

ОТЗЫВ

официального оппонента Шубиной Татьяны Васильевны на диссертационную работу
Кривобока Владимира Святославовича
«НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
СОБСТВЕННЫХ И ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ» в
виде научного доклада, представленной на соискание учёной степени доктора физико-
математических наук
по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Кривобока Владимира Святославовича базируется на нескольких десятках работ, опубликованных, начиная с 2010 г. За этот период времени соискателем был выполнен цикл исследований по нескольким направлениям, объединенных общей целью, которую можно сформулировать как систематический поиск и развитие подходов, позволяющих изучать электронный и фононный спектры полупроводников, структура которых неоднородна на микро- или наномасштабах.

В ходе проведения исследований Кривобок В.С. фокусировался на ряде нестандартных явлений, определяющих оптические свойства полупроводниковых систем, структурная неоднородность которых вызвана, к примеру, наличием гетероинтерфейсов, протяженных дефектов и локальной деформацией решетки. Соискателем решались задачи установления взаимосвязи между многочастичными ансамблями в электронно-дырочной системе, определения структуры электронной подсистемы одиночных дефектов, взаимодействия натуральных (дислокаций) и предумышленно созданных (гетероинтерфейсов) неоднородностей, а также влияния типа точечных дефектов и изотопического состава на оптические и колебательные свойства полупроводниковых систем. Поскольку наличие той или иной структурной неоднородности присуще большинству реальных полупроводниковых структур, **актуальность и практическая значимость** проведенного исследования не подлежит сомнению.

К основным моментам **научной новизны** диссертационной работы Кривобока В.С. следует отнести обнаружение явления расслоения электронно-дырочного газа на двумерную и газоподобную составляющие в квантовых ямах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Разностороннее исследование динамики фазового перехода «плазма – экситонный газ» впервые показало возможность управления характеристиками двумерной фазы путем взаимодействия с наноплями плазмонных резонансов. Не меньшей новизной отличается цикл исследований квантовых излучателей на основе одиночных акцепторных центров и протяженных дефектов в полупроводниковых гетероструктурах. В частности, был обнаружен новый тип квантовых излучателей, образующихся на пересечении дислокаций с квантовыми ямами. Основные идеи проведенного исследования были подхвачены другими исследовательскими группами, что позволяет говорить о важном вкладе соискателя в **формирование нового направления** (микро-спектроскопического) в спектроскопии полупроводниковых материалов.

К конкретным **практически важным достижениям** относятся реализация адресного лазерного воздействия на теллурид кадмия, не нарушающего кристаллическую решетку и определение свойств германий-вакансионных центров в синтетических алмазах, несомненно перспективных для применения в квантовой фотонике. Отдельно следует отметить практическую значимость доведенных до совершенства методов исследования с высоким пространственным разрешением, таких как микро-спектроскопия фотолюминесценции, возбуждения люминесценции, комбинационного рассеяния света и

отражения, а также развития системных подходов к реализации квантового зондирования и разностной спектроскопии. В совокупности эти методы составляют инструментальный базис, имеющий **важное практическое значение** для физики конденсированных сред.

Диссертационная работа представлена в виде научного доклада. Она состоит из введения, основной части, заключения и списка литературы. Введение диссертации отражает широкий диапазон изучаемых соискателем явлений, их потенциальных применений и основных результатов работы. Подробно описана методология исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, продемонстрирована степень достоверности результатов, определяемая богатством используемых методов, повторяемостью результатов при исследовании структур, выращенных в различных группах, и хорошим согласием с теоретическими моделями. Приведены данные об апробации результатов и очерчен личный вклад автора.

В основной части манускрипта Кривобок В.С. фокусируется на описании ряда новых, ранее не изученных эффектов и явлений в физике конденсированных сред. Изложение начинается с описания результатов фундаментального цикла исследований электронно-дырочной системы в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ квантовых ямах с применением методов измерения как стационарной люминесценции, так и кинетики люминесценции при гелиевых температурах. Впервые показано, что электронно-дырочная система может включать квази-двумерную составляющую. Обнаружена и исследована тонкая структура излучения двумерной электрон-дырочной жидкости в мелких квантовых ямах, которую удалось объяснить на основе аналогии с сингулярностью Ван Хофа, возникающей за счёт сосуществования в электрон-дырочной жидкости легких и тяжелых дырок. При этом учитывалось взаимодействие носителей заряда с колебаниями зарядовой плотности. Продемонстрирован нетипичный механизм излучения из таких структур в видимой области спектра вследствие аннигиляции двух электронно-дырочных пар с передачей импульса одному кванту света. По этому направлению сформулировано 2 научных положения из 10, однако методическая значимость проведенных в нем исследований велика для последующих изысканий.

