

ОТЗЫВ

официального оппонента Константиновой Елизаветы Александровны на диссертационную работу Кривобока Владимира Святославовича «Низкотемпературная люминесцентная спектроскопия собственных и примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах с неоднородной структурой», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Диссертация Кривобока Владимира Святославовича посвящена развитию новых подходов, позволяющих восстанавливать электронный спектр современных полупроводниковых материалов с неоднородностью кристаллической структуры на субмикронном или нано масштабах. Для данных материалов возможности прямого экспериментального исследования как одноэлектронного спектра, так и свойств неравновесной электронно-дырочной системы целом, остаются весьма ограниченными вследствие того, что большинство доступных экспериментальных методов оперируют макроскопическими свойствами образцов. Реализованные в диссертационном исследовании новые подходы, позволяют избежать данных ограничений и использовать современные методы оптической спектроскопии для исследования собственных и примесно-дефектных состояний в гетероструктурах и материалах с беспорядком. Это определяет актуальность диссертационного исследования. Работа Кривобока В. С. может представлять практическую значимость для ряда направлений связанных с разработкой компактных источников УФ излучения, твердотельных лазеров и детекторов различного типа.

Диссертация, оформленная в виде научного доклада, состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные результаты (всего 31 статьи за последние 10 лет в журналах первого и второго квартилей по международной базе Scopus).

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов. Приведена информация о методологии и методах, использованных в работе. Представлены выносимые на защиту научные положения, описана степень достоверности результатов и их апробация, охарактеризован личный вклад автора.

Первая глава посвящена экситонным комплексам и электронно-дырочной жидкости в кремний-германиевых гетероструктурах. Было продемонстрировано принципиальное существование квазидвумерной электронно-дырочной жидкости в $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ квантовых ямах с содержанием германия $x = 5\%$. В условиях импульсного возбуждения гетероструктур с квантовыми ямами $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ была детально исследована динамика фазового перехода «электронно-дырочная плазма-экситонный газ». Показано, что сценарий фазового перехода радикально зависит от содержания германия в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Было так же показано, что рекомбинация носителей в электронно-дырочной плазме приводила к постепенному ослаблению экранирования и появлению экситонных состояний. Кроме того, исследовалось влияние примесей на свойства конденсированной фазы. Было продемонстрировано влияние δ -слоя бора на экситонную люминесценцию и люминесценцию, вызванную плотной электронной плазмой. Обнаружено быстрое испарение электронно-дырочной жидкости в квантовых ямах, вызванное нагревом электронно-дырочной жидкости неравновесными фононами. Установлено, что возрастание плотности экситонного газа в квантовых ямах связано с испарением электронно-дырочной жидкости и увеличением скорости захвата экситонов. Также экспериментально обнаружена тонкая структура спектра излучения 2D электронно-дырочной жидкости в мелких

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ квантовых ямах. Данную тонкую структуру удалось объяснить на основе представлений о скачках в плотности состояний (аналог сингулярности Ван Хофа), возникающих за счёт сосуществования в электронно-дырочной жидкости легких и тяжелых дырок, и о взаимодействии носителей заряда с колебаниями зарядовой плотности в электронно-дырочной жидкости. Кроме того, приведены результаты для $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ квантовых ям, связанные с деформацией, сверхизлучением, влиянием золотых наночастиц.

Вторая глава посвящена исследованию примесно-дефектных состояний в полупроводниковых системах с беспорядком. Описаны оптические исследования различных типов акцепторов в системе CdTe. Исследован эффект самокомпенсации. Развитый в данной главе подход использует идею «оптического зондирования», которая подразумевает оптический доступ к электронной подсистеме одиночных дефектов или донорно-акцепторных пар. Данный подход позволил впервые детально исследовать электронный спектр ряда нететраэдрических дефектов и наблюдать фазовый переход в электронно-дырочной системе дислокационного ядра.

В третьей главе обсуждаются GeV- и SiV- центры окраски в алмазе. Основной упор делается на влияние изотопического состава матрицы и легирующей примеси на свойства данных люминесцентных центров. Выбор алмаза в качестве модельного материала для обсуждения изотопических эффектов, в первую очередь, определяется высокими частотами оптических фононов и акустических фононов на краю зоны Бриллюэна. Данная особенность алмаза облегчает наблюдение ряда явлений связанных с энергией нулевых колебаний.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты диссертации Кривобока В. С. являются оригинальными и актуальными. Результаты работы можно использовать в ряде технологических применений: создание новых источников излучения, в том числе однофотонных, контроль качества и создание детекторных структур и лазеров. Работа прошла апробацию на большом числе международных и российских конференций.

