

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу **Кривобока Владимира Святославовича** «Низкотемпературная люминесцентная спектроскопия собственных и примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах с неоднородной структурой», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в виде научного доклада по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния

Актуальность. Диссертационная работа В.С.Кривобока посвящена низкотемпературным оптическим исследованиям неоднородных полупроводниковых структур. В данном случае под неоднородностью на нано- или микроуровне понимается как наличие гетерограниц, так и присутствие разнообразных точечных и линейных дефектов, примесей и их комплексов. Область применения таких материалов в современной электронике и оптоэлектронике чрезвычайно широка. Контролируемое управление свойствами таких материалов подразумевает использование технологий эпитаксиального роста, легирования и иных методик, позволяющих конструировать спектр электронных состояний. В этой связи важным является развитие методов прямого экспериментального исследования энергетических спектров описанных выше неоднородных полупроводниковых систем. В настоящее время большинство доступных экспериментальных методов оперируют макроскопическими свойствами материалов. Таким образом, поставленная в диссертационной работе задача развития новых неразрушающих оптических методов контроля и управления электронным спектром современных полупроводниковых материалов, для которых характерна неоднородность кристаллической структуры на микро- или нано масштабах, несомненно является актуальной.

Диссертация, оформленная в идее научного доклада, состоит из введения, трех разделов оригинальной основной части, заключения, списка литературы и списка публикаций, в которых изложены основные научные результаты (всего 49 статей, из них 31 статья за последние 10 лет в журналах первого и второго квартилей и 43 статьи, опубликованные в 2012-2022 гг. – в соответствии с требованиями к диссертациям в виде научного доклада, установленным Постановлением Правительства Российской Федерации от 26 сентября 2022 г. № 1690). Раздел 1 основной части посвящен коллективным эффектам в электронно-дырочной системе в гетероструктурах с квантовыми ямами SiGe/Si, раздел 2 – оптическому зондированию дефектов в полупроводниках A₂B₆, раздел – 3 изотопическим эффектам применительно к центрам окраски в алмазе.

Новизна результатов. В работе получено значительное количество новых важных научных результатов. Приведем лишь некоторые из них, представляющиеся

наиболее важными и интересными.

В гетероструктурах с квантовыми ямами $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ впервые исследована коллективные эффекты при высоких уровнях оптического возбуждения и показано, что при определенном составе ям происходит расслоением электронно-дырочного газа на области металлической двумерной электронно-дырочной жидкости с высокой концентрацией носителей заряда и области с низкой концентрацией носителей. Обнаружено, что межзонная рекомбинация электронов и дырок в электронно-дырочной жидкости сопровождается излучением в видимой области спектра, обусловленным аннигиляцией двух электронно-дырочных пар, энергия и импульс которых передаются одному кванту света.

Наиболее интересными и значимыми представляются результаты исследования примесей, дефектов и их комплексов в полупроводниках A2B6 и структурах на их основе. Диссертантом предложена и реализована оригинальная экспериментальная методика спектрального выделения «одионой» донорно-акцепторной пары в широкозонных полупроводниках, основанная на избирательном возбуждении пары с определенным расстоянием между донором и акцептором с помощью перестраиваемого лазера и выделения дифференциального сигнала фотолюминесценции от такой пары на фоне других переходов при возбуждении образца излучением с двумя близкими длинами волн.

Развитая методика позволила провести исследования электронных спектров акцепторных центров в кубических полупроводниках, имеющих низкую симметрию, возникающих вследствие взаимодействия примесей с собственными точечными дефектами и/или за счет понижения симметрии, вызванного эффектом Яна-Теллера. Продемонстрировано влияние низкой симметрии акцепторов на структуру формируемых ими электронных уровней и развит простой бесконтактный метод, позволяющий без приложения внешнего поля регистрировать понижение симметрии акцепторного центра.

В кристаллическом $\text{ZnSe}:\text{Fe}$ обнаружена новый люминесцирующий комплекс, возникающий за счет взаимодействия иона железа с собственным точечным дефектом цинковой подрешетки, с бесфононным переходом в районе 0.681 эВ. Обнаруженный комплекс позволяет реализовать «оптический зонд» собственных точечных дефектов в кристаллическом ZnSe , применяемом для создания перестраиваемых лазеров среднего инфракрасного диапазона.

