

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 6 февраля 2023 г № 43

О присуждении Кривобоку Владимиру Святославовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация «Низкотемпературная люминесцентная спектроскопия собственных и примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах с неоднородной структурой» в виде научного доклада по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния принята к защите 17 октября 2022 года, (протокол заседания № 35) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Кривобок Владимир Святославович, 29 ноября 1979 года рождения, в 2000 году окончил бакалавриат и в 2002 году магистратуру Московского физико-технического института (государственного университета) на Факультете общей и прикладной физики по направлению «Прикладные математика и физика». Диссертацию по научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Фотолюминесценция теллурида цинка, выращенного при значительном отклонении от термодинамического равновесия» защитил в 2006 году в диссертационном совете, созданном на базе

Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук. (диплом ДКН № 006530). С 2000 года является сотрудником ФИАН, в настоящее время работает в должности старшего научного сотрудника Отделения физики твердого тела ФИАН.

Диссертационная работа Кривобока В.С. выполнена в Отделении физики твердого тела ФИАН.

Официальные оппоненты

1. Гавриленко Владимир Изяславович, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук (г. Нижний Новгород);

2. Константинова Елизавета Александровна, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры Общей физики и молекулярной электроники Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (г. Москва);

3. Шубина Татьяна Васильевна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории квантовой фотоники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург)

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация - Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Полус» имени М.Ф. Стельмаха», город Москва, в своем положительном отзыве, подписанном Начальником Научно-производственного комплекса АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», доктором физико-математических наук Ладугиным Максимом Анатольевичем и Председателем секции НТС «Полупроводниковые приборы» АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», доктором технических наук Мармалюком

Александром Анатольевичем, и утвержденном Генеральным директором АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», доктором технических наук, профессором Кузнецовым Евгением Викторовичем указала, что соискатель заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Соискатель имеет 116 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 49 работ, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, из них за последние 10 лет (2012-2022 гг.) опубликованы 43 работы, в том числе 31 публикация в научных изданиях первого и второго квартилей согласно международной базе Scopus.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Кривобок В.С. работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Bagaev V. S., Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Novikov A. V., Onishchenko E. E., Skorikov M. L. Observation of the electron-hole liquid in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ quantum wells by steady-state and time-resolved photoluminescence measurements // Physical Review B. – 2010. – V. 82. – No. 11. – Article No. 115313.

2. Кривобок В. С., Николаев С. Н., Ченцов С. И., Онищенко Е. Е., Багаев В. С., Козловский В. И., Сорокин С. В., Седова И. В., Гронин С. В., Иванов С. В. Изолированные (квантовые) излучатели, сформированные с участием дефектов, в гетероструктуре $\text{ZnSe}/\text{ZnMgSSe}$ // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – № 2. – С. 108-113.

3. Николаев С. Н., Кривобок В. С., Багаев В. С., Онищенко Е. Е., Новиков А. В., Шалеев М. В. Видимое излучение плотного биэкситонного газа в SiGe/Si квантовых ямах в условиях внешней анизотропной деформации// Письма в ЖЭТФ. – 2018. – Т. 107. – № 6. – С. 371-377.

4. Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Chentsov S. I., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Bagaev V. S., Silina A. A., Smirnova N. A. Two types of isolated (quantum) emitters related to dislocations in crystalline CdZnTe // Journal of Luminescence. – 2018. – V. 200. – PP. 240-247.

5. Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Chentsov S. I., Klokov A. Yu., Sorokin S. V., Sedova I. V. Probing of single

acceptors in a wide ZnSe-based quantum well via optical spectroscopy // Journal of Luminescence. – 2019. – V. 213. – PP. 273-277.

6. Krivobok V. S., Chentsov S. I., Nikolaev S. N., Chernopitssky M. A., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Martovitskiy V. P., Bagaev V. S., Ikusov D. G., Marin D. V., Mikhailov N. N., Yakushev M. V. Optical probing of extended defects in CdTe virtual substrates via isolated emitters produced by weakly perturbed fragments of partial dislocations // Applied Physics Letters. – 2019. – V. 115. – No. 23. – Article No. 232102.

7. Krivobok V. S., Ekimov E. A., Lyapin S. G., Nikolaev S. N., Skakov Yu. A., Razgulov A. A., Kondrin M. V. Observation of a 1.979-eV spectral line of a germanium-related color center in microdiamonds and nanodiamonds // Physical Review B. – 2020. – V. 101. – No. 14. – No. 144103.

8. Aminev D. F., Pruchkina A. A., Krivobok V. S., Gladilin A. A., Kalinushkin V. P., Ushakov V. V., Chentsov S. I., Onishchenko E. E.; Kondrin M. V. Optical marker of intrinsic point defects in ZnSe:Fe // Optical Materials Express. – 2021. – V. 11. – No. 2. – PP. 210-218.