Представленная работа Кривобока В. С. представляет собой комплексное исследование важной проблемы определения электронного спектра отдельных дефектов в полупроводниковых материалах с высокой степенью системного беспорядка. Работа носит законченный, фундаментальный характер, а её результаты не вызывают сомнений с точки зрения научной новизны, значимости и обоснованности положений, выносимых на защиту.

Несмотря на общую положительную оценку работы, имеется ряд важных замечаний и вопросов:

1. Необходимо пояснить, почему при исследовании донорно-акцепторных пар и дислокаций упор в диссертации сделан на гетероструктуры с квантовыми ямами, и при этом не обсуждаются ни полупроводниковые квантовые точки, ни полупроводниковые решетки.

2. В работе приводится экспериментально измеренная линия излучения двумерной электронно-дырочной жидкости, но не обсуждается, какие механизмы обуславливают форму данной линии.

Перечисленные замечания не снижают общую высокую оценку работы. Содержание работы соответствует специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертация Кривобока В. С. «Низкотемпературная люминесцентная спектроскопия собственных и примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах с неоднородной структурой» удовлетворяет всем требованиям к докторским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней,

утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а автор работы, Кривобок Владимир Святославович, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:
профессор кафедры Общей физики и
молекулярной электроники
Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова
доктор физико-математических наук,
доцент

Константинова

Константинова Елизавета Александровна

17 января 2023 г.

Адрес организации: 119991, ГСП-1, Москва, ул. Ленинские Горы д.1, строение 2,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
Физический факультет
+7 (495) 939-16-82 email: info@physics.msu.ru

И. о. декана Физического факультета МГУ



профессор Белокуров В.В.

17 января 2023 г.

Список основных работ по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)

1. Krivetskiy Valeriy, Garshev Alexey, Marikutsa Artem, Ivanov Vladimir, Krotova Alina, Filatova Darya, Konstantinova Elizaveta, Naberezhnyi Daniil, Khmelevsky Nikolay, Kots Pavel, Smirnov Andrey, Rumyantseva Marina, Gaskov Alexander. Enhancement of Lewis acidity of Cr-doped nanocrystalline SnO₂ and its effect on surface NH₃ oxidation and the sensory detection pattern. *Chemphyschem*, v.20, № 15, p. 1985-1996 (2019).

<https://doi.org/10.1002/cphc.201900192>

SJR 2019: 1.01 Q1

2. Konstantinova Elizaveta A., Minnekhanov Anton A., Kokorin Alexander I., Sviridova Tatyana V., Sviridov Dmitry V. Determination of the Energy Levels of Paramagnetic Centers in the Band Gap of Nanostructured Oxide Semiconductors Using EPR Spectroscopy. *Journal of Physical Chemistry C*, v. 122, № 18, p.10248-10254 (2018)

<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b01621>

SJR 2019: 1.48 Q1

3. Elizaveta Konstantinova, Anton Minnekhanov, Artemii Beltiukov, Vladimir Ivanov, Andrew James Sutherland, Olga Boytsova. Unveiling point defects in titania mesocrystals: a combined EPR and XPS study. *New Journal of Chemistry*, v. 42, p.15184 - 15189 (2018).

<https://doi.org/10.1039/C8NJ03196G>

SJR 2019: 0.71 Q1

4. Daniil Naberezhnyi, Marina Rumyantseva, Darya Filatova, Maria Batuk, Joke Hadermann, Alexander Baranchikov, Nikolay Khmelevsky, Anatoly Aksenenko, Elizaveta Konstantinova, Alexander Gaskov. Effects of Ag Additive in Low Temperature CO Detection with In₂O₃ Based Gas Sensors. *Nanomaterials*, v.8, №10, p.801-816 (2018).

<https://doi.org/10.3390/nano8100801>

SJR 2019: 0.86 Q1

5. Jiwei Ma, Wei Li, Nikolay T. Le, Jesús A. Díaz-Real, Monique Body, Christophe Legein, Jolanta Światowska, Arnaud Demortière, Olaf J. Borkiewicz, Elizaveta A. Konstantinova, Alexander I. Kokorin, Nicolas Alonso-Vante, Christel Laberty-Robert, Damien Dambournet. Red-Shifted Absorptions of Cation-Defective and Surface-Functionalized Anatase with Enhanced Photoelectrochemical Properties. *ACS Omega*, v.4, № 6, p. 10929-10938 (2019).

