

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Директор  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт физики твердого тела имени  
Ю. А. Осипьяна Российской академии наук  
(ИФТТ РАН)



Д.ф.-м.н.

А. А. Левченко

«22» октября 2021 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Ченцова Семена Игоревича «Спектроскопия отдельных дефектов в полупроводниковых соединениях  $A_2B_6$  и гетероструктурах на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

#### **Актуальность темы исследования**

Диссертационная работа Ченцова С. И. посвящена поиску условий для наблюдения и анализу основных свойств одиночных (квантовых) излучателей, формируемых протяжёнными дефектами в широкозонных полупроводниках  $A_2B_6$ . Актуальность исследований, выполненных в диссертационной работе Ченцова С. И., обеспечиваются тем, что в настоящее время активно обсуждается влияние наиболее распространённых типов протяжённых дефектов на электронно-дырочную систему объёмных полупроводников и полупроводниковых гетероструктур. Интерес к этим вопросам обусловлен, в частности, тем, что протяжённые дефекты оказывают значительное влияние на механизмы релаксации носителей и формирования электронного спектра в полупроводниковых материалах  $A_2B_6$ , которые имеют большое значение для целого ряда коммерчески востребованных технологий, связанных с солнечной энергетикой, изготовлением фотодетекторов и источников излучения. Несмотря на то, что структурные

свойства протяжённых дефектов являются хорошо изученными, проблема экспериментального определения их электронного спектра, как правило, остается нерешённой. Основной причиной возникающих трудностей является беспорядок, который протяжённые дефекты вносят в своё окружение. Данное явление исключает однозначное отождествление различных особенностей, связанных с электронной подсистемой. В то же время, именно электронные свойства дефектов наиболее существенны для большинства приборных применений. Трудности, связанные с сильным разупорядочением при исследовании макроскопического ансамбля протяжённых дефектов, могут быть преодолены с помощью выделения одиночных объектов. К таким объектам относятся изолированные (в том числе, однофотонные) излучатели, образованные при участии протяжённых дефектов. Исследованию таких объектов и посвящена работа Ченцова С. И.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация Ченцова С. И. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Работа изложена на 111 страницах, содержит 45 рисунков и 2 таблицы. Список литературы включает 106 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, определена структура диссертации.

Первая глава содержит обзор литературы по механизмам излучательной рекомбинации в полупроводниковых материалах (в том числе и группы  $A_2B_6$ ). Описаны основные механизмы излучательной рекомбинации в полупроводниках с прямым краем собственного поглощения. Проведено обсуждение роли фононов в процессах излучательной рекомбинации. Охарактеризованы структурные свойства протяжённых дефектов в ГЦК полупроводниках  $A_2B_6$  на основе CdTe. Описываются особенности люминесценции протяжённых дефектов применительно к полупроводникам группы  $A_2B_6$ .

Во второй главе приведено описание установки по измерению микрофотолюминесценции и исследуемых образцов. Указаны основные свойства всех исследуемых в работе образцов: твёрдого раствора CdZnTe, плёнок CdTe/Si и CdTe/GaAs и квантовой ямы на основе ZnSe.

В третьей главе приведены результаты обнаружения одиночных излучателей в спектрах МФЛ твёрдых растворов CdZnTe и плёнок CdTe/Si и CdTe/GaAs. Приведена

информация об обнаружении в спектрах микрофотолюминесценции в области дислокационного излучения CdZnTe узких пиков, связываемых с излучением одиночных дислокаций. Обнаруженные излучатели можно разделить на два типа. Оба типа излучателей сходны по своим основным свойствам, однако для второго типа наблюдаются спектральные биения величиной несколько мэВ на временах порядка минуты. Также проведена идентификация одиночных излучателей, связанных с протяжёнными дефектами в плёнках CdTe/Si и CdTe/GaAs. Показано, что для CdTe/GaAs и CdTe/Si подложек одиночные излучатели могут быть описаны в рамках представлений о люминесценции  $90^\circ$  частичных дислокаций, имеющих, соответственно, ориентацию вдоль случайного или вдоль выделенного направления  $\langle 110 \rangle$ , соответственно.

