Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П. Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Кривобок Владимир Святославович

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СОБСТВЕННЫХ И ПРИМЕСНО-ДЕФЕКТНЫХ СОСТОЯНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛАХ С НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРОЙ

1.3.8 – физика конденсированного состояния

Диссертация на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

в виде научного доклада

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ ... 3

Актуальность исследования ... 3

Цель и задачи исследования ... 6

Научная новизна ... 7

Практическая значимость ... 10

Методология и методы исследования ... 11

Положения, выносимые на защиту ... 14

Степень достоверности результатов ... 17

Аапробация результатов ... 17

Личный вклад автора ... 20

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ... 22

1. Экситонные комплексы и электронно-дырочная жидкость в кремний-германиевых гетероструктурах ... 23

2. Оптическое зондирование точечных и протяженных дефектов ... 28

3. Центры окраски в алмазе и изотопические эффекты ... 42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ... 46

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ... 49

СПИСОК НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ... 62

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Современная физика и технология полупроводников в подавляющем большинстве случаев оперирует либо гетероструктурами, либо материалами, для которых характерна структурная неоднородность на нано- или микромасштабах. В первом случае наглядным примером являются многочисленные оптоэлектронные устройства на основе квантовых ям и квантовых точек, такие как квантовокаскадные [1-3] и вертикально излучающие лазеры [4-6], источники одиночных фотонов [7-9], современные фотоприемные устройства [10-11] и др. Ко второй группе относятся различные поликристаллические материалы, нанокристаллы, а также релаксированные и/или сильно легированные полупроводниковые пленки, содержащие значительную концентрацию структурных дефектов. Подобные материалы часто оказываются вне конкуренции, если ключевую роль играют простота изготовления и низкая стоимость устройства при сохранении масштабируемости технологии [12]. В некоторых случаях материалы, свойства которых определяются структурными дефектами, допускают и принципиально новые технологические решения. В качестве примера можно привести солнечные элементы на основе пленок поликристаллического теллурида кадмия: эксперименты и ab-initio расчёты показывают, что именно наличие границ зерен, ввиду особых свойств связанной с ними электронной подсистемы, позволяют достичь коэффициента полезного действия, недостижимого для монокристаллических солнечных элементов [13]. Отдельно стоит отметить, так называемые, 2D полупроводники и многослойные сборки на их основе [14-16]. Данный тип материалов формально можно отнести к каждой из двух перечисленных выше групп, так как сборка из ультратонких пленок, связанных ван-дер-ваальсовым взаимодействием, является полупроводниковой гетероструктурой, в которой присутствует выраженное нарушение кристаллической структуры на интерфейсах. Интерес исследователей к технологиям на основе атомарно тонких

пленок слоистых полупроводников привел к бурному их развитию в последние годы.

Управление свойствами всех перечисленных выше материалов подразумевает использование как легирования, так и иных методик [13, 17], позволяющих контролируемым образом изменять спектр электронных состояний в запрещенной зоне. Но по сравнению с классическими (объемными) полупроводниками процессы, которые определяют спектр примесно-дефектных состояний в полупроводниковых гетероструктурах и в материалах с заметным структурным беспорядком, носят существенно более сложный характер. Очевидной причиной этого является взаимодействие легирующего элемента с гетероинтерфейсами и/или протяженными дефектами [18, 19]. Результат такого взаимодействия может радикально зависеть от свободной энергии системы, демонстрировать качественно отличающиеся сценарии реконструкции оборванных связей и, следовательно, итогового механизма формирования электронного спектра [20]. Отдельная группа фундаментальных явлений возникает при создании в неоднородных полупроводниковых материалах неравновесной электронно-дырочной системы с высокой плотностью. В этом случае коллективные взаимодействия носителей в сочетании с их пространственным ограничением могут приводить к появлению нестандартных электронных состояний и связанных с ними механизмов рекомбинации [20-23].

Поиск и исследование новых полупроводниковых материалов стимулирует активное развитие подходов, используемых в современной физике дефектов. Некоторые из них, как например, сочетание электронной микроскопии высокого разрешения с ab-initio расчетами, позволяют установить устойчивую картину связей, возникающую вблизи гетероинтерфейсов [24] или структурных дефектов [20, 25]. На следующем этапе квантовомеханические расчёты обеспечивают оценку одноэлектронного спектра и возможность моделирования различных свойств полупроводников при изменении внешних условий. Таким образом, удается качественно описать целый ряд нестандартных явлений, определяющих свойства полупроводниковых материалов со

структурной неоднородностью, вызванной гетероинтерфейсами [26], протяженными дефектами [20] или неустойчивостями решетки при увеличении энергии Ферми [27, 28].

В то же в время, возможности прямого экспериментального исследования электронного/колебательного спектра для описанных выше неоднородных полупроводниковых систем остаются весьма ограниченными. Это связано с тем, что большинство доступных экспериментальных методов оперируют макроскопическими свойствами материалов. Как следствие, анализ физических явлений/тенденций, затруднен значительной ролью беспорядка, возникающего за счет совокупности различных факторов. Наиболее простым примером является случайное расположение заряженных примесей по отношению к гетероинтерфейсу. В этом случае каждая примесь формирует спектр хорошо выраженных связанных состояний, но экспериментальное восстановление этого спектра на основе каких-либо свойств макроскопического ансамбля примесей оказывается невозможным. Другим очевидным фактором является случайный изотопический состав полупроводника, который может определять спектральную ширину линий при низких температурах [29], спектр и процессы упругого рассеяния фононов [30], времена спиновой когерентности [31] и др. Ряд существенно более сложных явлений возникает при переходе от одноэлектронного спектра к коллективным свойствам неравновесных электронно-дырочных систем. В частности, для двумерных систем хорошо известна резкая перестройка экранировки кулоновского взаимодействия при наличии рассеяния носителей [32]. Так как экранировка кулоновского взаимодействия определяет фазовую диаграмму электронно-дырочной системы, даже слабый беспорядок, влияющий на механизмы рассеяния, может приводить к заметным изменениям спектров рекомбинационного излучения. Кроме того, вызванная беспорядком слабая локализация провоцирует не только изменение транспортных свойств, но и существенно влияет на спиновую подсистему. Взаимосвязь между качественной картиной спиновой релаксации неравновесных носителей и слабой локализацией была недавно продемонстрирована в работе [33]. Наконец, отдельно стоит упомянуть целый ряд проблем, связанных со структурными

неустойчивостями полупроводниковых материалов, [27, 28, 34] и/или различными процессами взаимодействия примесей со структурными дефектами [20, 25]. Описание этой группы явлений осложняется тем, что взаимодействие дефектов оказывается самосогласованным – конкретный сценарий реконструкции химических связей зависит от свободной энергии (уровня Ферми), в то время как уровень Ферми зависит от структуры образовавшихся дефектов. Типичным примером является поведение теллурида кадмия при его легировании донорными примесями или медью [28].

Перечисленные выше примеры качественно иллюстрируют некоторые фундаментальные проблемы и ограничения, возникающие при исследовании современных полупроводниковых материалов. Тем не менее, последовательное описание свойств данных материалов и развитие связанных с ними технологий так или иначе упираются в получение прямых экспериментальных данных о одноэлектронном спектре и коллективных свойствах неравновесных носителей. Таким образом, актуальным является поиск последовательных подходов, позволяющих экспериментально изучать электронный спектр полупроводников, структура которых неоднородна на микро- и/или наномасштабах. Следует отметить, что специфика материалов с неоднородной структурой обычно осложняет проведение электрофизических измерений, поэтому при выборе подхода очевидное преимущество имеют бесконтактные методы исследований, основу которых составляет оптическая спектроскопия.

Исходя из вышеизложенного, в диссертационной работе были поставлены следующие цель и задачи.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является развитие новых подходов для контроля и управления электронным спектром современных полупроводниковых материалов, для которых характерна неоднородность кристаллической структуры на субмикронном или нано масштабах.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Разработка новых методов оптической спектроскопии, позволяющих неразрушающим образом исследовать электронный и колебательный спектр примесно-дефектных состояний в полупроводниковых гетероструктурах, а также в полупроводниковых материалах с неоднородной кристаллической структурой.

2. Установление взаимосвязи между многочастичными взаимодействиями в неравновесной электронно-дырочной системе и формированием нестандартных механизмов излучательной рекомбинации.

3. Применение низкотемпературной микрофотолюминесцении для получения оптического доступа к электронной подсистеме одиночных дефектов в полупроводниковых материалах с беспорядком.

4. Установление взаимосвязи между изотопическим составом и оптическими свойствами люминесцентных центров в широкозонных полупроводниках при низких температурах.

5. Разработка принципов адресного оптического воздействия на структурные дефекты в полупроводниковых материалах.

Научная новизна

Впервые исследована динамика фазового перехода «плазма – экситонный газ» в квазидвумерных системах на основе $Si_{1-x}Ge_x/Si$ квантовых ям, и продемонстрировано, что данный фазовый переход 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, преимущественно состоящей из экситонов и экситонных молекул.

Впервые продемонстрировано, что формирование двумерной конденсированной фазы в $Si_{1-x}Ge_x/Si$ квантовых ямах

сопровождается появлением рекомбинационного излучения в видимом диапазоне спектра. Данное излучение возникает за счет многочастичных процессов, при которых после аннигиляции двух электронно-дырочных пар энергия и импульс передаются одному кванту света. Показано, что процесс четырехчастичной излучательной рекомбинации носителей в двумерной конденсированной фазе может быть усилен за счет установления ближнепольной связи с плазмонными резонаторами.

Впервые экспериментально измерено время жизни носителей в двумерной конденсированной фазе, и оценено влияние примесных центров на кинетику рекомбинации носителей в ней.

Впервые продемонстрирована возможность выделения одиночного (квантового) излучателя, сформированного донорно-акцепторной парой в широкозонных полупроводниках, и исследованы свойства таких излучателей.

Впервые предложен и реализован метод квантового зондирования одиночных акцепторных центров в полупроводниковых гетероструктурах, основу которого составляет анализ свойств квантового излучателя, сформированного донорно-акцепторными парами с участием исследуемого акцепторного центра.

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

Впервые получен спектр ряда нететраэдрических акцепторов в кристаллическом теллуриде кадмия, возникающих вследствие взаимодействия примесей с собственными точечными дефектами и/или за счет понижения симметрии, вызванного эффектом Яна-Теллера. Обнаружен новый тетраэдрический акцептор в кристаллическом теллуриде кадмия с энергией основного состояния 97.9±0.6 мэВ.

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

Обнаружена новая люминесцентная система, возникающая в ZnSe за счет взаимодействия иона железа с собственным точечным дефектом цинковой подрешетки. Данная люминесцентная система позволяет реализовать простой оптический маркер собственных точечных дефектов в кристаллическом ZnSe, в том числе, применяемого для создания перестраиваемых лазеров среднего инфракрасного диапазона.

Впервые продемонстрировано, 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». Это позволило впервые зарегистрировать изолированные (квантовые) излучатели, представляющие собой локализованные экситонные состояния, сформированные ядром частичной дислокации.

Обнаружен новый тип изолированных (квантовых) излучателей, возникающих в результате прорастания 90˚ частичной дислокации через полупроводниковую квантовую яму. Установлено, что характерными чертами данных излучателей являются наличие узкого (<1 мэВ) бесфононного перехода, слабое взаимодействие с продольными оптическими фононами и заметная степень линейной поляризации, привязанная к одному из направлений семейства <110>.

Впервые реализовано адресное лазерное воздействие на протяженные дефекты в теллуриде кадмия, при котором не происходит заметных изменений в ненарушенной решетке. Индикатором движения дислокаций и/или перестройки их внутренней структуры в результате такого воздействия является изменение линейчатого спектра для ансамблей одиночных люминесцентных центров, формируемых фрагментами ядер частичных дислокаций.

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.

Проведено исследование спектров возбуждения низкотемпературной (5 К) фотолюминесценции GeV^- и GeV^0 центров в синтетических алмазах, легированных различными изотопами германия. Полученные в результате экспериментальные данные позволили продемонстрировать, что в процессе испускания кванта света переход центров окраски из возбужденного состояния в основное сопровождается существенным изменением жесткости химических связей в окрестности атома германия.

Практическая значимость

Исследование многочастичных взаимодействий в системе неравновесных носителей необходимо для получения новых экспериментальных данных о процессах излучательной и безызлучательной рекомбинации в вырожденной электронно-дырочной плазме, в том числе, находящейся в режиме квантового ограничения. В частности, 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.