Совместное рассмотрение во втором разделе оптических явлений в квантовых ямах и объемных полупроводниках базируется на развитии методов бесконтактного оптического зондирования одиночных нано-объектов, таких как акцепторные (донорные) центры и комплексы на их основе. Развитый метод разностной спектроскопии позволяет выделить набор таких объектов с определенными свойствами из макроскопического ансамбля. С его помощью получены новые данные о комплексных дефектах и янтеллеровских центрах в легированных объемных полупроводниках, а также обнаружен новый тетраэдрический акцептор в CdTe . Рассмотрены понижение симметрии акцепторных центров, вызванное их составной структурой, и энергетический спектр структурного комплекса с участием иона железа и собственного точечного дефекта цинковой подрешетки в ZnSe .

Другое направление исследований, описанное в этом разделе, выводит на первый план наличие в полупроводниковых системах протяженных дефектов. Впервые показано, что пересечение 90° частичной дислокации с квантовыми ямами ZnSe является центром, локализуящим экситоны и определяющим высокую степень линейной поляризации излучения. Для исследования подобных объектов был разработан другой подход, который основан на уменьшении плотности мощности оптического возбуждения. В результате в спектрах низкотемпературной микро-фотолюминесценции удалось зафиксировать фазовый переход «электронно-дырочная плазма — экситонные состояния», проявляющийся в появлении узких линий экситонной люминесценции (~ 1 мэВ).

В последнем разделе обсуждаются спектральные характеристики различных вакансионных центров с участием Ge в алмазах. Особое внимание уделяется обсуждению «дефекта частоты», который проявляется в виде зависимости частоты бесфонованого перехода от изотопического состава из-за разной кривизны адиабатических потенциалов. В результате исследований показана зависимость спектров излучения вакансионных комплексов от изотопического состава как алмаза, так и введенной примеси.

Содержательная часть работы оканчивается заключением, в котором приведены основные выводы по диссертации.

К тексту диссертации имеется несколько замечаний.

1. Обнаружение нетривиальных многочастичных состояний, таких как двумерная конденсированная фаза в гетероструктурах SiGe/Si, по мнению соискателя определяется близким к термодинамическому равновесию состоянию системы вследствие больших времен жизни электронов и дырок. Каково влияние и признаки проявления возможного пространственного разнесения носителей заряда на наблюдаемое разделение электрон-дырочной плазмы на две составляющие - разреженную экситонную и плотную плазменную фазы? Было бы полезно расширить обсуждение этого вопроса в диссертации.
2. В работе предсказана возможность образования состояний со сверхизлучательными свойствами за счет процессов четырехчастичной рекомбинации в вырожденном экситонном газе полупроводников с непрямым краем собственного поглощения. В работе не обсуждается, какова эффективность процесса сверхизлучения в экспериментально исследуемых квантовых ямах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с зонной структурой типа II, а также имеет ли наблюдение некоторых признаков сверхизлучения безоговорочную достоверность и при каких условиях.
3. Полупроводники групп A2B6 характеризуются наличием обширного семейства протяженных дефектов, включающего дислокации разного типа, дефекты упаковки, инверсионные домены. Все они распространяются вдоль определенных кристаллографических направлений. Пересечение большинства из них с квантовыми ямами может способствовать формированию локализуемых центров. Обсуждение этого момента отсутствует в диссертации. Как следствие, неясно, что послужило основанием считать 90-градусную частичную дислокацию основным формообразующим дефектом таких центров.

Высказанные замечания не умаляют значимости полученных в диссертационной работе результатов. Диссертация представляет собой полноценную, законченную научную работу, выполненную на высоком научном уровне. Основные результаты, на которых базируются положения, были получены соискателем лично или под его непосредственным руководством. В диссертации представлено описание ряда новых эффектов, имеющих большое значение для физики полупроводников и созданию перспективных материалов.

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, прошли всестороннюю **апробацию**: за последние 10 лет они опубликованы в 31 статье в научных изданиях, первого и второго квартилей индексируемых международными базами данных, докладывались на российских и международных конференциях, а также многочисленных семинарах и школах. Заключение и выводы, сделанные автором, **хорошо обоснованы**, их **достоверность** не вызывает сомнений. Совокупность сформулированных положений

можно квалифицировать как научное достижение в области физики конденсированного состояния.

Таким образом, диссертация Кривобока Владимира Святославовича «Низкотемпературная люминесцентная спектроскопия собственных и примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах с неоднородной структурой», оформленная в виде научного доклада, является завершённым научным исследованием, удовлетворяющим всем требованиям к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Кривобок В.С., безусловно заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник

Лаборатории квантовой фотоники

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

доктор физико-математических наук,

Шубина Татьяна Васильевна

16 января 2023 г.

Адрес: 194021, Санкт-Петербург,

Политехническая ул., 26

shubina@beam.ioffe.ru

Телефон: +7 (812) 297-2245

Подпись г.н.с., д.ф.-м.н. Шубиной Т.В. удостоверяю

Учёный секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе, кандидат физ.-мат. наук.