Обнаружен новый тип квантовых излучателей, возникающих в результате прорастания 90° частичной дислокации через полупроводниковую квантовую яму, характеризующихся узкой (<1 мэВ) линией бесфононного перехода, слабым взаимодействием с продольными оптическими фононами и большой степенью линейной поляризации

Наконец, в другом широкозонном материале – синтетическом алмазе, легированном германием, обнаружен не наблюдавшийся ранее люминесцентный центр с узким линией бесфононного перехода в районе 1.979 эВ. По результатам измерений микрофотолюминесценции алмазов с разным изотопическим составом матрицы и легирующей примеси (^{70}Ge , ^{73}Ge , ^{76}Ge) центр отождествлен с нейтральным вакансионным комплексом Ge-V.

Достоверность основных результатов работы не вызывает сомнений. Используются как современные хорошо известные высокоточные экспериментальные методики, так и развитые в ходе выполнения работы. Полученные результаты воспроизводились для образцов и структур, выращенных различными научными группами. Автором применялись надежные и хорошо апробированные методы математического моделирования и численных расчетов. Интерпретация полученных экспериментальных результатов, базирующаяся на обоснованных физических моделях, согласуется с существующими теоретическими представлениями и доступными литературными данными.

Научная и практическая значимость работы высока и несомненна. Она частично отражена в предыдущих разделах отзыва. Особо хотелось бы отметить развитую методику спектрального выделения отдельных излучателей, сформированных донорно-акцепторными парами и слабозмущенными фрагментами ядер частичных дислокаций, которая открывает новые возможности для анализа примесно-дефектного состава в полупроводниковых гетероструктурах и полупроводниковых материалах со структурным беспорядком. Представленные в диссертации данные о дислокационной микрофотолюминесценции релаксированных пленок CdTe – выращиваемых на GaAs и Si виртуальных подложек для роста твердых растворов CdHgTe, представлять интерес для визуализации структурных нарушений в эпитаксиальных гетероструктурах, используемых для создания фотоприемников и фотоприемных матриц среднего инфракрасного диапазона. Наконец, обнаруженный в диссертационном исследовании люминесцентный центр Ge-V может представлять интерес для создания элементов квантовой памяти.

Замечания и вопросы.

1. Представляется не вполне корректным формулировка первой части 1-го положения, выносимого на защиту. Основное состояние электронно-дырочной системы в квантовой яме из твердого раствора зависит не только от ее состава, но и уровня оптического возбуждения. Очевидно, что как конденсированная фаза металлического типа, так и биэкситоны будут возникать лишь при достаточно сильной накачке, а при меньшем ее уровне основное состояние будет представлено свободными носителями заряда и свободными или связанными экситонами.

2. Не вполне прослеживается корреляция между положениями, выносимыми на защиту, и основными результатами, которыми эти положения должны доказываться и обосновываться. Так, если 1-му положению соответствуют результаты 1-3, а 10-му положению – результат 10, то восьми положениям 2-9, относящимся ко второму разделу оригинальной части диссертации, должны соответствовать результаты 4-9. При этом результат 9 является чуть более развернутой формулировкой положения 9, а результат 5 посвящен предложенной дифференциальной методике выделения сигнала. В итоге развернутым положениям 2-4 соответствует общо сформулированный результат 4, а положениям 7 и 8 – результат 8. Такая компоновка результативной части работы несомненно затрудняет ее восприятие.

3. При изложении результатов диссертации автор дает ссылки на свои оригинальные работы в общем списке литературы в порядке их упоминания, а затем в конце еще раз дает список авторских работ в хронологическом порядке. С указанием квартилей, что также усложняет восприятие. В результате работы [76] и [84] (последняя из журнала 1-го квартиля) оказались пропущены в последнем списке авторских работ

4. Замечания по оформлению:

- предлог «несмотря» (стр.31) следует писать слитно;
- для работы [67] указан неверный DOI;
- для работы [А6] неверно указан том журнала (т.113 при правильном т.140);
- в выходных данных работы [78] неверно указан номер выпуска.