В четвёртой главе приведено обсуждение эффекта исчезновения одиночных излучателей в плёнках CdTe с увеличением плотности мощности накачки. Также описаны результаты экспериментов по необратимому лазерному воздействию на структуру ядер отдельных дислокаций. Показано, что можно подобрать мощность импульсного лазерного воздействия таким образом, что, не воздействуя на кристаллическую решётку, можно вызвать перестройку оборванных связей в ядрах частичных дислокаций.

В пятой главе приведено обсуждение свойств одиночных излучателей в квантовой яме ZnSe/ZnMgSSe. В частности, в спектрах квантовой ямы на основе ZnSe/ZnMgSSe были обнаружены одиночные излучатели в области дислокационной люминесценции. Свойства данных излучателей указывают, что обнаруженный точечный источник возникает при пересечении слоя ZnSe дислокационной полупетлёй или частичной дислокацией, которые скользят с поверхности структуры вглубь, пересекая квантовую яму. Также, в квантовой яме ZnSe/ZnMgSSe были зарегистрированы одиночные излучатели, связанные с донорно-акцепторными парами. Показано, что для некоторых излучателей указанного типа удается подобрать время записи спектра фотолюминесценции, которое позволяет реализовать квантовое зондирование акцептора (донора), при условии, что свойства донора (акцептора) в паре известны. Применимость данного метода продемонстрирована на простейших примерах – определении частот фононов для одиночных акцепторных центров различного типа.

В заключении сформированы основные результаты диссертационного исследования.

### **Научная новизна исследования**

К числу наиболее значимых результатов, обладающих новизной, следует отнести реализацию так называемого квантового зондирования, когда анализ излучателей,

связанных с одиночными донорно-акцепторными парами, позволяет определить свойства отдельного акцептора (донора), при условии, что свойства донора (акцептора) в паре известны. Расширение описанного подхода на электронную подсистему дефектов, например, используя спектроскопию возбуждения люминесценции для одиночных донорно-акцепторных пар, может представлять интерес для развития оптических методов исследования сложных дефектов в сильно разупорядоченных системах.

### **Обоснование и достоверность результатов и выводов**

Все результаты, представленные в работе Ченцова С. И., являются достоверными и обоснованными. Достоверность достигнута использованием современного научного оборудования, физической обоснованностью используемых автором подходов, а также согласованностью полученных данных с известными результатами, относящимися к спектроскопии протяжённых дефектов в полупроводниковых материалах.

### **Научная и практическая значимость**

Представленный в работе бесконтактный метод, может быть использован для визуализации дефектной структуры и характеристики электронного спектра отдельных протяжённых дефектов в полупроводниковых соединениях  $A_2B_6$  и гетероструктурах на их основе. Такую характеристику можно, в частности, использовать для отбора подложек на основе CdTe, которые используются для создания КРТ детекторов среднего инфракрасного диапазона. Кроме того, экспериментальные методики, представленные в работе, могут быть использованы не только для полупроводников группы  $A_2B_6$ , но и для других полупроводниковых соединений, в том числе двумерных.

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих в областях физики конденсированного состояния и оптической спектроскопии: Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Институте спектроскопии РАН, Институте, Физико-техническом институте имени А. Ф. Иоффе, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (Новосибирск).

### **Оценка работы**

На основании рассмотрения материала диссертации, автореферата и представления работы на научном семинаре «Оптическая спектроскопия» ИФТТ РАН, ведущая организация считает, что диссертационная работа Ченцова С. И. представляет собой

завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Представленные в диссертации материалы свидетельствуют об авторе как о квалифицированном исследователе, владеющим как экспериментальной техникой оптической спектроскопии, так и средствами теоретического анализа полученных экспериментальных данных. Диссертация написана простым языком и хорошо структурирована. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния. Автореферат полно и правильно отображает содержание работы, её результаты и выводы. Список цитируемой литературы соответствует содержанию. По материалам диссертации опубликовано 8 работ в изданиях, входящих в перечень Web of Science и 5 тезисов, вошедших в сборники научных трудов международных и российских конференций.