Патров Михаил Иванович



Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук Шубиной Татьяны Васильевны в соответствующей сфере исследования в рецензируемых научных изданиях

1. Michl, J., Palekar, C. C., Tarasenko, S. A., Lohof, F., Gies, C., von Helversen, M., Sailus, R., Tongay, S., Taniguchi, T., Watanabe, K., Heindel, T., Rosa, B., Rödel, M., Shubina, T., Höfling, S., Reitzenstein, S., Anton-Solanas, C. & Schneider, C. Intrinsic circularly polarized exciton emission in a twisted van der Waals heterostructure. *Phys. Rev. B* 105, L241406 (2022).
2. Rakhlin, M., Klimko, G., Sorokin, S., Kulagina, M., Zadiranov, Y., Kazanov, O., Shubina, T., Ivanov, S. & Toropov, A. Bright Single-Photon Sources for the Telecommunication O-Band Based on an InAs Quantum Dot with (In)GaAs Asymmetric Barriers in a Photonic Nanoantenna. *Nanomaterials* 12, 1562 (2022).
3. Kotova, L. V., Rakhlin, M. V., Galimov, A. I., Eliseyev, I. A., Borodin, B. R., Platonov, A. V., Kirilenko, D. A., Poshakinskiy, A. V. & Shubina, T. V. MoS₂ flake as a van der Waals homostructure: luminescence properties and optical anisotropy. *Nanoscale* 13, 17566-17575 (2021).
4. Eliseyev, I. A., Galimov, A. I., Rakhlin, Maxim. V., Evropeitsev, E. A., Toropov, A. A., Davydov, V. Yu., Thiele, S., Pezoldt, J. & Shubina, T. V. Photoluminescence Kinetics of Dark and Bright Excitons in Atomically Thin MoS₂. *Physica Status Solidi Rapid Research Letters* 15, 2100263 (2021).
5. Davydov, V., Roginskii, E. M., Kitaev, Y., Smimov, A., Eliseyev, I., Zavarin, E., Lundin, W., Nechaev, D., Jmerik, V., Smimov, M., Pristovsek, M. & Shubina, T. The Effect of Interface Diffusion on Raman Spectra of Wurtzite Short-Period GaN/AlN Superlattices. *Nanomaterials* 11, 2396 (2021).
6. Е. А. Европейцев, Ю. М. Серов, Д. В. Нечаев, В. Н. Жмерик, Т. В. Шубина, А. А. Торопов, 2D экситоны в множественных одномонослойных квантовых ямах GaN/AlN. Письма в ЖЭТФ 113,507 (2021).
7. Rakhlin, M., Sorokin, S., Kazanov, D., Sedova, I., Shubina, T., Ivanov, S., Mikhailovskii, V. & Toropov, A. Bright Single-Photon Emitters with a CdSe Quantum Dot and Multimode Tapered Nanoantenna for the Visible Spectral Range. *Nanomaterials* 11, 916 (2021).
8. А. И. Галимов, М. В. Рахлин, Г. В. Климко, Ю. М. Задиранов, Ю. А. Гусева, С. И. Трошков, Т. В. Шубина, А. А. Торопов, Источник неразличимых одиночных фотонов на основе эпитаксиальных InAs/GaAs квантовых точек для интеграции в схемы квантовых вычислений. Письма в ЖЭТФ. 113, 248 (2021).
9. Evropeitsev, E. A., Kazanov, D. R., Robin, Y., Smimov, A. N., Eliseyev, I. A., Davydov, V. Yu., Toropov, A. A., Nitta, S., Shubina, T. V. & Amano, H. State-of-the-art and prospects for intense red radiation from core-shell InGaN/GaN nanorods. *Sci. Rep.* 10, 19048 (2020).
10. Kotova, L. V., Platonov, A. V., Poshakinskiy, A. V. & Shubina, T. V. Polarization Conversion in MoS₂ Flakes. *Semiconductors* 54, 1509-1513 (2020).
11. Kazanov, D., Rakhlin, M., Poshakinskiy, A. & Shubina, T. Towards Exciton-Polaritons in an Individual MoS₂ Nanotube. *Nanomaterials* 10, 373 (2020).
12. Toropov, A. A., Evropeitsev, E. A., Nestoklon, M. O., Smirnov, D. S., Shubina, T. V., Kaibyshev, V. Kh., Budkin, G. V., Jmerik, V. N., Nechaev, D. V., Rouvimov, S., Ivanov, S. V. & Gil, B. Strongly Confined Excitons in GaN/AlN Nanostructures with Atomically Thin GaN Layers for Efficient Light Emission in Deep-Ultraviolet. *Nano Lett.* 20, 158-165 (2019)

13. Kazanov, D. R., Evropeytsev, E. A. & Shubina, T. V. The Cavity-Effect in Site-Controlled GaN Nanocolumns with InGaN Insertions. *Semiconductors* 53, 2085-2089 (2019).
14. Eremin, T. V., Obraztsov, P. A., Velikanov, V. A., Shubina, T. V. & Obraztsova, E. D. Many-particle excitations in non-covalently doped single-walled carbon nanotubes. *Sci. Rep.* 9, 14985 (2019).
15. Shubina, T. V., Desrat, W., Moret, M., Tiberj, A., Briot, O., Davydov, V. Yu., Platonov, A. V., Semina, M. A. & Gil, B. InSe as a case between 3D and 2D layered crystals for excitons. *Nat Commun* 10, 3479 (2019).