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень выполнения работы, внимание автора к деталям эксперимента, большой объем проведенных экспериментальных исследований на структурах различных типов, новизну полученных результатов. Работа является цельным и законченным исследованием. Несомненно, эта работа открывает дальнейшие перспективы разработки приборов полупроводниковой оптоэлектроники.

Совокупность опубликованных работ автора представляет собой крупное достижение в области физики неоднородных конденсированных сред, имеющее большое научное и прикладное значение. Основные результаты диссертация опубликованы в ведущих научных журналах. Диссертация в виде научного доклада правильно и достаточно полно отражает сущность полученных результатов. Результаты работы были представлены на ведущих российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация Кривобока Владимира Святославовича является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на актуальную для

современной физики конденсированного состояния тему, и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (Положение о присуждении ученых степеней, утвержденное Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 26.09.2022), а он сам несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент

Гавриленко Владимир Изяславович

доктор физико-математических наук, профессор
заместитель директора по научной работе
Институт физики микроструктур РАН – филиал
Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
603087, Нижегородская обл., Кстовский район,
д. Афоново, ул. Академическая, д. 7.
Адрес сайта: <http://www.ipmras.ru/>
E-mail: gavr@ipmras.ru
Тел.: +7 (831) 417-94-62

Согласен на обработку персональных данных.

09.01.2023

Подпись Гавриленко В.И. заверяю.

Ученый секретарь ИФМ РАН
к.ф.-м.н.



Д.М.Гапонова

Список основных публикаций официального оппонента доктора физико-математических наук Гавриленко Владимира Изяславовича в соответствующей сфере исследования в рецензируемых научных изданиях

1. Utochkin, V. V., Kudryavtsev, K. E., Dubinov, A. A., Fadeev, M. A., Rumyantsev, V. V., Razova, A. A., Andronov, E. V., Aleshkin, V. Ya., Gavrilenko, V. I., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Teppe, F. & Morozov, S. V. Stimulated Emission up to 2.75 μm from HgCdTe/CdHgTe QW Structure at Room Temperature. *Nanomaterials* 12, 2599 (2022).
2. Morozov, S. V., Rumyantsev, V. V., Zholudev, M. S., Dubinov, A. A., Aleshkin, V. Ya., Utochkin, V. V., Fadeev, M. A., Kudryavtsev, K. E., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Gavrilenko, V. I. & Teppe, F. Coherent Emission in the Vicinity of 10 THz due to Auger Suppressed Recombination of Dirac Fermions in HgCdTe Quantum Wells. *ACS Photonics*, 8, 3526-3535 (2021).
3. Kudryavtsev, K. E., Rumyantsev, V. V., Utochkin, V. V., Fadeev, M. A., Aleshkin, V. Ya., Dubinov, A. A., Zholudev, M. S., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Remesnik, V. G., Teppe, F., Gavrilenko, V. I. & Morozov, S. V. Toward Peltier-cooled mid-infrared HgCdTe lasers: Analyzing the temperature quenching of stimulated emission at $\sim 6 \mu\text{m}$ wavelength from HgCdTe quantum wells. *Journal of Applied Physics* 130, 214302 (2021).
4. Уточкин В.В., Дубинов А.А., Фадеев М.А., Румянцев В.В., Михайлов Н.Н., Дворецкий С.А., Гавриленко В.И., Морозов С.В. Влияние внутренних оптических потерь на генерацию стимулированного излучения в среднем ИК диапазоне в волноводных гетероструктурах с квантовыми ямами HgCdTe/CdHgTe. *Физика и техника полупроводников* 55, 922 (2021).
5. Aleshkin, V. Y., Dubinov, A. A., Gavrilenko, V. I. & Teppe, F. Stimulated emission of plasmon-LO mode in narrow gap HgTe/CdHgTe quantum wells. *J. Opt.* 23, 115001 (2021).
6. Fadeev, M. A., Troshkin, A. O., Dubinov, A. A., Utochkin, V. V., Razova, A. A., Rumyantsev, V. V., Aleshkin, V. Ya., Gavrilenko, V. I., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A. & Morozov, S. V. Mid-infrared stimulated emission in HgCdTe/CdHgTe quantum well heterostructures at room temperature. *Opt. Eng.* 60, 082006 (2020).
7. Aleshkin, V. Ya., Rumyantsev, V. V., Kudryavtsev, K. E., Dubinov, A. A., Utochkin, V. V., Fadeev, M. A., Alymov, G., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Teppe, F., Gavrilenko, V. I. & Morozov, S. V. Auger recombination in narrow gap HgCdTe/CdHgTe quantum well heterostructures. *Journal of Applied Physics* 129, 133106 (2021).
8. Utochkin, V. V., Kudryavtsev, K. E., Fadeev, M. A., Razova, A. A., Bykov, D. S., Aleshkin, V. Ya., Dubinov, A. A., Mikhailov, N. N., Dvoretzky, S. A., Rumyantsev, V. V., Gavrilenko, V. I. & Morozov, S. V. Mid-IR stimulated emission in Hg(Cd)Te/CdHgTe quantum well structures up to 200 K due to suppressed Auger recombination. *Laser Phys.* 31, 015801 (2020).
9. Kudryavtsev, K. E., Rumyantsev, V. V., Aleshkin, V. Ya., Dubinov, A. A., Utochkin, V. V., Fadeev, M. A., Mikhailov, N. N., Alymov, G., Svintsov, D., Gavrilenko, V. I. & Morozov, S. V. Temperature limitations for stimulated emission in 3-4 μm range due to threshold and non-threshold Auger recombination in HgTe/CdHgTe quantum wells. *Appl. Phys. Lett.* 117, 083103 (2020).