Продемонстрированная в работе возможность регулярной регистрации изолированных (квантовых) излучателей, сформированных донорно-акцепторнымий парами и слабовозмущенными фрагментами ядер частичных дислокаций, открывает новые возможности для анализа примесно-дефектного фона в полупроводниковых гетероструктурах и полупроводниковых материалах со структурным беспорядком. В частности, люминесцентные центры, возникающие в результате пересечения

частичной дислокацией полупроводниковой квантовой ямы, могут представлять интерес для визуализации структурных нарушений в сложных полупроводниковых гетероструктурах, в том числе, использующихся при изготовлении современных лазеров и матричных детекторов. Представленные в диссертационном исследовании данные о дислокационной микрофотолюминесценции релаксированных пленок CdTe могут также представлять интерес при выборе подложек, подходящих для роста твердых растворов CdHgTe.

Развитая в диссертационном исследовании модуляционная спектроскопия и полученная с ее помощью информация об электронном спектре нететраэдрических акцепторов представляют интерес для совершенствования некоторых технологий на основе легированного теллурида кадмия. Практическая значимость данных технологий, в первую очередь, определяется возможностью создания высокоэффективных детекторов ионизирующих излучений и солнечных элементов. Полученные в работе данные о вакансионных комплексах с участием железа в кристаллическом ZnSe представляют интерес для разработки активных сред для перестраиваемых лазеров среднего инфракрасного диапазона.

Обнаруженный в диссертационном исследовании люминесцентный центр, формирующий бесфононный переход в районе 1.979 эВ, является одним из кандидатов на роль нейтрального вакансионного комплекса с участием германия GeV^0. Данный комплекс может представлять интерес для ряда приложений, связанных с однофотонными источниками и квантовой информатикой.

Методология и методы исследования

При постановке большинства реализованных в работе экспериментов использовалась современная методология, основу которой составляет объединение возможностей конфокальной микроскопии с различными методами низкотемпературной оптической спектроскопии – измерениями спектров фотолюминесценции, спектров возбуждения люминесценции,

комбинационного рассеяния света и отражения. Для анализа некоторых типов одиночных (квантовых) объектов, рассмотренных в диссертационном исследовании, был создан экспериментальный стенд, сочетающий субмикронное пространственное разрешение, спектральное разрешение порядка 1см$^{-1}$, возможность работы при гелиевых температурах с высокой чувствительностью регистрирующей системы и стабильностью регистрирующей оптики. Последние два условия играли ключевую роль ввиду необходимости регистрации ультраслабых световых сигналов, которые в некоторых экспериментах составляли 0.1-10 фотонов в секунду.

Для обеспечения стабильности регистрирующей оптики конфокальный объектив микроскопа и образец находились в гелиевом криостате и были жестко связаны друг с другом. Сканирование по объему образца осуществлялось внешним 4f-сканером – системой, которая контролируемым образом изменяет угол ввода/вывода и сходимость светового пучка перед объективом. В результате было достигнуто пространственное разрешение на уровне 1 мкм, точность позиционирования не хуже 0.1 мкм и предельно низкий дрейф анализируемой области на поверхности образца. В частности, за восьмичасовой цикл измерений дрейф анализируемой области (при фиксируемой температуре) не превышал 0.1 мкм.

Описанные выше особенности разработанного лабораторного микроскопа позволили зарегистрировать новые типы изолированных (квантовых) излучателей, исследовать их свойства и экспериментально реализовать концепцию «локального оптического зонда» [35-37]. А сочетание высокого пространственного и высокого спектрального разрешения с возможностью проведения экспериментов при низких температурах оказалось решающим в экспериментах по исследованию изотопических эффектов в нанокристаллах синтетического алмаза [38].

В работе также активно использовалось современное спектроскопическое оборудование, включающее стационарные и импульсные лазерные источники, спектрографы, детекторы излучения, оптические криостаты и др. В частности, для анализа

слабых световых сигналов в диапазоне 0.3-1.0 мкм использовался решеточный спектрограф, оснащенный охлаждаемой кремниевой матрицей. Сочетание высокой чувствительности регистрирующей системы с возможностью проведения измерений при гелиевых температурах, позволило впервые экспериментально зарегистрировать излучение двумерной электронно-дырочной жидкости, возникающее за счет одновременной рекомбинации двух электронно-дырочных пар [39, 40]. Данный тип рекомбинационного излучения сыграл решающее значение при идентификации механизмов многочастичных взаимодействий в полупроводниковых SiGe/Si квантовых ямах [40]. При переходе к более длинноволновым диапазонам регистрация излучения осуществлялась либо фотоумножителем (Hamamatsu 0.95-1.7 мкм), либо охлаждаемым диодом (Hamamatsu 1.5-2.3 мкм). Для обработки сигнала с фотоумножителя использовался режим счета фотонов с многостоповой системой регистрации. Регистрация слабых световых сигналов с временным разрешением без потери фотоотсчетов позволила детально исследовать динамику фазовых переходов «газ-жидкость» и «металл-диэлектрик» в 2D электронно-дырочной системе SiGe/Si квантовых ям [41].

В зависимости от поставленных задач, для возбуждения сигнала люминесценции/комбинационного рассеяния света применялись импульсные и стационарные одночастотные лазеры, в том числе перестраиваемые. В некоторых случаях для сканирования по длине волны возбуждения в широком спектральном диапазоне применялся решеточный монохроматор, оснащенный галогеновой лампой или GaN светодиодом. Особенности выбранных источников возбуждения в сочетании с многоканальной системой регистрации позволили впервые реализовать разностную спектроскопию примесно-дефектных состояний в компенсированных полупроводниках [42]. Данный подход, использующий модуляцию длины волны возбуждения, обеспечил уверенное выделение слабого сигнала селективной люминесценции донорно-акцепторных пар фиксированного размера (расстояние между донором и акцептором) при наличии интенсивной фоновой люминесценции. Полученные экспериментальные данные в сочетании с расчётами в приближении

огибающей волновой функции позволили установить структуру возбужденных состояний для ряда нететраэдрических акцепторов в полупроводниках группы A_2B_6 и определить роль симметрии при формировании спектра акцепторных состояний.

В работе исследовался ряд современных полупроводниковых материалов, включающих полупроводниковые гетероструктуры, моно- и поликристаллы, синтетические алмазы и др. При исследовании многочастичных взаимодействий в неравновесной электронно-дырочной системе основной упор был сделан на кремний-германиевые гетероструктуры полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (ИФМ РАН). Для исследования явлений, связанных с примесями и собственными дефектами, использовались гетероструктуры A_2B_6, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (ИФТТ СО РАН, ФТИ им. Иоффе), объемные полупроводники, выращенные из паровой фазы (ФИАН) и модифицированным методом Бриджмана (АО Гиредмед). Также, исследовались поликристаллические материалы, полученные в ФИАН с применением оригинальной технологии синтеза в сильно неравновесных условиях [43]. При исследовании синтетических алмазов основной упор был сделан на CVD технологии (ИОФ РАН) или алмазах, синтезированных при высоких давлениях (ИФВД РАН). Для анализа структурных свойств исследуемых материалов применялось рентгеновская дифрактометрия, электронная микроскопия и атомно-силовая микроскопия.

Положения, выносимые на защиту

1. Основным состоянием электронно-дырочной системы $Si_{1-x}Ge_x/Si$ квантовых ям шириной 5 нм и содержанием германия менее $x < 10$ % является двумерная конденсированная фаза металлического типа. Данная фаза является двухкомпонентной (электроны и легкие дырки) при $5\% < x < 10\%$ и становится трехкомпонентной (электроны, легкие дырки и тяжелые дырки) при $x < 5\%$. При содержании германия $x > 10\%$ основным состоянием электронно-дырочной системы являются биэкситоны.

Двумерная конденсированная фаза в $Si_{1-x}Ge_x/Si$ квантовых ямах излучает в видимом диапазоне спектра (2.2-2.3 эВ). Соответствующие излучение возникает в результате процессов при которых после аннигиляции двух электронно-дырочных пар энергия и импульс передаются одному кванту света.

2. 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. На основе данных излучателей предложен бесконтактный метод исследования одиночных акцепторных (донорных) центров в полупроводниковых гетероструктурах, при котором оптический доступ к электронной подсистеме центра осуществляется за счет выделения одиночной донорно-акцепторной пары, сформированной данным центром и водородоподобным донором (акцептором).

3. Разностный сигнал низкотемпературной фотолюминесценции $I(\lambda+\delta\lambda)-I(\lambda-\delta\lambda)$, полученный при возбуждении объемного полупроводника излучением с двумя близкими длинами волн $\lambda+\delta\lambda$ и $\lambda-\delta\lambda$, обеспечивает выделение селективной люминесценции донорно-акцепторных пар на фоне других механизмов излучательной рекомбинации. Зависимость данного сигнала от центральной длины волны возбуждающего излучения (λ), позволяет восстановить спектр связанных состояний, формируемых донорными и/или акцепторными центрами в сильно легированных полупроводниках.

4. Серия уровней, формируемых в запрещенной зоне CdTe комплексным акцептором Cl_{Te}-V_{Cd}, возникает за счет расщепления/сдвига тетраэдрических состояний водородоподобного центра короткодействующим притягивающим потенциалом, имеющим аксиальную симметрию. Серия уровней, формируемых в запрещенной зоне CdTe ян-теллеровским центром Bi_{Cd}, возникает за счет расщепления/сдвига тетраэдрических состояний водородоподобного акцептора короткодействующим отталкивающим потенциалом с низкой симметрией.

5. Спектры селективной фотолюминесценции ансамбля донорно-акцепторных пар в полупроводниках со структурой цинковой обманки позволяют без внешнего поля регистрировать понижение симметрии акцепторов, вызванное их составной структурой и/или дисторсией Яна-Теллера.

6. Комплекс ближнего порядка с участием иона железа и собственного дефекта цинковой подрешетки формирует в ZnSe внутрицентровый переход с бесфононной линией 0.681 эВ и серией фононных повторений. Данная люминесцентная система является оптическим маркером собственных точечных дефектов в кристаллическом ZnSe.

7. 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 проявляются в виде изолированных (квантовых) излучателей, характеризующихся узкой линией излучения, высокой ~1:10 степенью линейной поляризации и слабой связью с решеткой через фрелиховский механизм электрон-фононного взаимодействия.

8. В результате прорастания 90° частичной дислокации через полупроводниковую квантовую яму возникают яркие излучатели, которые могут анализироваться как одиночные объекты в экспериментах по измерению низкотемпературной микрофотолюминесценции. Характерными чертами данных излучателей являются наличие узкого (< 1мэВ) бесфононного перехода, слабое взаимодействие с продольными оптическими фононами и заметная степень линейной поляризации, привязанная к одному из направлений семейства <110>. Обнаруженные излучатели позволяют визуализировать отдельные дислокации в гетероструктурах с квантовыми ямами.

9. 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.

10. В синтетических НТНР алмазах, легированных германием, возникает новый люминесцентный центр с бесфононной линией 1.979 эВ. При гелиевых температурах изменение изотопического состава легирующего германия приводит к изотопическому сдвигу 0.052 ± 0.001 мэВ/а.е.м.

Степень достоверности результатов

Для получения экспериментальных данных и их интерпретации был использован целый ряд как хорошо известных, так и развитых в ходе выполнения работы 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, подтверждёнными другими группами.

Аапробация результатов

Положения диссертационного исследования, выносимые на защиту, были представлены в виде устных докладов и стендовых сообщений на следующих российских и международных конференциях:

XIV международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2010), VII международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2010), XIII школа молодых ученых

“Актуальные проблемы физики” (Звенигород – Москва, Российская Федерация, 2010), XV международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2011), X Российская конференция по физике полупроводников (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2011), XVI международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2012), XIV школа молодых ученых “Актуальные проблемы физики” (Звенигород, Российская Федерация, 2012), 20th International Symposium «Nanostructures: Physics and Technology» (Nizhny Novgorod, Russian Federation, 2012), 20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20) and 16th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS-16) (Wroclaw, Poland, 2013), XVII международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2013), XI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2013), Российская молодежная конференция по физике и астрономии (Санкт-Петербург, Российская Федерация, 2013), 5-ая Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» (Москва, Российская Федерация, 2013), XVIII международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2014), 22th International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology” (Saint-Petersburg, Russian Federation, 2014), XV школа молодых ученых “Актуальные проблемы физики” (Москва, Российская Федерация, 2014), XIX международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2015), Всероссийская конференция “Импульсная сильноточная и полупроводниковая электроника” (Москва, Российская федерация, 2015), 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials (Paris, France, 2015), XII Российская конференция по физике полупроводников (Ершово, Российская федерация, 2015), VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, Российская Федерация, 2015), XX международный симпозиум «Нанофизика и

наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2016), Вторая всероссийская конференция “Импульсная сильноточная и полупроводниковая электроника” (Москва, Российская Федерация, 2016), 13th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors (Dortmund, Germany, 2016), XXI международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2017), 8-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, Российская Федерация, 2017), XIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, Российская Федерация, 2017), III всероссийская конференция “Импульсная сильноточная и полупроводниковая электроника” (Москва, Российская Федерация, 2017), Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (Новосибирск, Российская Федерация, 2017), XXII международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2018), XXV Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, Российская Федерация, 2018), 61 Всероссийская научная конференция МФТИ (Троицк, Российская Федерация, 2018), XXIII международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2019), Школа молодых ученых “Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике” БПИО-2019 (Москва, Российская Федерация, 2019), XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, Российская Федерация, 2019), International Congress on Ultrasonics (Bruges, Belgium, 2019), XXIV международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2020), 11−я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ- электроники «Мокеровские чтения» (Москва, Российская Федерация, 2020), Школа молодых ученых “Быстропротекающие электровзрывные, электронные и

электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике" БПИО-2020 (Москва, Российская Федерация, 2020), XXV международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2021), 17th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (Dortmund, Germany, 2021), XXVI международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, Российская Федерация, 2022)

Основные научные результаты диссертации изложены в 49 статьях, опубликованных в рецензируемых изданиях индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, включая 31 публикацию за последние 10 лет (2012-2022 гг.) в научных изданиях первого и второго квартилей (Q1 и Q2, соответственно). Список статей, входящих в состав по диссертации, приведен на стр. 62-70.