9. Nikolaev S. N., Chernopitssky M. A., Bagaev V. S., Krivobok V. S., Onishchenko E. E., Savin K. A., Klovov A. Yu, Chentsov S. I., Martovitskiy V. P. Low temperature luminescence of mechanically exfoliated β -InSe nanoflakes near fundamental absorption edge // Journal of Luminescence - 2021. - V. 231 - Article No. 117812.

10. Ekimov E. A., Krivobok V. S., Kondrin M. V., Litvinov D. A., Grigoreva L. N., Koroleva A. V., Zazymkina D. A., Khmel'nitskii R. A., Aminev D. F., Nikolaev, S. N. Structural and optical properties of silicon carbide powders synthesized from organosilane using high-temperature high-pressure method// Nanomaterials. – 2021. – V. 11. – No. 11. – Article No. 3111.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области физики полупроводниковых материалов и полупроводниковых гетероструктур, а ведущей организации – ее репутацией признанного научно-производственного центра, проводящего исследования в области физики и технологии полупроводниковых материалов, в частности, физики полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктур.

Диссертация Кривобока Владимира Святославовича посвящена развитию новых подходов, позволяющих восстанавливать электронный спектр современных полупроводниковых материалов с неоднородностью

кристаллической структуры на субмикронных или наномасштабах. Обстоятельные исследования фазового перехода «плазма – экситонный газ» впервые показали возможность управления характеристиками двумерной фазы за счет взаимодействия с наноразмерными плазмонными резонаторами. 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 (микроспектроскопического) в оптике полупроводников.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Продемонстрировано существование квазидвумерной электронно-дырочной жидкости в квантовых ямах $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Показано, что главными факторами, управляющими фазовой диаграммой квазидвумерной электронно-дырочной системы, являются величина потенциального барьера в зоне проводимости и значение расщепления между энергиями легких и тяжелых дырок в Γ -точке зоны Брюллиэна, вызванного присутствующими в гетероструктуре напряжениями.

2. Показано, что формирование двумерной конденсированной фазы в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ квантовых ямах сопровождается появлением рекомбинационного излучения, при котором после аннигиляции двух электронно-дырочных пар энергия и импульс передаются одному кванту света. Вероятность излучательной рекомбинации по данному механизму допускает усиление за счет установления ближнепольной связи с плазмонным резонатором.

3. Показано, что перекрытие волновых функций для основных состояний акцепторного и донорного центров приводит к формированию ярких

излучателей, которые могут анализироваться как одиночные объекты в экспериментах по измерению низкотемпературной люминесценции полупроводниковых квантовых ям. Реализован новый метод, позволяющий с помощью измерений микрофотолюминесценции определять свойства одиночных донорных или акцепторных центров в полупроводниковых гетероструктурах.

4. Предложена и реализована оригинальная экспериментальная методика определения электронного спектра дефектов в компенсированных полупроводниках, основанная на измерении разностных сигналов низкотемпературной фотолюминесценции при возбуждении образца излучением с двумя близкими длинами волн. С использованием данного метода впервые восстановлен спектр ряда нететраэдрических центров в компенсированном теллуриде кадмия и сделаны выводы о их природе.

5. Показано, что при низких температурах с уменьшением плотности мощности оптического возбуждения электронно-дырочная система, связанная с микрофрагментами ядер частичных дислокаций в кубических полупроводниках группы A_2B_6 , претерпевает фазовый переход «электронно-дырочная плазма – экситонные состояния». Возникающие экситонные состояния могут анализироваться как одиночные объекты в экспериментах по измерению низкотемпературной микрофотолюминесценции и позволяют визуализировать отдельные дислокации в гетероструктурах с квантовыми ямами.

6. Установлено, что структурные дефекты в теллуриде кадмия допускают перестройку внутренней структуры локальным лазерным воздействием, при котором не происходит генерация дефектов в ненарушенной решетке. Перестройка структурных дефектов проявляется в виде изменения линейчатого спектра низкотемпературной микрофотолюминесценции в области дислокационного излучения.

7. В синтетических легированных германием алмазах обнаружен новый люминесцентный центр с узким бесфононным переходом в районе 1.979 эВ. На

основе измерений низкотемпературной микрофотолюминесценции алмазов с разным изотопическим составом матрицы и легирующей примеси центр отождествлен с нейтральным вакансионным комплексом, в состав которого входит атом германия.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. В частности, новизна обусловлена тем, что

- Впервые продемонстрировано, что фазовый переход «плазма – экситонный газ» в неравновесной электронно-дырочной системе $Si_{1-x}Ge_x/Si$ квантовых ям может сопровождаться расслоением электронно-дырочного газа на области с высокой и низкой концентрацией носителей. Области с высокой концентрацией носителей соответствуют двумерной электронно-дырочной жидкости металлического типа, области с низкой концентрацией – газовой фазе, содержащей экситоны и экситонные молекулы.

