graphenes Grown on 4H-SiC substrate / S. P. Lebedev, I. A. Eliseyev, V. N. Panteleev, P. A. Dementev, V. V. Shnitov, M. K. Rabchinskii, D. A. Smirnov, A. V. Zubov, A. A. Lebedev // *Semiconductors*. — 2020. — Vol. 54, no. 12. — P. 1567—1660. — DOI: 10.1134/S1063782620120179.
 5. Интеркалирование графена, сформированного на карбиде кремния, атомами железа / М. В. Гомоюнова, Г. С. Гребенюк, В. Ю. Давыдов, И. А. Ермаков, И. А. Елисеев, А. А. Лебедев, С. П. Лебедев, Е. Ю. Лобанова, А. Н. Смирнов, Д. А. Смирнов, И. И. Пронин // *Физика твердого тела*. — 2018. — Т. 60, № 7. — С. 1423—1430. — DOI: 10.21883/FTT.2018.07.46134.036.
 6. Интеркаляционный синтез силицидов кобальта под графеном, выращенным на карбиде кремния / Г. С. Гребенюк, И. А. Елисеев, С. П. Лебедев, Е. Ю. Лобанова, Д. А. Смирнов, В. Ю. Давыдов, А. А. Лебедев, И. И. Пронин // *Физика твердого тела*. — 2020. — Т. 62, No 3. — С. 462—471. — DOI: 10.21883/FTT.2020.03.49014.616.
 7. Quasi-freestanding graphene on SiC(0001) via cobalt intercalation of zero-layer graphene / A. A. Rybkina, S. O. Filnov, A. V. Tarasov, D. V. Danilov, M. V. Likholetova, V. Y. Voroshnin, D. A. Pudikov, D. A. Glazkova, A. V. Eryzhenkov, I. A. Eliseyev, V. Yu. Davydov, A. M. Shikin, A. G. Rybkin // *Physical Review B*. — 2021. — Vol. 104. — P. 155423. — DOI: 10.1103/PhysRevB.104.155423
 8. Модификация электронной структуры квазисвободного графена при адсорбции и интеркаляции атомов Mn / А. А. Гогина, А. Г. Рыбкин, А. М. Шикин, А. В. Тарасов, Л. Петачча, Г. Ди Санто, И. А. Елисеев, С. П. Лебедев, В. Ю. Давыдов, И. И. Климовских // *ЖЭТФ*. — 2021. — Т. 159, No 6. — С. 1028—1040. — DOI:10.31857/S0044451021060043.

9. Temperature activation of indirect exciton in nanostructures based on MoS₂ / O. O. Smirnova, I. A. Eliseyev, A. V. Rodina, T. V. Shubina // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1482. — P. 012038. — DOI: 10.1088/1742-6596/1482/1/012038.
10. Photoluminescence Kinetics of Dark and Bright Excitons in Atomically Thin MoS₂ / I. A. Eliseyev, A. I. Galimov, M. V. Rakhlin, E. A. Evropeitsev, A. A. Toropov, V. Yu. Davydov, S. Thiele, J. Pezoldt, T. V. Shubina // Physica Status Solidi - Rapid Research Letters. — 2021. — Vol. 15, no. 10. — P. 1—14. — DOI: 10.1002/pssr.202100263.
11. Boson Peak Related to Ga Nanoclusters in AlGaN Layers Grown by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy at Ga-Rich Conditions / V. Yu. Davydov, V. N. Jmerik, E. M. Roginskii, Yu. E. Kitaev, Ya. M. Beltukov, M. B. Smirnov, D. V. Nechaev, A. N. Smirnov, I. A. Eliseyev, P. N. Brunkov // Semiconductors. — 2019. — Vol. 53, no. 11. — P. 1479—1488. — DOI: 10.1134/S1063782619110058.

На автореферат поступило 8 отзывов.