Личный вклад автора

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

При исследовании примесно-дефектных состояний и многочастичных взаимодействий в неравновесной электронно-дырочной системе полупроводниковых гетероструктур (см. A1-A16, A18-A24, A26-A28, A30-A34, A36-A42, A44-A50) вклад диссертанта заключается в постановке задач, обработке, анализе и интерпретации представленных спектроскопических данных, а также в постановке и проведении низкотемпературных экспериментов. Большинство гетероструктур, отобранных для исследований многочастичных взаимодействий, было выращено группой А.В. Новикова в Институте физики микроструктур РАН. Дизайн гетероструктур был разработан автором диссертации. Для исследования примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах, исходя из

конкретных задач, автором были выбраны объемные кристаллы и/или гетероструктуры, выращиваемые различными группами в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН и АО НПО «Гиредмет». В ряде случаев дизайн образцов корректировался автором исходя из промежуточных результатов. При исследовании алмазов (см. A17, A26, A29, A35, A43) вклад диссертанта заключался в формулировке задач для низкотемпературного оптического эксперимента, его реализации, а также обработке, анализе и интерпретации полученных спектроскопических данных. Кристаллы алмазов для данных исследований были выращены группой В.А. Седова (Институт общей физики РАН) и Е.А. Екимова (Институт физики высоких давлений РАН).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В соответствии с задачами диссертационной работы ее основное содержание включает три связанных друг с другом блока, в которых методы низкотемпературной оптической спектроскопии применяются для исследования собственных и примесно-дефектных состояний в ряде полупроводниковых материалов. Первый блок направлен на исследование многочастичных взаимодействий в неравновесной электронно-дырочной системе полупроводниковых гетероструктур [39-41, 44-55]. В качестве основного объекта исследования были выбраны кремний-германиевые (SiGe/Si) квантовые ямы (КЯ). Это связано с тем, что данные гетероструктуры характеризуются большими временами жизни электронов и дырок, в результате состояние электронно-дырочной системы в целом оказывается близким к термодинамическому равновесию. Данная особенность позволила обнаружить экзотические многочастичные состояния, такие как двумерная конденсированная фаза. Следующий блок [35, 37, 42, 43, 56-81] посвящен исследованию примесно-дефектных состояний в полупроводниковых системах с беспорядком. Развитый в данном блоке подход, в основном, эксплуатирует идею «оптического зондирования», которая подразумевает оптический доступ к электронной подсистеме одиночных дефектов или донорно-акцепторных пар (ДАП). Данный подход позволил впервые детально исследовать электронный спектр ряда нететраэдрических дефектов [42, 61] и пронаблюдать фазовый переход в электронно-дырочной системе дислокационного ядра [37]. В третьем блоке [82-85] 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.

1. Экситонные комплексы и электронно-дырочная жидкость в кремний-германиевых гетероструктурах

Принципиальное существование квазидвумерной (2D) электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) в $Si_{1-x}Ge_x/Si$ КЯ с содержанием германия x = 5% было продемонстрировано в работах [39, 40]. Для этого использовались измерения стационарной люминесценции и измерения кинетики люминесценции при гелиевых температурах, см. рис. 1. В этой же работе впервые продемонстрировано, что формирование двумерной конденсированной фазы в $Si_{1-x}Ge_x/Si$ КЯ сопровождается появлением нестандартного рекомбинационного излучения, при котором после аннигиляции двух электронно-дырочных пар энергия и импульс передаются одному кванту света, см. панель (b) на рис. 1. Впоследствии это излучение активно использовалось для изучения различных свойств 2D ЭДЖ [45, 49, 52, 54]. Возможность наблюдения аналогичных процессов излучательной рекомбинации в других полупроводниковых системах обсуждается в работе [53].

Позднее в работе [41] в условиях импульсного возбуждения гетероструктур с КЯ $Si_{1-x}Ge_x/Si$ была детально исследована динамика фазового перехода «электронно-дырочная плазма-экситонный газ». Показано, что сценарий фазового перехода радикально зависит от содержания германия в слое $Si_{1-x}Ge_x$. Для КЯ с содержанием германия x=3.5-5 % во временном диапазоне примерно 100-500 нс после возбуждающего импульса регистрируется расслоение электронно-дырочной системы на разреженную экситонную и плотную плазменную фазы. В данном случае существующая в КЯ электронно-дырочная плазма обладает всеми признаками ЭДЖ. Качественно иная картина фазового перехода наблюдается для КЯ с x=9.6 %, где расслоение на фазы с разным электронным спектром не регистрировалось.

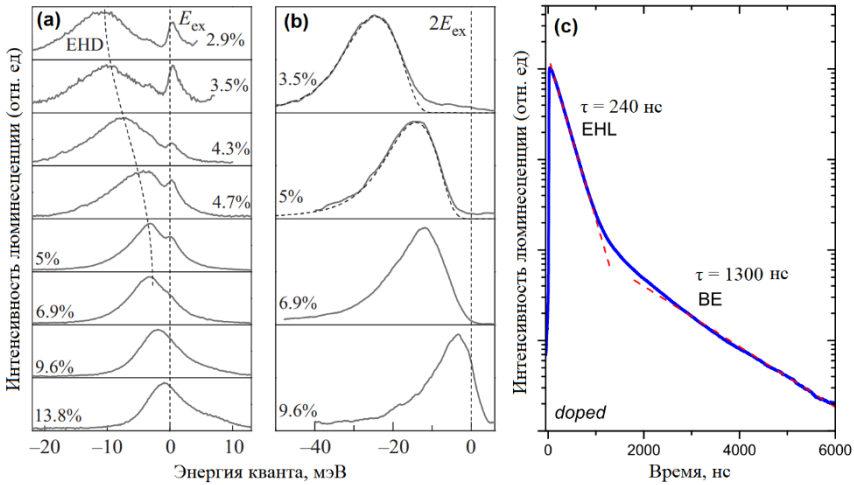

Рис. 1. Спектры низкотемпературной ФЛ КЯ $Si_{1-x}Ge_x$/Si с различным содержанием германия, отложенные от энергетического положения дна экситонной зоны E_{ex}. (a) – область ТО фононного повторения ИК люминесценции при температуре 10 К и плотности возбуждения W=0.2 Вт/см^2. В КЯ с содержанием германия x=6.9% и ниже в спектре появляется тонкая структура, связанная с сосуществованием в КЯ экситонов и ЭДЖ; (b) излучение ЭДЖ в видимом диапазоне при температуре T=2 K и W=2 Вт/см^2. Пунктирная кривая – аппроксимация экспериментальных данных в рамках модели 2D ЭДЖ. Сдвиг между вертикальной полосой и коротковолновым краем линии излучения соответствует удвоенной работе выхода e-h пары из ЭДЖ; (c) - затухание сигнала низкотемпературной ФЛ в КЯ $Si_{1-x}Ge_x$/Si с x=4.5% с δ-слоем ($n_B=10^{10}$ см$^{-2}$) бора в центре; τ=240 нс соответствует времени жизни носителей в 2D ЭДЖ, τ=1300 нс – времени жизни экситона связанного на приме бора.

Рекомбинация носителей в электронно-дырочной плазме приводила к постепенному ослаблению экранирования и появлению экситонных состояний. При содержании германия 5-7 % сценарий фазового перехода носит двоякий характер: примерно через 20-250 нс после импульса возбуждения свойства электронно-дырочной

системы описываются в рамках представлений об однородной электронно-дырочной плазме, в то время как примерно через 350 нс регистрируется расслоение на ЭДЖ и экситонный газ. Было также установлено, что для существования ЭДЖ в КЯ с содержанием германия x = 5-7 % необходим экситонный газ существенно большей плотности, чем в КЯ с x = 3.5 %. Данное наблюдение согласуется с уменьшением глубины локального минимума энергии электронно-дырочной плазмы при увеличении концентрации германия в слое SiGe. Кроме того, возрастание плотности экситонного газа, сосуществующего с ЭДЖ, способствует увеличению роли многочастичных состояний, предположительно трионов T^+ и биэкситонов, в экситонном газе.

Влияние примесей на свойства конденсированной фазы исследовалось в работе [46]. Для этого были измерены зависимости спектров низкотемпературной (5 К) фотолюминесценции (ФЛ), нелегированных и умеренно δ-легированных КЯ $Si_{1-x}Ge_x/Si$ ($x < 0.1$) от температуры и плотности мощности возбуждения. Пример затухания сигнала ФЛ приведен на рис. 1с. Таким образом, было продемонстрировано влияние δ-слоя бора на экситонную люминесценцию и люминесценцию, вызванную плотной электронной плазмой. Установлены условия, при которых в спектрах ФЛ КЯ преобладает экситонное излучение или излучение 2D ЭДЖ. Некоторые необычные свойства экситонов, связанных на примеси в КЯ, были объяснены разрывом зон II-го рода, который способствует пространственному разделению электронов и дырок. Показано, что температурная зависимость экситонного излучения в КЯ позволяет рассчитать плотность состояний, связанную с экситонами, и таким образом, может быть использована для бесконтактной оценки концентрации примеси в слое $Si_{1-x}Ge_x/Si$. В этой же работе определено влияние δ-легирования на свойства 2D ЭДЖ и показано, что при двумерной концентрации бора 10^{10}см$^{-2}$ (δ-слой в центре КЯ) время жизни носителей в ЭДЖ уменьшается с 250 нс до 240 нс.

В работе [51] исследовано динамическое поведение спектров низкотемпературной ФЛ гетероструктур $Si/Si_{1-x}Ge_x/Si$ ($x=0.045$) при прохождении через них баллистических (неравновесных) фононов. Обнаружено быстрое испарение ЭДЖ в КЯ структуры, вызванное

нагревом ЭДЖ неравновесными фононами, см. рис. 2. Установлено, что возрастание плотности экситонного газа в КЯ связано с испарением ЭДЖ и увеличением скорости захвата экситонов в КЯ. Показано, что взаимодействие с фононами теплового импульса приводит к диссоциации экситонно-примесных комплексов в кремниевых слоях, сопровождающейся увеличением концентрации и времени жизни экситонов.

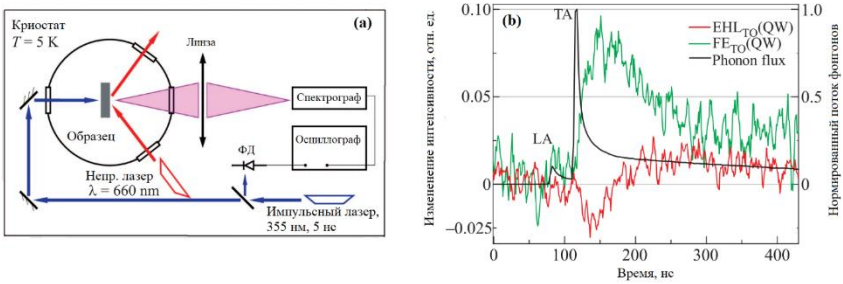

Рис. 2. Воздействие на 2D ЭДЖ импульсами неравновесных фононов. (a) – схема экспериментальной установки. (b) испарение ЭДЖ в экситонный газ под воздействием импульсов баллистических фононов, зарегистрированное с помощью измерений кинетики люминесценции. $EHL_{TO}(QW)$ – ТО компонента линии излучения 2D конденсированной фазы, $FE_{TO}(QW)$ – ТО компонента линии излучения свободных экситонов в КЯ. Температура 5 К.