10. И. Д. Николаев, Т. А. Уаман Светикова, В. В. Румянцев, М. С. Жолудев, Д. В. Козлов, С. В. Морозов, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов, В. И. Гавриленко, А. В. Иконников. Зондирование состояний двухзарядного акцептора в гетероструктурах на основе CdHgTe с помощью оптического затвора. Письма в ЖЭТФ 111, 682 (2020).
11. Alymov, G., Rumyantsev, V., Morozov, S., Gavrilenko, V., Aleshkin, V. & Svintsov, D. Fundamental Limits to Far-Infrared Lasing in Auger-Suppressed HgCdTe Quantum Wells. ACS Photonics 7, 98-104 (2019).
12. Rumyantsev, V., Fadeev, M., Aleshkin, V., Kulikov, N., Utochkin, V., Mikhailov, N., Dvoretiskii, S., Pavlov, S., Hübers, H., Gavrilenko, V., Sirtori, C., Krasilnik, Z. F. & Morozov, S. Carrier Recombination, Long-Wavelength Photoluminescence, and Stimulated Emission in HgCdTe Quantum Well Heterostructures. Phys. Status Solidi B 256, 1800546 (2019).
13. Д.В. Козлов, В.В. Румянцев, А.М. Кадыков, М.А. Фадеев, Н.С. Куликов, В.В. Уточкин, Н. Н. Михайлов, С . А. Дворецкий, В. И. Гавриленко, Х.-В . Хюберс, Ф. Теппе, С. В. Морозов. Особенности фотолуминесценции двойных акцепторов в гетероструктурах HgTe/CdHgTe с квантовыми ямами в терагерцовом диапазоне. Письма в ЖЭТФ 109, 679 (2019).
14. Т.А. Уаман Светикова, А.В. Иконников, В.В. Румянцев, Д.В. Козлов, В.И. Черничкин, А.В. Галеева, В.С. Варавин, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий, С.В. Морозов, В.И. Гавриленко. Эволюция примесной фотопроводимости в эпитаксиальных пленках CdHgTe при изменении температуры. Физика и техника полупроводников 53, 1297-1302 (2019).
15. Fadeev, M. A., Rumyantsev, V. V., Kadykov, A. M., Dubinov, A. A., Antonov, A. V., Kudryavtsev, K. E., Dvoretiskii, S. A., Mikhailov, N. N., Gavrilenko, V. I. & Morozov, S. V. Stimulated emission in the 2.8-3.5 μm wavelength range from Peltier cooled HgTe/CdHgTe quantum well heterostructures. Opt. Express 26, 12755 (2018).