1. Отзыв д.ф.-м.н. Андреева Бориса Алексеевича, ведущего научного сотрудника отдела физики полупроводников ФГБУН Института физики микроструктур Российской академии наук, положительный, содержит 1 замечание, касающееся излишней масштабности формулировки одного из результатов диссертационной работы - создания нового экспрессного метода диагностики графена.
2. Отзыв д.ф.-м.н. Баранова Александра Васильевича, профессора НИУ Университет ИТМО, положительный, содержит 3 замечания, имеющих технический характер. Также высказано предложение по дальнейшему развитию исследований.
3. Отзыв д.х.н., к.ф.-м.н. Букалова Сергея Сергеевича, ведущего научного сотрудника Института элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, положительный, замечаний не содержит.
4. Отзыв д.ф.-м.н. Володина Владимира Алексеевича, ведущего научного сотрудника лаборатории неравновесных полупроводниковых систем Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, положительный, содержит 1 замечание технического характера.
5. Отзыв д.ф.-м.н. Журавлева Константина Сергеевича, ведущего научного сотрудника и.о. заведующего лабораторией молекулярно-лучевой эпитаксии полупроводниковых соединений A₃B₅ Института физики

полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, положительный, замечаний не содержит.

6. Отзыв к.ф.м.н. Крылова Александра Сергеевича, старшего научного сотрудника Института физики им. Л. В. Киренского СО РАН, положительный, замечаний не содержит.
7. Отзыв д.ф.м.н. Липовского Андрея Александровича, заведующего кафедрой физики и технологии наноструктур, учёного секретаря Академического университета им. Ж. И. Алфёрова РАН, дал положительный отзыв, содержащий 2 замечания. Одно из них касается детализации отличий между образцами, использованными в работе. Второе замечание - стилистическое.
8. Отзыв д.ф.м.н. Федорова Валерия Васильевича, заведующего лабораторией рентгеновской и гамма-спектроскопии НИЦ “Курчатовский институт” - ПИЯФ, положительный, замечаний не содержит.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем комплексных экспериментальных исследований колебательных и электронных свойств 2D структур графена и MoS_2 , а также квази-2D структур - сверхрешёток GaN/AlN с периодами в несколько монослоев, были получены следующие основные результаты:

1. Установлено, что существующая в литературе методика, основанная на результатах спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) исследований монослойного графена на подложке SiO_2 , приводит к большим ошибкам при ее использовании для графена, выращенного на SiC . Впервые показано, что для правильной оценки концентрации электронов и значений деформации в графене на подложках SiO_2 и других по данным спектроскопии КРС, необходимо учитывать величину скорости Ферми электронов в графеновом слое. В результате исследований предложен путь к усовершенствованию метода КРС для диагностики концентрации электронов и величин деформации в графене.
2. Установлены оптимальные параметры отжига - температура 800°C и время отжига 40 минут - для интеркаляции буферного слоя углерода (БС) на поверхности SiC и продемонстрировано, что при указанных параметрах происходит превращение буферного слоя на поверхности SiC в слой квазисвободного графена, уровень деформации и

концентрация носителей заряда в котором ниже, чем в графене, выращенном на SiC.