В работе [48] на основе измерений стационарной и разрешенной по времени ФЛ исследованы свойства экситонного газа в КЯ $Si_{0.905}Ge_{0.095}/Si$ толщиной 5 нм. В этом случае образование 2D ЭДЖ зарегистрировано не было. Тем не менее, несмотря на наличие барьера для электронов в слое $Si_{0.905}Ge_{0.095}$, при низких температурах энергетически наиболее выгодным состоянием электронно-дырочной системы оказался пространственно-непрямой биэкситон. Такой биэкситон, характеризующийся временем жизни около 1100 нс и энергией связи около 2.0-2.5 мэВ, состоит из двух дырок, локализованных в слое $Si_{0.905}Ge_{0.095}$, и двух электронов, преимущественно локализованных в кремнии. Формирование биэкситонов определяло спектры низкотемпературной ФЛ для широкого диапазона плотностей возбуждения и не позволяло

получить газ экситонов, в котором существенны эффекты квантовой статистики. Из-за высокой степени вырождения биэкситонных состояний (28) и сравнительно большой эффективной массы (около $1.3m_e$) экспериментальное наблюдение бозе-статистики для биэкситонного газа возможно лишь при температурах около 1 K и ниже. При таких температурах тепловая энергия много меньше измеренной энергии локализации (около 1 мэВ) на флуктуациях потенциала. Это приводит к локализации биэкситонов и накладывает принципиальные ограничения на возможность наблюдения квантовой когерентности в биэкситонном газе. Качественные исследования низкотемпературной ФЛ более глубоких КЯ $Si_{1-x}Ge_x/Si$ были проведены в работе [55].

В работе [49] экспериментально обнаружена тонкая структура спектра излучения 2D ЭДЖ в мелких $Si_{1-x}Ge_x/Si$ КЯ. Данную тонкую структуру удалось объяснить на основе представлений о скачках в плотности состояний (аналог сингулярности Ван Хова), возникающих за счёт сосуществования в ЭДЖ легких и тяжелых дырок, и о взаимодействии носителей заряда с колебаниями зарядовой плотности в ЭДЖ. Позднее в работе [54] была экспериментально продемонстрирована модификация свойств ЭДЖ, которая может быть интерпретирована как смена главного минимума в результате возрастания концентрации германия в слое $Si_{1-x}Ge_x/Si$. В данной работе сделан вывод о том, что ЭДЖ является двухкомпонентной (электроны и легкие дырки) при $5\% < x < 9\%$ и становится трёхкомпонентной (электроны, легкие дырки и тяжелые дырки) при $x < 5\%$.

В работе [50] исследовано влияние золотых наночастиц на спектры низкотемпературной ФЛ SiGe гетероструктур с тонким покровным слоем кремния. Регистрация излучения биэкситонов и ЭДЖ, локализованных в КЯ $Si_{0.95}Ge_{0.05}/Si$, проводилась в видимой и ближней ИК областях спектра из двух различных областей, расположенных на внешней поверхности образца: 1) области без наночастиц и 2) области, покрытой частицами золота с регулируемой поверхностной плотностью. В результате было обнаружено значительное плазмонное усиление частицами золота интенсивности коллективных излучательных процессов, при которых в результате

четырехчастичной рекомбинации двух дырок с двумя электронами в КЯ из симметрично расположенных электронных долин зоны проводимости энергия полностью передается одному кванту света видимого диапазона. Иначе говоря, было показано, что многочастичная излучательная рекомбинация в ЭДЖ может быть усилена при наличии ближнепольной связи с плазмонным резонатором.

В работе [45] обсуждается возможность формирования состояний, обладающих сверхизлучающими свойствами, в вырожденном экситонном газе полупроводников с непрямым краем собственного поглощения. Соответствующее сверхизлучение, в принципе, может возникать за счет процессов четырехчастичной рекомбинации и соответствует энергиям кванта, примерно вдвое превышающих ширину запрещенной зоны. Представлены экспериментальные данные, указывающие на возможность существования сверхизлучения для $Si_{1-x}Ge_x/Si$ КЯ.

В работе [52] впервые проведено исследование влияния внешней анизотропной деформации на спектры ИК- и видимой ФЛ гетероструктур с КЯ $Si_{1-x}Ge_x/Si$ при гелиевых температурах. Показано, что при температуре T = 5 K растяжение слоя SiGe вдоль направления [100] приводит к усилению относительной интенсивности излучения в видимой области спектра в 7/3~2.3 раза. Этот эффект отсутствует при растяжении вдоль направления [110]. Дано объяснение данного явления на основе представлений о "светлых" и "темных" состояниях биэкситонов при многочастичной рекомбинации. При температуре 2 K относительная интенсивность видимой ФЛ при растяжении увеличивается в 3.4-3.9 раза, что может указывать либо на расщепление основного состояния биэкситонов с различной электронной конфигурацией, либо на вырождение их функции распределения.

2. Оптическое зондирование точечных и протяженных дефектов

При исследовании примесно-дефектных состояний в полупроводниковых материалах с беспорядком автором было

применено два основных подхода, первый из которых подразумевает получение оптического доступа к одиночным объектам, а второй – выделение набора объектов с определенными свойствами из макроскопического ансамбля с помощью методов разностной спектроскопии. Первый подход оказался эффективен при исследовании полупроводниковых гетероструктур и протяженных дефектов, второй позволил получить новые данные о комплексных дефектах и ян-теллеровских центрах в легированных объемных полупроводниках.

В работе [57] методами оптической спектроскопии, основанными на селективном возбуждении ФЛ, проведено детальное исследование электронного спектра донорных и акцепторных центров характерных для компенсированного теллурида кадмия (CdTe). Процесс самокомпенсации является фундаментальным свойством некоторых материалов, включая CdTe, и представляет собой неустойчивость кристаллической решетки и/или картины связей формируемой легирующим элементов при заметном увеличении или уменьшении уровня Ферми. Исследованные в работе кристаллы были получены с помощью синтеза из паровой фазы при значительном отклонении от термодинамического равновесия (быстрая кристаллизация). Использование нелегированных кристаллов, обладающих высокой степенью компенсации, позволило анализировать электронные состояния дефектов при их сравнительно небольших концентрациях и избежать искажений спектра, связанных с взаимодействием близкорасположенных центров. Таким образом, впервые был получен спектр возбужденных состояний для компенсирующих акцепторов связанных с неустойчивостями решетки n-CdTe. Восстановление электронного спектра данных центров позволило, в том числе, сделать выводы об их симметрии.

Было установлено, что в кристаллах, полученных с использованием быстрой кристаллизации, присутствует два типа донорных центров и пять типов акцепторных центров. Доноры являются стандартными фоновыми примесями кадмиевой (Ga_{Cd}) и теллуровой (Cl_{Te}) подрешеток, при этом концентрация галлия заметно превалировала. Данный результат был получен на основе

измерений спектров резонансного рассеяния света при низких температурах. Для акцепторов наблюдалась качественно иная картина, так как только два (Li_{Cd} и Na_{Cd}) из пяти типов акцепторов определялись фоновыми примесями замещения. Доминирующие акцепторы имели энергии основного состояния 48.2±0.4 мэВ, 97.9±0.6 мэВ, 119.7±1.0 мэВ (А-центр), соответственно, нехарактерные для известных примесей замещения в CdTe. Структура возбужденных состояний, наблюдаемая для акцепторов с энергией основного состояния 48.2±0.4 мэВ, 119.7±1.0 мэВ свидетельствовала о понижении симметрии у данных центров. Это проявлялось в нестандартной конфигурации уровней (не описывается водородоподобной моделью с короткодействующей поправкой на центральную ячейку) и расщеплением уровней которые у тераэдрических (T_D) акцепторов вырождены. В то же время, структура возбужденных уровней для акцептора с энергией основного состояния 97.9±0.6 мэВ соответствовала центру с тетраэдрической координацией. Об этом, в частности, свидетельствовало наличие вырожденных состояний $2S^{3/2}$ (Γ_8) и $2P^{3/2}$ (Γ_8). Таким образом, удалось обнаружить новый тетраэдрический акцептор в кристаллическом CdTe. Появление нового акцептора определяется, по-видимому, использованием сильно неравновесных процессов роста, которые позволяют увеличить вероятность вхождения в решетку нестандартных для CdTe примесей. Свойства ДАП при низких температурах в других кристаллах с кубической сингонией и слоистых материалах также обсуждались автором в работах [75, 78].

Использование разностной спектроскопии позволило расширить описанный выше подход и применить его для исследования дефектов компенсации в сильно легированных полупроводниках, полученных стандартными методами. Так, в работе [61] для исследования акцепторных состояний в монокристаллах CdTe:Cl была применена методика, основанная на получении разностного сигнала селективной ФЛ ДАП. Спектроскопическую схему разработанного метода иллюстрирует рис. 3а. Модуляция длины волны источника возбуждения в сочетании с анализом дифференциального сигнала ФЛ

использовалась для выявления узких спектральных линий, скрытых из-за неоднородного уширения полос и/или переноса возбуждения для селективно возбужденных ДАП.

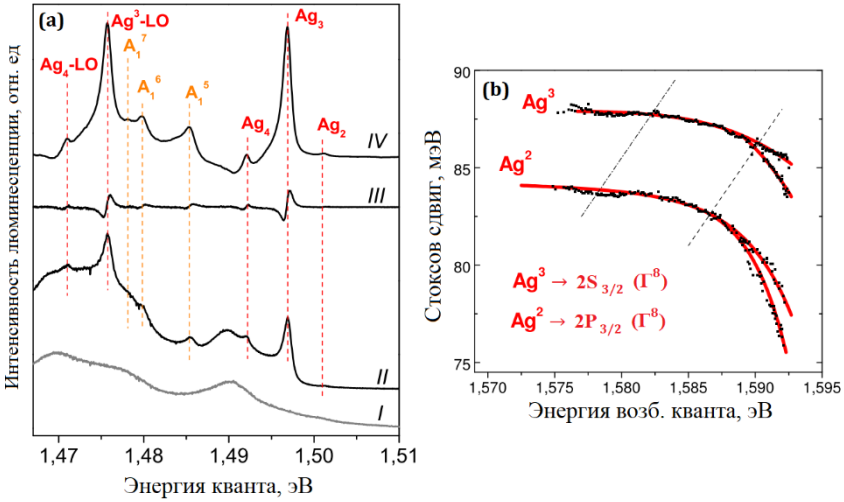

Рис. 3. (a) Выделение разностного сигнала селективной люминесценции ДАП в CdTe. Кривая I – спектр ФЛ при возбуждении CdTe выше каря фундаментального поглощения; (II) – Спектр селективной ФЛ при возбуждении квантами 1.5844 эВ; (III) – разностный сигнал селективной ФЛ $I(w_{ex}+dw, w_{lum})$-$I(w_{ex}, w_{lum})$ полученный при $\hbar w_{ex}$ = 1.5844 эВ, $\hbar dw$ =0.1 мэВ. (IV) – Разностный сигнал после интегрирования. (b) Наблюдение расщепления для состояний $2S_{3/2}(\Gamma_8)$ и $2P_{3/2}(\Gamma_8)$ акцептора Ag_{Cd} в CdTe с помощью разностных измерений. Штрихпунктирная и пунктирная линии соответствует излучению ДАП с расстоянием между донором и акцептором 14 нм и 7 нм, соответственно. Все эксперименты выполнены при температуре 2 К.

В работе [42] были проведены комплексные исследования акцепторных центров описанным методом. Объектами исследования были легированные монокристаллы CdTe:Cl, CdTe:Ag, Cl и CdTe:Bi,Cl. Не смотря на высокий уровень легирования, применение упомянутой выше разностной методики позволило измерить энергии четырех возбужденных уровней для известного тетраэдрического

акцептора Ag_{Cd}. Полученные значения полностью согласуются с экспериментальными данными других групп. Но за счет того, что концентрации донорной примеси были на 2-4 порядка выше, удалось впервые экспериментально пронаблюдать, расщепление вырожденных состояний $2P_{3/2}(\Gamma_8)$ и $2S_{3/2}(\Gamma_8)$ Ag_{Cd}, расположенных на небольшом расстоянии (5–7 нм) от водородоподобного донора (Cl_{Te}), см. рис 3b. Это расщепление является результатом понижения T_D симметрии, возникающего за счет того, что акцептор входит в состав ДАП малого размера (близко расположен донорный центр).