Q1 <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01219>

6. S.A.Vladimirova, K.Ya.Prikhodko, M.N.Rumyantseva, E.A.Konstantinova, A.S.Chizhov, A.M.Gaskov. Nanocrystalline complex oxides NixCo_{3-x}O₄: Cations distribution impact on electrical and gas sensor behavior. *Journal of Alloys and Compounds*. 828:154420, 2020.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154420>

SJR 2019: 1.055 Q1

7. A. Nasriddinov, M. Rumyantseva, E. Konstantinova, A. Marikutsa, S. Tokarev, P. Yaltseva, O. Fedorova, A. Gaskov. Effect of Humidity on Light-Activated NO and NO₂ Gas Sensing by Hybrid Materials. *Nanomaterials*. 10: 915, 2020.

<https://doi.org/10.3390/nano10050915>

SJR 2019: 0.86 Q1

8. A. Logvinovich, T. Sviridova, E. Konstantinova, A. Kokorin, D. Sviridov Solvothermally-derived MoO₃-benzotriazole hybrid structures for nanocontainer depot systems. *New Journal of Chemistry*. 44: 11131, 2020.

<https://doi.org/10.1039/D0NJ02326D>

SJR 2019: 0.71 Q1

9. Konstantinova E.A., Minnekhanov A.A., Trusov G.V., Kytin V.G. Titania-based nanoheterostructured microspheres for prolonged visible-light-driven photocatalysis. *Nanotechnology*, v. 31, p.345207, 2020.

<https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab91f1>

SJR 2019: 1.03 Q1

10. Vladimir V. Shilovskikh, Alexandra A. Timralieva, Pavel V. Nesterov, Alexander S. Novikov, Petr A. Sitnikov, Elizaveta A. Konstantinova, Alexander I. Kokorin, Ekaterina V. Skorb. Melamine-barbiturate supramolecular assembly as pH-dependent radical trap material. *Chemistry - A European Journal*, v.26, p.1 – 9, 2020.

<https://doi.org/10.1002/chem.202002947>

SJR 2019: 1.68 Q1

11. K. Vasić, Ž. Knez, E. Konstantinova, A. Kokorin, S. Gyergyek, M. Leitgeb. Structural and magnetic characteristics of carboxymethyl dextran coated magnetic nanoparticles: from characterization to immobilization application. *Reactive and Functional Polymers*, v. 148, p. 104481-1-104481-13 (2020).

<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104481>

SJR 2021: 0.67 Q1

12. A. Logvinovich, T. Sviridova, E. Konstantinova, A. Kokorin, D. Sviridov Solvothermally-derived MoO₃-benzotriazole hybrid structures for nanocontainer depot systems. *New Journal of Chemistry*, v. 44, p. 1131-11136, (2020).

<https://doi.org/10.1039/D0NJ02326D>

SJR 2021: 0.63 Q1

13. A. Ulyankina, T. Molodtsova, M. Gorshenkov, I. Leontyev, D. Zhigunov, E. Konstantinova, T. Lastovina, J. Tolasz, J. Henych, N. Licciardello, G. Cuniberti, N. Smirnova. Photocatalytic degradation of ciprofloxacin in water at nano-ZnO prepared by pulse alternating current electrochemical synthesis. *Journal of Water Process Engineering*, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101809>

SJR 2021: 1.03 Q1

14. Kelbysheva Elena S., Telegina Lyudmila N., Strelkova Tatyana V., Ezernitskaya Mariam G., Smol'yakov Aleksander F., Borisov Yurii A., Lokshin Boris V., Konstantinova Elizaveta A., Gromov Oleg I., Kokorin Alexander I., Loim, Nikolay M. Thioureido Cymantrene Derivatives: Synthesis and Photochromic Properties. *Organometallics*, v. 38, № 10, p. 2288-2297 (2019).

<https://doi.org/10.1021/acs.organomet.9b00165>

SJR 2021: 0.99 Q1

15. A.I. Kokorin, A.N. Streletskii, I.V. Kolbanev, A.B. Borunova, Y. N. Degtyarev, A.V. Leonov, D.G. Permenov, E.A. Konstantinova. Influence of Aluminum Addition on the Structure and Feathers of V₂O₅ Oxide Prepared by Mechanochemical Activation. *J. Phys. Chem. C*, v.123, (2019).

<http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b05325>

SJR 2021: 1.1 Q1