### **Замечания по работе**

1. В работе не представлены результаты прямых измерений функции автокорреляции фотонов  $g^2(\tau)$ . В тоже время, такие измерения должны обеспечить более полную характеризацию излучающих состояний, которые формируются ядрами дислокаций.

2. В части работы касающейся полупроводниковых гетероструктур обсуждаются только сравнительно широкие квантовые ямы. Квантовые точки и узкие квантовые ямы, которые представляют большой интерес с точки зрения изучения электронного спектра дефектов, в работе не обсуждаются.

3. В экспериментах по лазерному отжигу используется источник излучения с энергией квантов заметно меньшей края фундаментального поглощения CdTe. Поэтому остаются не ясными механизмы поглощения данного излучения и, следовательно, возможные сценарии его воздействия на дислокации. Также, было бы полезным проведение экспериментов по лазерному воздействию на отдельные дислокации, в которых используется излучение с энергией кванта большей ширины запрещенной зоны CdTe.

4. В части работы касающейся изменений спектра излучения отдельных дислокаций с увеличением плотности мощности возбуждения и обсуждения фазового перехода от экситонного излучения к излучению плотной электронно-дырочной плазмы не обсуждается роль локального нагрева и/или роль неравновесных фононов. Эти аргументы важны для корректной интерпретации эффекта.

5. В обсуждении Рис.45 диссертации делаются выводы о наличии всевозможных фононных повторений излучения донорно-акцепторных пар в квантовых ямах

ZnSe/ZnMgSSe, причем помимо надежно идентифицированного повторения с участием LO-фонона, делается утверждение и о наличии повторений с участием TO, LA/TA, LO+LA/TA фононов, однако обозначенные в спектре пики не выделяются из шума. Таким образом, факт наблюдения этих фононных повторений не убедителен.

6. На том же рисунке 45 обсуждается присутствие сателлита линии бесфононного излучения донорно-акцепторных пар по причине теплового заселения более высоких подуровней тонкой структуры акцепторного центра. В то же время, это рассуждение не подкреплено никакими теоретическими оценками, либо экспериментами при намеренно повышенных температурах.

Стоит отметить, что приведенные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Работа С. И. Ченцова на тему «Спектроскопия отдельных дефектов в полупроводниковых соединениях  $A_2B_6$  и гетероструктурах на их основе» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 "Физика конденсированного состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней, а ее автор Ченцов Семен Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв составлен старшим научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твердого тела РАН кандидатом физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния. Ваньковым Александром Борисовичем.

Доклад С. И. Ченцова по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре ИФТТ РАН 14 октября 2021 г. Отзыв на диссертационную работу одобрен на заседании Ученого совета ИФТТ РАН, протокол № 18 от 18 октября 2021 г.

Старший научный сотрудник  
ИФТТ РАН, к.ф.м.н.  
Тел. 8-49652-24431,  
vankov@issp.ac.ru

Ваньков А.Б.

Секретарь семинара,  
Ведущий научный сотрудник  
ИФТТ РАН, к.ф.м.н.  
Тел. 8-49652-28378



Максимов А.А.