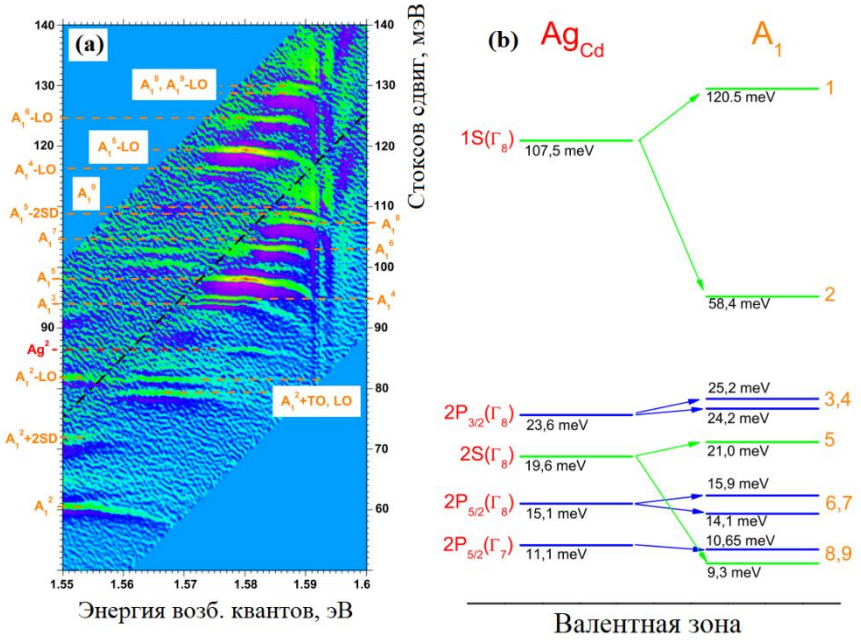

Рис. 4. (a) Карта разностного сигнала селективной люминесценции для CdTe:Cl при температуре 5 K. По оси абсцисс отложена энергия возбуждающих квантов, по оси ординат – стоксов сдвиг сателлитов селективной люминесценции. Пунктирными линиями обозначены сателлиты, соответствующие ДАП с участием комплексного акцептора V_{Cd}-Cl_{Te}. Штрихпунктирная линия обозначает красную границу линии излучения для данных ДАП. (b) Спектр возбужденных состояний для тетраэдрического акцептора

Ag_{Cd} и комплексного акцептора V_{Cd}-Cl_{Te} полученный с помощью разностного метода.

Для комплексного акцептора с энергией основного состояния ~121 мэВ (А-центр), возникающего при легировании CdTe хлором, разностные измерения позволили определить энергии восьми возбужденных состояний, см. рис. 4. Было установлено, что данный дефект формирует низкосимметричный короткодействующий потенциал, приводящий к сильному расщеплению S-подобных T_D-оболочек. Низкосимметричный короткодействующий потенциал является естественным следствием природы дефекта, который представляет собой комплекс вакансия – донор (Cl_{Te}-V_{Cd}). Энергии уровней в запрещенной зоне CdTe формируемые данным акцептором - 120.5 мэВ, 58.4 мэВ, 25.2 мэВ, 24.2 мэВ, 21.0 15.9 мэВ, 14.1 мэВ, 10.65 мэВ, 9.3 мэВ.

Также был измерен энергетический спектр связанного с Bi мелкого акцептора, который согласно ab-initio расчетам является ян-теллеровским центром. Было установлено, что данный центр характеризуется следующим набором уровней над потолком валентной зоны - 36 мэВ (основное), 24.5 мэВ, 20.4 мэВ, 18.1 мэВ, 17.6 мэВ, 15.8 мэВ, 13.0 мэВ, 11.1 мэВ, 9.7 мэВ. Полученный спектр радикально отличается от водородоподобного набора уровней. Структура уровней указывает на существование отталкивающего низкосимметричного возмущения вблизи центральной ячейки. Полученные экспериментальные данные в сочетании с результатами ab-initio расчетов позволили отождествить акцептор с примесью Bi на Cd подрешетке (Bi_{Cd}) координация которой имеет низкую симметрию вследствие дисторсии Яна-Теллера.

Комплекс результатов, полученных в [42, 61, 65, 66], наглядно демонстрирует, что анализ разностного сигнала селективной ФЛ ансамбля ДАП в полупроводниках со структурой цинковой обманки позволяет без внешнего поля регистрировать понижение симметрии акцепторов, вызванное их составной структурой и/или дисторсией Яна-Теллера. Признаком высокой (T_D) симметрии является расщепление сателлитов селективной ФЛ по мере уменьшения расстояния между донором и акцептором в паре. Отсутствие

расщепления является индикатором низкой симметрии акцепторного центра.

Для исследования собственных точечных дефектов в легированных (объемных) полупроводниках автором был апробирован несколько иной подход. Как известно, примеси переходных элементов формируют в кристаллической матрице люминесцентные центры за счет расщепления внутренних d или f оболочек кристаллическим полем. Так как картина расщепления внутренних оболочек зависит от ближайшего окружения переходного элемента, последние могут играть роль «оптических зондов» для визуализации собственных точечных дефектов. В работе [36] эта идеология была реализована экспериментально - был обнаружен новый люминесцентный центр с узкой линией излучения на 0.681 эВ в легированном железом ZnSe при низких температурах. Помимо основной линии излучения отчетливо наблюдались сателлитный пик с максимумом при 0.683 эВ и вибронная полоса, характерная для внутрицентровых переходов. Пространственное распределение сигнала люминесценции (0.681 эВ) коррелировало с известным ($^5T_2 \rightarrow {}^5E$) профилем люминесценции железа, но обнаруженный центр не наблюдался в образцах, полученных легированием железом в атмосфере цинка. Таким образом, полученные данные указывают на наличие излучающего комплексного дефекта, состоящего из вакансии цинка и иона железа. Данный вывод был подтвержден ab-initio расчетами – линия излучения в районе 0.681 эВ была приписана внутрицентровому переходу в основном спиновом канале иона Fe, связанного с вакансией Zn. Обнаруженный комплекс может быть использован в качестве «оптического зонда» собственных точечных дефектов в кристаллическом ZnSe:Fe. Свойствам других дефектов, возникающих при легировании ZnSe примесью Fe, посвящена работа [74]. Изменение структуры внутрицентровых переходов также обсуждалось применительно к оптическим свойствам кластеров редкоземельных элементов, внедренных в алмазную решетку [81].

Отдельное внимание было уделено адаптации спектроскопии, основанной на выделении «парных объектов» для исследования донорных и акцепторных центров в полупроводниковых КЯ. Как уже

отмечалось во введении, исследования различных свойств примесей в КЯ заметно осложняется (1) их расположением по отношению к интерфейсам и (2) структурными свойствами самого интерфейса, который может размываться из-за диффузии компонент и/или иметь неоднородное латеральное строение [58-60, 62]. По этой причине в полупроводниковых гетероструктурах анализ макроскопического ансамбля оказываются менее информативными для получения каких-либо определенных свойств легирующих примесей. Таким образом, оптические методы, оперирующие с одиночными объектами, оказываются более востребованными.

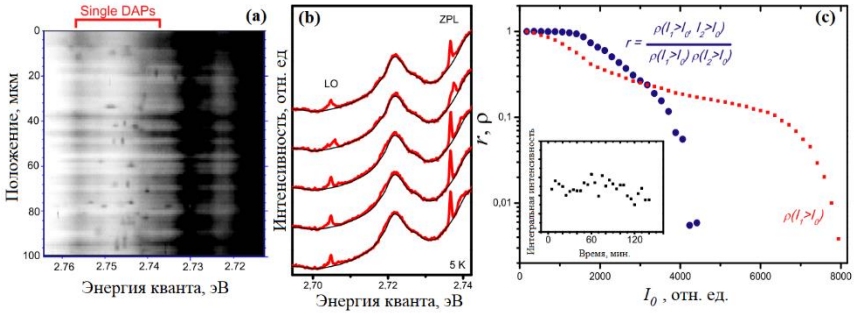

Рис. 5. Свойства излучателей, формируемых одиночными ДАП с участием водородоподобного донора и мелкого акцептора в КЯ ZnSe/ZnMgSSe. a) Изображение с CCD камеры, иллюстрирующее характерный пример ансамбля ДАП, расположенного в области с латеральным размером 1 × 100 мкм. b) Спектры излучения одиночной ДАП. Черная линия соответствует люминесцентному фону, который не меняется с течением времени. c) Антикорреляция узких пиков, соответствующих тонкой структуре линии ДАП на панели (b): Красные круги – вероятность (ρ) обнаружить сигнал с интенсивностью большей I_0 в случайном спектральном окне шириной 1 мэВ, синие круги – коэффициент (r) соответствующий вероятности обнаружить сигнал с интенсивностью, превышающей I_0 в двух неперекрывающихся спектральных окнах шириной 1 мэВ. Вставка на панели (c) показывает зависимость интегральной интенсивности одиночной ДАП на панели (b) от времени.

В работах [67,73] на основе измерений низкотемпературной микрофотолюминесценции (МФЛ) в гетероструктуре с широкой КЯ

ZnSe/ZnMgSSe было продемонстрировано существование изолированных (одиночных) дефектов, линии излучения которых претерпевают скачкообразное изменение спектрального положения на несколько мэВ в течение времени порядка 1-10 мин, см. рис. 5. Нестандартные свойства обнаруженных излучателей объяснены на основе представлений о системах, имеющих значительный дипольный момент в основном состоянии, таких как одиночные ДАП или их аналоги, расположенные вблизи протяженных дефектов. Таким образом, впервые была продемонстрирована возможность выделения одиночного (квантового) излучателя, сформированного ДАП в широкозонных полупроводниках, и исследованы основные свойства таких излучателей.

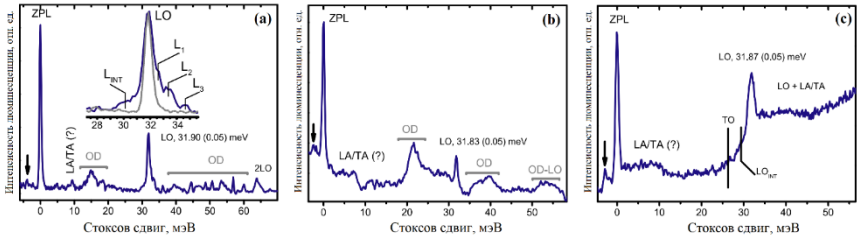

Рис. 6. Спектры излучения одиночных ДАП, состоящих из водородоподобного донора и мелкого (a), водородоподобного (b) и глубокого (c) акцепторов в КЯ ZnSe/ZnMgSSe. На вставке панели (a) показаны детали спектра в области продольного оптического (LO) фононного повторения. Ноль по оси абсцисс соответствует спектральному положению бесфононного перехода. LO_{INT} и $LO_{1,2,3}$ обозначают LO фонон соответствующий слоям ZnMgSSe и локальным фононным модам, соответственно. Температура – 5 К.

Систематическое выделение одиночных излучателей, сформированных ДАП в КЯ ZnSe/ZnMgSSe, было реализовано в работе [35]. Эти излучатели позволили провести квантовое зондирование одиночных акцепторных центров, за счет того, что природа донорных центров, составляющих ДАП, была хорошо известна (фоновые водородоподобные центры). В работе была продемонстрирована простейшая реализация предлагаемого квантового зондирования: частоты оптически активных фононов

были успешно определены для различных типов одиночных фоновых акцепторов в КЯ, см. рис. 6. Таким образом, был предложен и реализован метод квантового зондирования одиночных акцепторных центров в полупроводниковых гетероструктурах, основу которого составляет анализ свойств квантового излучателя, сформированного ДАП с участием исследуемого акцепторного центра. Изучению особенностей экситонного и примесно-дефектного излучения КЯ на основе ZnSe также посвящена работа [59].

Управление электронным спектром, а также сценариями релаксации носителей заряда в кубических полупроводниках на основе соединений A_2B_6, содержащих протяженные дефекты, являются ключевыми для ряда современных технологических решений, в том числе связанных с солнечной энергетикой, различными типами фотодетекторов и источников излучения. Однако локальный беспорядок, вызванный, например, ветвлением дислокаций и образованием дислокационных ступенек, возможной перестройкой реконструкции ядер, взаимодействием дислокаций с точечными дефектами и гетерограницами, радикально осложняет последовательное экспериментальное изучение электронных процессов, определяемых даже распространенными типами протяженных дефектов. Возможным решением данной проблемы является переход к оптическим экспериментам с фрагментами одиночных дефектов. Очевидно, что в этом случае экспериментальные данные о физических процессах, происходящих в дислокационном ядре, свободны от неоднородного уширения и допускают вполне определенную трактовку. Последнее особенно важно ввиду того, что физические процессы в макроскопическом ансамбле протяженных дефектов могут быть крайне разнородны и выделение какого-либо определенного физического механизма часто оказывается очень сложной задачей.