- Впервые зарегистрировано излучение двумерной конденсированной фазы, при котором после аннигиляции двух электронно-дырочных пар энергия и импульс передаются одному кванту света. Показано, что вероятностью данного процесса можно управлять за счет установления ближнепольной связи с плазмонными резонаторами.

- Впервые продемонстрирована возможность регулярного наблюдения одиночных люминесцентных центров, сформированных донорно-акцепторными парами в полупроводниках гетероструктурах, и на их основе реализовано зондирование одиночных акцепторных центров в полупроводниковых квантовых ямах.

- Впервые разностная спектроскопия, основанная на возбуждении полупроводника излучением с двумя близкими длинами волн, применена для исследования электронного спектра акцепторных центров, имеющих низкую симметрию.

- Разработан новый метод, позволяющий без внешнего поля регистрировать понижение симметрии акцепторных центров, вызванное их составной структурой и/или дисторсией Яна-Теллера.

- Впервые зарегистрированы признаки перехода «плазма – экситонные состояния» в электронно-дырочной системе, локализованной ядром частичной дислокации. Обнаружен новый тип изолированных (квантовых) излучателей, возникающих в результате прорастания 90° частичной дислокации через полупроводниковую квантовую яму. Впервые реализовано адресное лазерное воздействие на протяженные дефекты в теллуриде кадмия, при котором не происходит заметных изменений в ненарушенной решетке.

- В синтетических алмазах, легированных германием, обнаружен новый люминесцентный центр, формирующий узкий бесфононный переход в районе 1,979 эВ, и исследованы свойства данного центра в алмазах с разным изотопическим составом матрицы/легирующего германия.

Практическая значимость полученных соискателем результатов определяется тем, что они позволяют сформулировать новые подходы современной физики дефектов, адаптированные для исследования полупроводниковых гетероструктур и оперирующие неразрушающими оптическими измерениями. В частности, развитая в работе концепция оптических зондов позволила автору предложить методы, позволяющие последовательно анализировать электронный спектр точечных и протяженных дефектов в полупроводниковых материалах с неоднородной структурой. Обнаружение рекомбинационного излучения, при котором энергия двух электронно-дырочных пар передается одному кванту света, в сочетании с рецептом для увеличения его интенсивности за счет установления ближнепольной связи с плазмонным резонатором, создают предпосылки к созданию ультрафиолетовых источников нового типа. Это связано с тем, что для многочастичных механизмов излучательной рекомбинации ширина

запрещенной зоны не является фундаментальным ограничением для энергии испускаемых квантов.

Достоверность результатов, полученных соискателем, определяется тем, что для получения экспериментальных данных и их интерпретации был использован ряд как хорошо известных, так и развитых в ходе выполнения работы новых экспериментальных методик. Полученные автором экспериментальные результаты надежно воспроизводились для образцов и структур, выращенных различными научными группами. Также в диссертационном исследовании применялись надежные и хорошо апробированные методы математического моделирования и численных расчетов, позволяющие производить проверку правильности их работы на известных моделях. Интерпретация полученных экспериментальных результатов, базирующаяся на обоснованных физических моделях, согласуется с существующими теоретическими представлениями и литературными данными, подтвержденными другими группами.

Все выносимые на защиту положения, экспериментальные и теоретические результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии или руководстве. Автору также принадлежит определяющий вклад в концептуализацию и постановку всех задач диссертационного исследования, а также в интерпретацию результатов.

Результаты диссертационной работы Кривобока В.С. рекомендуются к использованию в ЗАО «НПО «Орион», АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», Институте радиоэлектроники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институте физики микроструктур РАН, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова РАН, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Российском квантовом центре.

В ходе защиты соискатель Кривобок В.С. аргументировано ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 6 февраля 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Кривобоку Владимиру Святославовичу ученую степень доктора физико-математических наук за экспериментальное решение научной проблемы о существовании и основных свойствах электронно-дырочной жидкости в двумерных системах на основе полупроводниковых квантовых ям, а также за разработку и реализацию новых методов оптической спектроскопии позволяющих определять спектр примесно-дефектных состояний в полупроводниковых гетероструктурах.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 22 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.8 – физика конденсированного состояния), участвовавшие в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали

За присуждение ученой степени - 22,

Против присуждения ученой степени - 0,

Недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета

член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Золотько Александр Степанович

6 февраля 2023 г.