3. Показано, что интеркаляция интеркаляции Co, Si, Fe и Mn в системах систем графен/BC/SiC и BC/SiC приводит к уменьшению величины деформации в графене и возникновению одномерных структурных дефектов (дополнительных границ кристаллитов). Анализ спектров КРС в области низких частот структур, интеркалированных Co и Si, выявил наличие пленки CoSi. Полученные структуры графен/CoSi/SiC продемонстрировали ферромагнитные свойства.
4. Установлено, что в монослойном MoS₂ разрешенный по спину (светлый) оптический переход является нижним по энергии в серии прямого A-экситона. При этом величина расщепления между нижними светлым и темным состояниями A-экситона составляет ~ -2 мэВ в отсутствие деформации и увеличивается с увеличением деформации сжатия, достигая ~ 4 мэВ при значении деформации $\varepsilon \sim -0.12\%$.
5. Показано, что в бислойном MoS₂ деформация сжатия $\varepsilon \sim -0.28\%$ приводит к снятию вырождения экситонных подуровней прямого A-экситона (переход K-K) и непрямого экситона IX (переход $\Lambda - \Gamma$). Нижним по энергии в серии A-экситона также является светлое состояние с величиной расщепления Δ_{AF} до 10 мэВ, а в серии IX-экситона - темное состояние с величиной расщепления Δ_{AF} порядка 3 мэВ.
6. В спектрах КРС короткопериодных сверхрешёток GaN/AlN и твердых растворов AlGaN, выращенных в режиме ПА МПЭ в Ga-обогащенных условиях, обнаружен асимметричный низкочастотный пик с максимумом на частоте ~ 70 см⁻¹, интенсивность которого зависит от условий роста. Показано, что данный пик обусловлен колебаниями кластеров Ga с размерами в диапазоне $\sim (0.9 - 1.5)$ нм. Показано, что спектроскопия КРС эффективна в качестве быстрого и неразрушающего метода выявления наноразмерных кластеров Ga в III-нитридных структурах, выращенных в условиях обогащения Ga.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную значимость для более глубокого понимания свойств графена и других двумерных и квазидвумерных материалов. Практическая значимость работы состоит в разработке и усовершенствовании методик диагностики высококачественных полупроводниковых гетероструктур для

оптоэлектроники и электроники, что уже было продемонстрировано в ФТИ им. А. Ф. Иоффе при изготовлении газовых сенсоров на основе монослойного графена.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Оценка концентрации электронов в графене по данным КРС дает значения, согласующиеся с результатами, полученными с использованием методов фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и эффекта Холла, только при учете величины скорости Ферми электронов, которая зависит от диэлектрической проницаемости подложки, на которой находится графен.
2. В монослое MoS_2 разрешенное по спину (светлое) экситонное состояние является нижним по энергии в серии А-экситона, причем величина расщепления между светлым и темным экситонами зависит от деформации, увеличиваясь от $\Delta_{\text{AF}} \sim -2$ мэВ при отсутствии деформации до $\Delta_{\text{AF}} \sim -4$ мэВ при деформации сжатия $\varepsilon \sim -0.12\%$. В бислое MoS_2 при $\varepsilon \sim -0.28\%$ нижним в серии А-экситона также является светлое состояние ($\Delta_{\text{AF}} \sim -10$ мэВ), тогда как в серии непрямого экситона - темное состояние ($\Delta_{\text{AF}} \sim +3$ мэВ).
3. Низкочастотный "бозонный" пик в спектрах КРС короткопериодных сверхрешеток GaN/AlN и твердых растворов AlGaIn , выращенных в условиях сильного обогащения галлием, обусловлен колебаниями нанокластеров галлия. Его параметры могут быть использованы для оценки размеров кластеров.

Достоверность представленных в диссертации результатов и обоснованность положений основывается на применении комплекса современных экспериментальных методик; соответствием данных исследований образцов с помощью различных методик; анализом экспериментальных данных с использованием современных методик моделирования электронных и колебательных свойств 2D материалов. Полученные результаты прошли апробацию на 11 международных и российских конференциях, опубликованы в 11 оригинальных статьях в рецензируемых журналах по физике конденсированного состояния.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии, что подробно указано в тексте автореферата.

Диссертация Елисеева И. А. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие такого актуального направления современной физики конденсированного состояния, как спектроскопия двумерных материалов и полупроводниковых гетероструктур.

На заседании 29 сентября 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Елисееву И. А. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 15 докторов по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

Кусраев Юрий Георгиевич

Ученый секретарь
диссертационного совета
PhD

Калашникова Александра Михайловна

29 сентября 2022 г.