Поскольку для подавляющего большинства бинарных полупроводников A_2B_6 кубической сингонии дислокации образуют достаточно интенсивные линии излучения, зондирование одиночной дислокации может быть основано на выделении и анализе соответствующих изолированных излучателей (при наличии

принципиальной возможности выделения подобных объектов). Существование излучателя такого типа обеспечивает простой оптический доступ к электронной подсистеме, относящейся к некоторому фрагменту одиночного протяженного дефекта. Описанный выше подход был впервые реализован автором для исследования дислокаций в виртуальных подложках CdTe/Si и CdTe/GaAs, используемых для эпитаксиального роста CdHgTe, а также в монокристаллах CdZnTe [37, 71, 72].

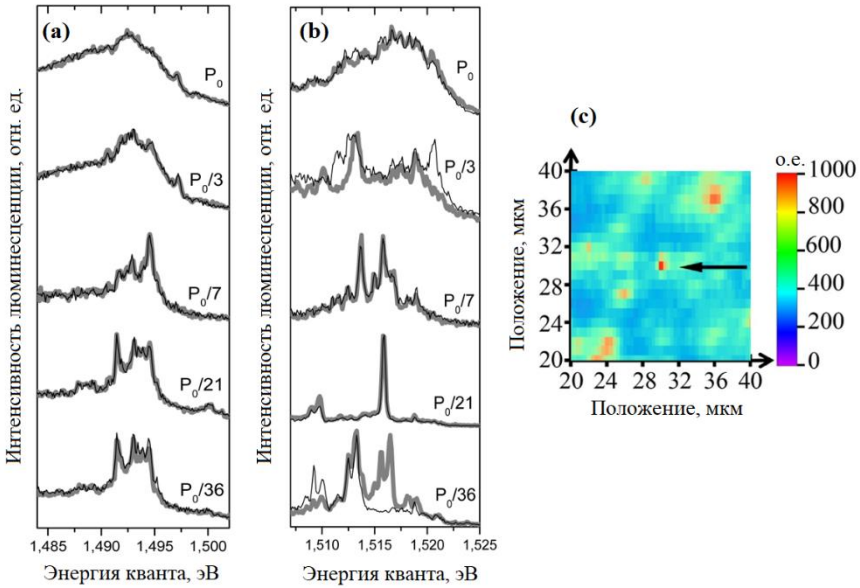

Рис. 7. Зависимость спектров низкотемпературной МФЛ от плотности мощности возбуждения для микрофрагментов дислокационных ядер, формирующих стабильные (a) и метастабильные (b) экситонные состояния. Для каждого спектра приведено два независимых измерения разнесенных на ~10 мин. Плотность мощности возбуждения P_0=0.2 Вт/см^2. (c) - пример интенсивного излучателя, сформированного экситонным состоянием, на карте сигнала МФЛ.

В работах [37, 76] на основе измерений низкотемпературной МФЛ установлено, что электронно-дырочная система, связанная с

микрофрагментами ядер частичных дислокаций в CdTe, демонстрирует признаки фазового перехода «электронно-дырочная плазма – экситонные состояния», наблюдаемого с уменьшением плотности мощности оптического возбуждения, см. рис. 7. Возникающие слабо локализованные экситонные состояния проявляются в виде изолированных (квантовых) излучателей, характеризующихся узкой линией излучения, высокой степенью линейной поляризации и слабой связью с решеткой через фрелиховский механизм электрон-фононного взаимодействия. Статистический анализ таких излучателей, позволяет не только анализировать структуру протяженных дефектов, но и регистрировать метастабильные состояния, связанные с дислокационными ядрами. Под метастабильными имеются ввиду состояния, свойства которых сохраняются на временах $t \sim \tau$, где τ – характерное время жизни неравновесной электронно-дырочной пары, но могут пороговым изменяться, если $t >> \tau$. В условиях эксперимента $\tau \sim$ 10-100 нс, в то время как пороговые изменения регистрируются при $t \sim$ 0.1-10 мин. Пример метастабильных состояний показан на рис. 7b, пример взаимосвязи поляризационной статистики и картины распространения дефектов показан на рис. 8.

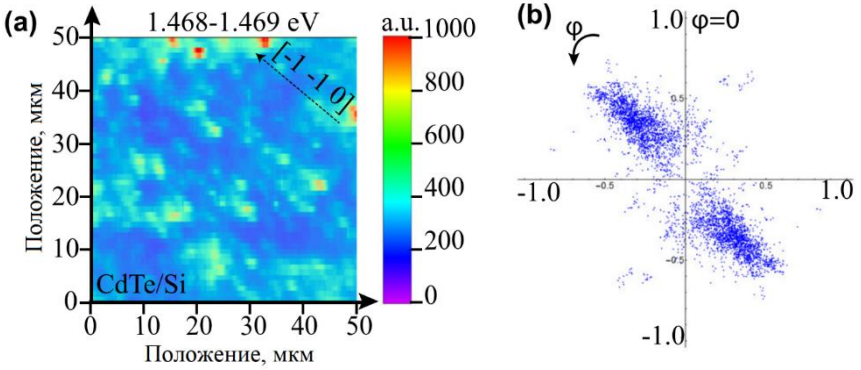

Рис. 8. (a) Карта сигнала МФЛ для пленки CdTe/Si в спектральном диапазоне 1.468-1.469 эВ. Пунктирной стрелкой обозначено направление, вдоль которого распространяются частичные дислокации. (b) статистика поляризации для одиночных излучателей, сформированных дислокационными ядрами. Степень

линейной поляризации соответствует расстоянию до начала координат, угол – ориентации плоскости линейной поляризации. Кристаллографическая привязка соответствует карте сигнала МФЛ на панели (а). Температура – 5 К.

Следует отметить, что принципиальная возможность существования метастабильных состояний, связанных с ядрами частичных дислокаций в CdTe, была предсказана теоретически в работе [20].

Также, в работе [37] было показано, что пространственное распределение и поляризационная статистика эмиттеров описанного выше типа отражают строение протяженных дефектов в релаксированных пленках CdTe/Si(103) и CdTe/GaAs (103). Это позволило чисто оптическими методами продемонстрировать разное происхождение протяженных дефектов в виртуальных подложках CdTe/Si и CdTe/GaAs. Полученные результаты могут быть полезны для бесконтактных методов оценки качества виртуальных подложек и, таким образом, представлять интерес для КРТ технологии.

В работе [72] на основании измерений спектров и поляризации низкотемпературной МФЛ идентифицированы два типа изолированных квантовых излучателей, образующихся из-за наличия дислокаций несоответствия в кристаллах CdZnTe. Для излучателя первого типа спектральное положение бесфононной линии соответствует известной дислокационной люминесценции CdZnTe. При этом положение и интенсивность бесфононной линии демонстрируют высокую стабильность со временем. Для излучателей второго типа бесфононная линия располагается на 30–50 мэВ выше обычной дислокационной люминесценции и демонстрирует гигантские флуктуации спектрального положения (~10 мэВ) и интенсивности. Для каждого из двух типов излучателей связь с решеткой подтверждается наличием фононных повторений, связанных с продольными оптическими фононами в CdZnTe. Заметная степень линейной поляризации в плоскости, содержащей направления <110>, указывает на сильно анизотропный характер соответствующих электронных состояний и подтверждает их связь с дислокациями.

Исследование дислокационной МФЛ в КЯ на основе ZnSe было проведено в работе [67]. В ней обнаружен новый тип изолированных (квантовых) излучателей, возникающих в результате прорастания частичной дислокации через полупроводниковую КЯ. Установлено, что характерными чертами данных излучателей являются наличие узкого (< 1 мэВ) бесфононного перехода, слабое взаимодействие с продольными оптическими фононами и заметная степень линейной поляризации. Результаты ab-initio расчетов, см. напр. [20], указывают на то, что среди частичных дислокаций излучение вблизи края фундаментального поглощения может обеспечить только 90° дислокация.

В работе [77] с помощью измерений низкотемпературной МФЛ исследованы отдельные люминесцентные центры, формируемые ядрами частичных дислокаций в пленке CdTe/Si и КЯ на основе ZnSe. Показано, что для данных центров характерно заметное взаимодействие с продольными оптическими (LO) фононами, квазиимпульс которых соответствует центру зоны Бриллюэна. В то же время относительные интенсивности LO- и 2LO-фононных повторений на порядок отличаются от величин, предсказываемых формулой Хуанга-Рис, которая описывает интенсивности многофононных LO-повторений для примесных люминесцентных центров. Нестандартное распределение интенсивности фононных повторений приписано изменению кривизны адиабатических потенциалов (дефект частоты), которое возникает за счет неустойчивости структуры связей в дислокационном ядре по отношению к состоянию электронной подсистемы.

Получение оптического доступа к одиночным фрагментам дислокационных ядер, продемонстрированное в [37, 67, 71, 72, 76], позволило провести ряд экспериментов по лазерному воздействию на отдельные дислокации, в которых их свойства контролируются in-situ с помощью измерений низкотемпературной МФЛ. Основной упор был сделан на установление влияния импульсного лазерного воздействия на электронные состояния, формируемые ядрами частичных дислокаций в CdTe [80]. Было показано, что использование лазерных импульсов длительностью 5 нс с длиной

волны 1053 нм позволяет локально перестраивать структуру дислокационных ядер, не воздействуя на окружающую их невозмущенную кристаллическую решетку CdTe. Индикатором движения дислокаций и/или перестройки их внутренней структуры в результате такого воздействия является изменение линейчатого спектра для ансамблей одиночных люминесцентных центров формируемых фрагментами ядер частичных дислокаций. Таким образом, был реализован эксперимент с адресным воздействием на отдельные дислокации в CdTe и продемонстрирована возможность перестройки дислокационного ядра, при которой не происходит заметных изменений в ненарушенной решетке.

3. Центры окраски в алмазе и изотопические эффекты

В современной литературе существуют основанные на адиабатическом приближении представления, которые позволяют описать влияние изотопического состава материалов на свойства присутствующих в них люминесцентных центров. Схематическая иллюстрация основных тезисов этих представлений показана на рис. 9. Пусть оптический переход происходит между возбужденным u_e и основным u_g электронными состояниями, которые формируют адиабатические потенциалы для фононной подсистемы. Если рассматривать процесс излучения в пределе низких температур, то переход происходит с основного колебательного уровня u_g на основной или возбужденный колебательный подуровень u_e. Первый процесс соответствует бесфононному переходу, так как он не приводит к изменению фононных чисел заполнения. Второй процесс соответствует фононным повторениям, которые могут быть сформированы как решеточными фононными модами, так и локализованными колебаниями. Так как собственные частоты системы зависят от масс, следует ожидать перестройки фононных повторений по отношению к бесфононному переходу при изменении изотопического состава.

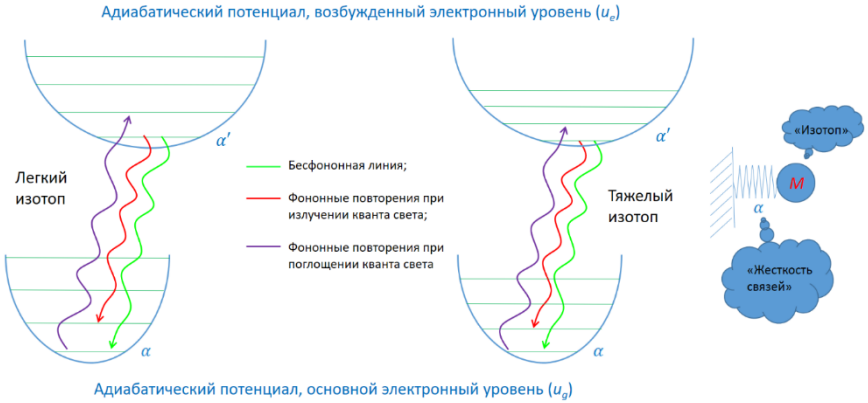

Рис. 9. Схематическая иллюстрация сдвигов линий, соответствующих бесфононному переходу и фононным повторениям для люминесцентных центров, при изменении изотопического состава.

Из представленной схемы следует, что если кривизна адиабатических потенциалов одинаковая в основном и возбужденном электронных состояниях, то энергии нулевых колебаний компенсируется. В результате, к изотопическому составу (вариациям массы) будут чувствительны только переходы, соответствующие фононным повторениям. В то же время, если состояния u_e и u_g характеризуются разной кривизной адиабатических потенциалов (ситуация, показанная на рис. 9), энергия нулевых колебаний компенсируется не полностью. Как следствие, энергия кванта, соответствующего бесфононному переходу, будет зависеть от изотопического состава. В рамках иллюстративной модели осциллятора представленной на рис. 9, эта зависимость описывается следующим выражением:

$$\hbar\omega_{ZPL} = E_0 + \frac{1}{2}\hbar\Omega_e - \frac{1}{2}\hbar\Omega_g = E_0 + \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{\alpha'}{M}} - \sqrt{\frac{\alpha}{M}}\right) \quad (1)$$

$$\delta(\hbar\omega_{ZPL}) = -\frac{\delta M}{M}(\hbar\Omega_e - \hbar\Omega_g) \quad (2)$$

Где $\hbar\omega_{ZPL}$- спектральное положение бесфононного перехода, M- масса осциллятора, $\hbar\Omega_e$, $\hbar\Omega_g$ – энергии фононов для состояний u_e и u_g, соответственно.