Председатель семинара,  
Главный научный сотрудник,  
Член-корр.РАН, д.ф.м.н.  
Тел. 8-49652-22691,  
Kulakovs@issp.ac.ru



Кулаковский В.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), Россия, 142432 г. Черноголовка, Московская обл., ул.Академика Осипьяна д.2, тел. 8(496)522-19-82, факс 8(496)522-81-60, <http://www.issp.ac.ru/>; [adm@issp.ac.ru](mailto:adm@issp.ac.ru)

Список основных научных публикаций сотрудников ИФТТ РАН по теме диссертации Ченцова С. И. «Спектроскопия отдельных дефектов в полупроводниковых соединениях  $A_2B_6$  и гетероструктурах на их основе» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Van'kov, A. B. & Kukushkin, I. V. Multiparticle Effects in the Spectrum of Collective Excitations of Strongly Interacting Two-Dimensional Electron Systems (Brief Review). *Jetp Lett.* 113, 102–114 (2021)
2. Muravev, V. M., Andreev, I. V., Semenov, N. D., Gubarev, S. I. & Kukushkin, I. V. Crossover from proximity to ordinary two-dimensional plasma excitation. *Phys. Rev. B* 103, 125308 (2021)
3. Solovyev, V. V., Schmult, S., Krückeberg, L., Großer, A., Mikolajick, T. & Kukushkin, I. V. Light-tunable 2D subband population in a GaN/AlGaN heterostructure. *Appl. Phys. Lett.* 118, 013101 (2021)
4. Kulik, L. V., Zhuravlev, A. S., Belozеров, E. I., Kuznetsov, V. A. & Kukushkin, I. V. Resonant Photoluminescence of a Two-Dimensional Electron System upon the Formation of a Bulk  $1/3$  State of the Fractional Hall Effect. *Jetp Lett.* 112, 485–490 (2020)
5. Khannanov, M. N., Van'kov, A. B., Novikov, A. A., Semenov, A. P., Gushchin, P. A., Gubarev, S. I., Kirpichev, V. E., Morozova, E. N., Kulik, L. V. & Kukushkin, I. V. Analysis of Natural Gas Using a Portable Hollow-Core Photonic Crystal Coupled Raman Spectrometer. *Appl Spectrosc* 74, 1496–1504 (2020)
6. Khisameeva, A. R., Shchepetilnikov, A. V., Muravev, V. M., Nefyodov, Yu. A. & Kukushkin, I. V. Comparative Study of the Two-Dimensional Plasma Excitations in the Heterostructures ZnO/MgZnO, AlAs/AlGaAs, and GaAs/AlGaAs. *J. Exp. Theor. Phys.* 130, 594–601 (2020)
7. Kveder, V. & Khorosheva, M. Interaction of Chromium Atoms with Dislocations and as-Grown Vacancy Complexes and its Impact on the Electronic Properties of FZ-Si. *Phys. Status Solidi B* 256, 1900013 (2019)
8. Khorosheva, M., Kveder, V. & Tereshchenko, A. Impact of iron atoms on electronic properties of FZ n-Si with dislocations. *Physica B: Condensed Matter* 570, 274–279 (2019)
9. Shchepetilnikov, A. V., Frolov, D. D., Solovyev, V. V., Nefyodov, Yu. A., Großer, A., Mikolajick, T., Schmult, S. & Kukushkin, I. V. Electron spin resonance in a 2D system at a GaN/AlGaN heterojunction. *Appl. Phys. Lett.* 113, 052102 (2018)



10. Solovyev, V. V. & Kukushkin, I. V. Renormalized Landau quasiparticle dispersion revealed by photoluminescence spectra from a two-dimensional Fermi liquid at the MgZnO/ZnO heterointerface. *Phys. Rev. B* 96, 115131 (2017)
11. Muravev, V. M., Andreev, I. V., Belyanin, V. N., Gubarev, S. I. & Kukushkin, I. V. Observation of axisymmetric dark plasma excitations in a two-dimensional electron system. *Phys. Rev. B* 96, 45421 (2017)
12. Kukushkin, V. I., Grishina, Ya. V., Solov'ev, V. V. & Kukushkin, I. V. Size plasmon-polariton resonance and its contribution to the giant enhancement of the Raman scattering. *Jetp Lett.* 105, 677–681 (2017)