Разная кривизна адиабатических потенциалов для u_e и u_g электронных состояний однозначно указывает на то что фононный спектр для данных состояний будет различным. В рамках представленной иллюстративной модели это означает, что $\hbar\Omega_e \neq \hbar\Omega_g$. Так как в пределе низких температур поглощение кванта света приводит к переходу из основного колебательного состояния u_g на основное или возбужденное состояние u_e, разная кривизна адиабатических потенциалов будет выражаться в отсутствии зеркальной симметрии у фононных полос в низкотемпературных спектрах ФЛ и поглощения. Таким образом, из представленных качественных рассуждений следует, что чувствительность спектрального положения бесфононного перехода к изотопическому составу, вызванная разной кривизной адиабатических потенциалов, должна быть связана с нарушением «зеркальной симметрии» в спектрах излучения и пропускания (возбуждения люминесценции). Данный эффект обычно упоминается в литературе как «дефект частоты».

В работах [38, 84] автором были получены оригинальные спектроскопические данные, касающиеся изменений свойств ряда центров окраски в синтетических алмазах при модификации их изотопического состава. Упор был сделан на измерениях спектров низкотемпературной ФЛ и спектров возбуждения люминесценции. Последняя методика позволяет получить информацию о спектре поглощения заданного люминесцентного центра, но предъявляет минимальные требования к подготовке образцов. Сочетание высокого спектрального разрешения, пространственного разрешения порядка 1 мкм и низкой температуры позволило для ряда центров окраски получить качественные спектры излучения с узкими бесфононными линиями и хорошо выраженной структурой фононных повторений. Зависимость этих спектров от изотопического состава матрицы и легирующей примеси, интерпретированная в рамках описанного выше подхода, позволила автору получить новые данные о свойствах вакансионных комплексов с участием кремния и германия.

В работе [38] исследованы изотопно-обогащенные нано- и микроалмазы с оптически активными GeV^- центрами,

синтезированные при высоких давлениях и высоких температурах в неметаллических ростовых системах. Влияние изотопного состава на оптические свойства было детально изучено с помощью измерений низкотемпературной ФЛ и измерений спектров возбуждения фотолюминесценции (ВФЛ). Показан большой дефект частоты, который приводит к радикальному расхождению между спектрами ВФЛ и ФЛ и сравнительно высокому изотопическому сдвигу бесфононной линии.

В работах [82, 83, 85] проведен комплекс низкотемпературных экспериментов, аналогичных описанным в [38, 84], но для вакансионных комплексов с участием кремния. Определены сдвиг различных компонент спектра излучений SiV^- центра в зависимости от изотопического состава алмазной матрицы и легирующего кремния. Особенности низкотемпературной ФЛ легированных алмазных пленок обсуждаются в работах [82, 85].

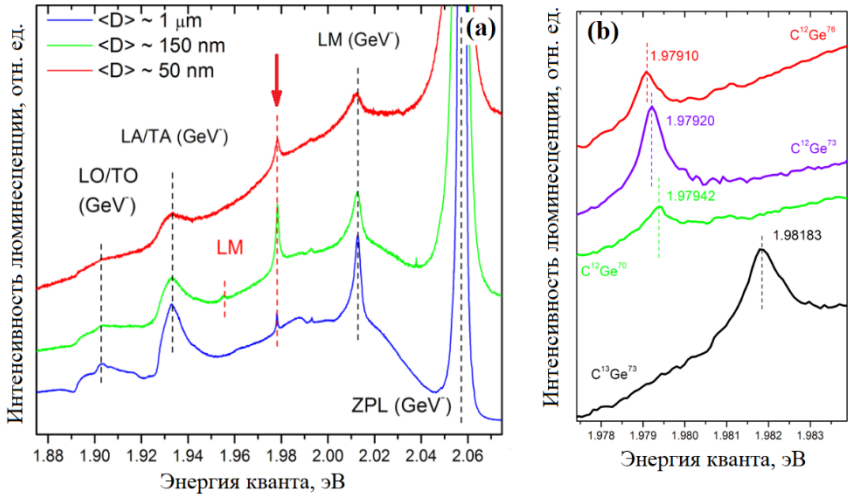

Рис. 10. (a) – спектры низкотемпературной ФЛ для кристаллов алмаза, легированных германием с различным средним размером. Бесфононная линия (ZPL) нового люминесцентного центра помечена стрелкой. (b) - Сдвиг бесфононной линии для обнаруженного центра в при различных изотопических составах алмазной матрицы и легирующего германия.

Как известно, отрицательно заряженные вакансионные комплексы обладают выдающимися свойствами благодаря яркой и почти монохроматической люминесценции, но имеют плохие спиновую когерентность и времена релаксации. Считается, что этот недостаток отсутствует в нейтральном зарядовом состоянии дефектов. До сих пор в спектрах люминесценции и поглощения наблюдался только нейтральный центр кремниевой вакансии. В работе [84] был обнаружен его аналог на основе германия в спектрах с бесфононной линией в районе 1.979 эВ, см. рис. 10.

Связь центра с легирующей примесью Ge однозначно подтверждается исследованиями алмазов ^{12}C, содержащих изотопы ^{70}Ge, ^{73}Ge или ^{76}Ge. Соотношение интенсивностей бесфононных линий этих центров меняется с размером кристалла, и интенсивность центров GeV^0 достигает максимума в образцах размером 150 нм. В вибронной боковой полосе этого центра идентифицирована локальная колебательная мода с энергией 23 мэВ. Расчеты в рамках теории функционала плотности дают значение энергии бесфононной линии GeV^0 центра, которое на 150 мэВ выше экспериментально наблюдаемого и совпадает со значениями его релаксационной энергии, а также с частотой локальной фононной моды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы состоят в следующем.

1. На основе измерений стационарной и разрешенной по времени фотолюминесценции продемонстрировано существование квазидвумерной электронно-дырочной жидкости в квантовых ямах $Si_{1-x}Ge_x/Si$. Электронно-дырочная жидкость является двухкомпонентной (электроны и легкие дырки) при $5\% < x < 10\%$ и становится трехкопонентной (электроны, легкие дырки и тяжелые дырки) при $x < 5\%$. При содержании германия $x > 10\%$ основным состоянием электронно-дырочной системы являются биэкситоны. Главными факторами, управляющими фазовой диаграммой

квазидвумерной электронно-дырочной системы, являются потенциальный барьер в зоне проводимости и вызванное напряжением расщепление дырочных подзон.

2. Формирование двумерной конденсированной фазы в $Si_{1-x}Ge_x/Si$ квантовых ямах сопровождается появлением нестандартного рекомбинационного излучения, при котором после аннигиляции двух электронно-дырочных пар энергия и импульс передаются одному кванту света. Данное излучение возникает в видимом диапазоне, а его спектр определяется равновесной концентрацией носителей в конденсированной фазе и структурой дырочных подзон вблизи потолка валентной зоны. Вероятность излучательной рекомбинации через описанный механизм допускает усиление за счет установления ближнепольной связи с плазмонным резонатором.

3. Время жизни носителей в двумерной конденсированной фазе, формирующейся при температуре 5 К в нелегированной квантовой яме $Si_{1-x}Ge_x/Si$ шириной 5 нм и содержанием германия 5% составляет 250 нс. При размещении в центре квантовой ямы δ-слоя бора с концентрацией 10^{10} $см^{-2}$ время жизни носителей в конденсированной фазе уменьшается до 240 нс. Энергия связи экситона, связанного на примеси бора, расположенной в центре квантовой ямы шириной 5нм, составляет 7.0±0.5 мэВ.

4. Для полупроводниковых квантовых ям продемонстрирована возможность систематической регистрации одиночных люминесцентных центров, возникающих за счет перекрытия волновых функций основного состояния акцептора и основного состояния водородоподобного донора. Показано, что данный тип люминесцентных центров позволяет анализировать электронную и фононную подсистемы одиночного акцепторного (донорного) центра, если природа второго дефекта, формирующего пару, известна. Таким образом, реализован новый метод, позволяющий с помощью измерений микрофотолюминесценции определять свойства одиночных донорных или акцепторных центров в полупроводниковых гетероструктурах. С использованием данного подхода определен характер электрон-фононного взаимодействия для различных типов одиночных акцепторов в квантовых ямах на основе ZnSe.

5. 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.

6. Для кубических полупроводников группы A_2B_6 продемонстрировано влияние низкой симметрии акцепторов на структуру формируемых ими электронных уровней и развит простой бесконтактный метод, позволяющий без внешнего поля регистрировать понижение симметрии акцепторного центра. В теллуриде кадмия обнаружен новый акцептор замещения с энергией основного состояния 97.9±0.6 мэВ.

7. Показано, что формирование комплекса ближнего порядка с участием иона железа и собственного дефекта цинковой подрешетки приводит к появлению в ZnSe структурированной полосы люминесценции с бесфононным переходом в районе 0.681 эВ. Обнаруженный комплекс позволяет реализовать «оптический зонд» собственных точечных дефектов в кристаллическом ZnSe:Fe.

8. Установлено, что электронно-дырочная система, связанная с микрофрагментами ядер частичных дислокаций в кубических полупроводниках группы A_2B_6, демонстрирует признаки фазового перехода «электронно-дырочная плазма – экситонные состояния», наблюдаемого при низких температурах с уменьшением плотности мощности оптического возбуждения. Возникающие экситонные состояния проявляются в виде изолированных (квантовых) излучателей, характеризующихся узкой линией излучения, высокой ~1:10 степенью линейной поляризации и слабой связью с решеткой через фрелиховский механизм электрон-фононного взаимодействия. Показано, что статистический анализ таких излучателей, позволяет не только анализировать структуру протяженных дефектов, но и регистрировать метастабильные состояния, связанные с дислокационными ядрами.

9. Реализовано локальное лазерное воздействие на протяженные дефекты в теллуриде кадмия, при котором не происходит заметных изменений в ненарушенной решетке. Индикатором движения дислокаций и/или перестройки их внутренней структуры в результате такого воздействия является изменение линейчатого спектра низкотемпературной микрофотолюминесценции формируемого фрагментами ядер частичных дислокаций.

10. В синтетических легированных германием алмазах обнаружен не наблюдавшийся ранее люминесцентный центр с узким бесфононным переходом в районе 1.979 эВ. На основе измерений низкотемпературной микрофотолюминесценции алмазов с разным изотопическим составом матрицы ($^{12}C/^{13}C$) и легирующей примеси (^{70}Ge, ^{73}Ge, ^{76}Ge) центр отождествлен с нейтральным вакансионным комплексом в состав которого входит атом германия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Vitiello M. S., Tredicucci A. Physics and technology of Terahertz quantum cascade lasers //Advances in Physics: X. – 2021. – V. 6. – I. 1. – No. 1893809.
DOI: 10.1080/23746149.2021.1893809
[2] Wen B., Ban D. High-temperature terahertz quantum cascade lasers //Progress in Quantum Electronics. – 2021. – V. 80. – No. 100363.
DOI: 10.1016/j.pquantelec.2021.100363
[3] Yao Y., Hoffman A. J., Gmachl C. F. Mid-infrared quantum cascade lasers //Nature Photonics. – 2012. – V. 6. – I. 7. – PP. 432-439.
DOI: 10.1038/nphoton.2012.143
[4] Drong M., Fördös T., Jaffrès H. Y., Peřina J., Jr., Postava K., Ciompa P., Pištora J., Drouhin H.-J. Spin-VCSELs with local optical anisotropies: Toward terahertz polarization modulation //Physical Review Applied. – 2021. – V. 15. – I. 1. – No. 014041.
DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.014041

[5] Cheng, H. T., Yang, Y. C., Liu, T. H., Wu, C. H. Recent advances in 850 nm VCSELs for high-speed interconnects //Photonics. – 2022. – V. 9. – I. 2. – No. 107.
DOI: 10.3390/photonics9020107
[6] Cheng, C. H., Lo, W. C., Su, B., Wu, C. H., Lin, G. R. Review of VCSELs for complex data-format transmission beyond 100-gbit/s //IEEE Photonics Journal. – 2021. – V. 13. – I 5. – PP. 1-13.
DOI: 10.1109/JPHOT.2021.3104647
[7] Zhang, G., Cheng, Y., Chou, J. P., Gali, A. Material platforms for defect qubits and single-photon emitters //Applied Physics Reviews. – 2020. – V. 7. – I. 3. – No. 031308.
DOI: 10.1063/5.0006075
[8] Sajid A., Ford M. J., Reimers J. R. Single-photon emitters in hexagonal boron nitride: a review of progress //Reports on Progress in Physics. – 2020. – V. 83. –I. 4. – No. 044501.
DOI: 10.1088/1361-6633/ab6310
[9] Aharonovich I., Englund D., Toth M. Solid-state single-photon emitters //Nature Photonics. – 2016. – V. 10. – I. 10. – PP. 631-641.
DOI: 10.1038/nphoton.2016.186
[10] Rakshit, S., Piatkowski, P., Mora-Seró, I., Douhal, A. Combining perovskites and quantum dots: Synthesis, characterization, and applications in solar cells, LEDs, and photodetectors //Advanced Optical Materials. – 2022. – I. 2102566.
DOI: 10.1002/adom.202102566
[11] Wu J., Lu Y., Feng S., Wu Z., Lin S., Hao Z., Yao T., Li X., Zhu H., Lin S. The interaction between quantum dots and graphene: The applications in graphene-based solar cells and photodetectors //Advanced Functional Materials. – 2018. – V. 28. – I. 50. – No. 1804712.
DOI: 10.1002/adfm.201804712
[12] Baghel N. S., Chander N. Performance comparison of mono and polycrystalline silicon solar photovoltaic modules under tropical wet and dry climatic conditions in east-central India //Clean Energy. – 2022. – V. 6. – I. 1. – PP. 929-941.
DOI: 10.1093/ce/zkac001
[13] Li C., Wu Y., Poplawsky J., Pennycook T. J., Paudel N., Yin W., Haigh S. J., Oxley M. P., Lupini A. R., Al-Jassim M., Pennycook S. J.,

Yan Y. Grain-boundary-enhanced carrier collection in CdTe solar cells //Physical Review Letters. – 2014. – V. 112. – I. 15. – No. 156103.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.156103
[14] Kim J.-K., Cho K., Jang J., Baek K.-Y., Kim J., Seo J., Song M., Shin J., Kim J., Parkin S. S. P., Lee J.-H., Kang K., Lee T. Molecular dopant-dependent charge transport in surface-charge-transfer-doped tungsten diselenide field effect transistors //Advanced Materials. – 2021. – V. 33. – I. 44. – No. 2101598.
DOI: 10.1002/adma.202101598
[15] Seo S. G., Jeong J., Kim S. Y., Kumar A., Jin S. H. Reversible and controllable threshold voltage modulation for n-channel MoS_2 and p-channel $MoTe_2$ field-effect transistors via multiple counter doping with ODTS/poly-L-lysine charge enhancers //Nano Research. – 2021. – V. 14. – I. 9. – PP. 3214-3227.
DOI: 10.1007/s12274-021-3523-8
[16] Iqbal M. W., Elahi E., Amin A., Hussain G., Aftab S. Chemical doping of transition metal dichalcogenides (TMDCs) based field effect transistors: A review //Superlattices and Microstructures. – 2020. – V. 137. – No. 106350.
DOI: 10.1016/j.spmi.2019.106350
[17] Vergara G., Gómez L. J., Villamayor V. Monolithic uncooled IR detectors of polycrystalline PbSe. A real alternative.// Proceedings of SPIE. – 2018. – V. 6542. – No. 654220.
[18] Jagannadham K., Narayan J. Modification of dopant profiles due to surface and interface interactions: Applications to semiconductor materials //Journal of Applied Physics. – 1987. – V. 61. – I. 3. – PP. 985-992.
DOI: 10.1063/1.338152
[19] Katsaba A. V., Ambrozevich S. A., Vitukhnovsky A. G., Fedyanin V. V., Lobanov A. N., Krivobok V. S., Vasiliev R. B., Samatov G. "Surface states effect on photoluminescence of CdS colloidal nanocrystals //Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 113. – I. 18. – No. 184306.
DOI: 10.1063/1.4804255
[20] Kweon K. E., Åberg D., Lordi V. First-principles study of atomic and electronic structures of 60˚ perfect and 30˚/90˚ partial glide dislocations in CdTe //Physical Review B. – 2016. – T. 93. – I. 17. – No. 174109.

DOI: 10.1103/PhysRevB.93.174109
[21] Combescot M., Combescot R., Dubin F. Bose–Einstein condensation and indirect excitons: a review //Reports on Progress in Physics. – 2017. – V. 80. – I. 6. – No. 066501.
DOI: 10.1088/1361-6633/aa50e3
[22] Alén, B., Fuster, D., Muñoz-Matutano, G., Martinez-Pastor, J., Gonzalez, Y., Canet-Ferrer, J., González, L. Exciton Gas Compression and Metallic Condensation in a Single Semiconductor Quantum Wire //Physical Review Letters. – 2008. – V. 101. – I. 6. – No. 067405.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.101.067405
[23] Ishii H., Kataura H., Shiozawa H., Yoshioka H., Otsubo H., Takayama Y., Miyahara T., Suzuki S., Achiba Y., Nakatake M., Narimura T., Higashiguchi M., Shimada K., Namatame H., Taniguchi M. "Direct observation of Tomonaga–Luttinger-liquid state in carbon nanotubes at low temperatures //Nature. – 2003. – V. 426. – I. 6966. – PP. 540-544.
DOI: 10.1038/nature02074
[24] Mogck S., Kooi B. J., De Hosson J. Th. M., Finnis M. W. Ab initio transmission electron microscopy image simulations of coherent Ag-MgO interfaces //Physical Review B. – 2004. – V. 70. – I. 24. – No. 245427.
DOI: 10.1103/PhysRevB.70.245427
[25] Fisicaro G., Bongiorno C., Deretzis I., Giannazzo F., La Via F., Roccaforte F., Zielinski M., Zimbone M., La Magna A. Genesis and evolution of extended defects: The role of evolving interface instabilities in cubic SiC featured //Applied Physics Reviews. – 2020. – V. 7. – I. 2. – No. 021402.
DOI: 10.1063/1.5132300
[26] Yao P., Song Y., Li P., Zuo X. Ab initio calculation of silicon monovacancy defect in amorphous-SiO2/Si interface //AIP Advances. – 2022. – V. 12. – I. 5. – No. 055108.
DOI: 10.1063/5.0088197
[27] Yang J.-H., Park J.-S., Kang J., Metzger W., Barnes T., Wei S.-H. Tuning the Fermi level beyond the equilibrium doping limit through quenching: The case of CdTe //Physical Review B. – 2014. – V. 90. – I. 24. – No. 245202.
DOI: 10.1103/PhysRevB.90.245202

[28] Yang J.-H., Yin W.-J., Park J.-S., Metzger W., Wei S.-H. First-principles study of roles of Cu and Cl in polycrystalline CdTe //Journal of Applied Physics. – 2016. – V. 119. – I. 4. – No. 045104.
DOI: 10.1063/1.4940722
[29] Karaiskaj D., Thewalt M. L. W., Ruf T., Cardona M., Pohl H.-J., Deviatych G. G., Sennikov P. G., Riemann H. Photoluminescence of Isotopically Purified Silicon: How Sharp are Bound Exciton Transitions? //Physical Review Letters. – 2001. – V. 86. – I. 26. – No. 6010.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.86.6010
[30] Cuscó R., Edgar J. H., Liu S., Li J., Artús L. Isotopic Disorder: The Prevailing Mechanism in Limiting the Phonon Lifetime in Hexagonal BN //Physical Review Letters. – 2020. – V. 124. – I. 16. – No. 167402.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.167402
[31] Ye M., Seo H., Galli G. Spin coherence in two-dimensional materials //npj Computational Materials. – 2019. – V. 5. – I. 1. – PP. 1-6.
DOI: 10.1038/s41524-019-0182-3
[32] Кулаковский Д.В., Губарев С.И., Лозовик Ю.Е. Экранирование экситонных состояний квазидвумерным электронным газом в квантовых ямах//Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 74. – В. 2. – С. 123-126.
DOI: 10.1134/1.1405899
[33] Belykh V. V., Kuntsevich A. Yu., Glazov M. M., Kavokin K. V., Yakovlev D. R., Bayer M. Quantum Interference Controls the Electron Spin Dynamics in n-GaAs //Physical Review X. – 2018. – V. 8. – I. 3. – No. 031021.
DOI: 10.1103/PhysRevX.8.031021
[34] Look D. C., Leedy K. D., Vines L., Svensson B. G., Zubiaga A., Tuomisto F., Doutt D. R., Brillson L. J. Self-compensation in semiconductors: The Zn vacancy in Ga-doped ZnO //Physical Review B. – 2011. – V. 84. – I. 11. – No. 115202.
DOI: 10.1103/PhysRevB.84.115202
[35] 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. – P. 273-277.
DOI: 10.1016/j.jlumin.2019.04.062

[36] 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. – I. 2. – No. 210.
DOI: 10.1364/OME.413374
[37] 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. – I. 23. – No. 232102.
DOI: 10.1063/1.5127259
[38] 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. – I. 14. – No. 144103.
DOI: 10.1103/PhysRevB.101.144103
[39] 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 Si 1− x Ge x/Si quantum wells by steady-state and time-resolved photoluminescence measurements //Physical Review B. – 2010. – V. 82. – №. 11. – no. 115313.
DOI:10.1103/PhysRevB.82.115313
[40] Багаев В. С., Кривобок В. С., Николаев С. Н., Онищенко Е. Е., Скориков М. Л., Новиков А. В., Лобанов Д. Н. Влияние барьера для электронов на конденсацию экситонов и спектр многочастичных состояний в квантовых ямах SiGe/Si//Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 94. – №. 1. – С. 63-67.
DOI: 10.1134/S0021364011130042
[41] Багаев В.С., Кривобок В.С., Николаев С.Н., Онищенко Е.Е., Пручкина А.А., Аминев Д.Ф., Скориков М.Л., Лобанов Д.Н., Новиков А.В. Динамика фазовых переходов в системе неравновесных носителей заряда в квантоворазмерных структурах Si1-xGex/Si // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 144. – № 5. – С. 1045-1060.

DOI: 10.1134/S1063776113130074
[42] Krivobok, V. S.; Nikolaev, S. N.; Bagaev, V. S.; Pruchkina, A. A.; Onishchenko, E. E.; Kolosov, S. A.; Klevkov, Yu. V.; Skorikov, M. L. Electronic spectrum of non-tetrahedral acceptors in CdTe:Cl and CdTe:Bi,Cl single crystals // Journal of Applied Physics. – 2016. – V. 119. – I. 5. – No. 055704.
DOI: 10.1063/1.4941026
[43] Bagaev V., Krivobok V., Klevkov Y., Shepel A., Onishchenko E., Martovitsky V. High quality n-type CdTe produced by ultra-rapid crystallization //physica status solidi c. – 2010. – V. 7. – №. 6. – PP. 1470-1472.
DOI:10.1002/pssc.200983163
[44] Bagaev, V. S., Krivobok, V. S., Nikolaev, S. N., Novikov, A. V., Onishchenko, E. E., Zaitsev, V. V., Caldas, M. & Studart, N. Collective effects in SiGe/Si quantum wells //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics. – 2010. – V. 1199. – №. 1. – PP. 189-190.
DOI:10.1063/1.3295361
[45] Кривобок В. С., Николаев С. Н., Багаев В. С., Лебедев В. С., Онищенко Е. Е. Сверхизлучение вырожденного экситонного газа в полупроводниках с непрямым краем собственного поглощения// Письма в ЖЭТФ. – 2014. – Т. 100. – № 5. – С. 343-348.
DOI: 10.1134/S0021364014170081
[46] Bagaev V. S., Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Novikov A. V., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Influence of Boron Selective Doping on the Edge Luminescence of SiGe/Si Quantum Wells //Journal of Russian Laser Research. – 2015. – V. 36. – №. 1. – PP. 66-73.
DOI: 10.1007/s10946-015-9478-z
[47] Bagaev V. S., Krivobok V. S., Nikolaev S. N., Novikov A. V., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A. Excitonic luminescence of SiGe/Si quantum wells δ-doped with boron // Journal of Applied Physics. – 2015. – V. 117. – I. 18. – No. 185705.
DOI: 10.1063/1.4921103
[48] Багаев В.С., Давлетов Э.Т., Кривобок В.С., Николаев С.Н., Новиков А.В., Онищенко Е.Е., Пручкина А.А., Скориков М.Л. Многочастичные состояния и факторы, осложняющие экспериментальное наблюдение квантовой когерентности в

экситонном газе квантовых ям SiGe/Si // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 148. – № 6. – С. 1198-1214.
DOI: 10.1134/S106377611512002X
[49] Николаев С. Н., Кривобок В. С., Багаев В. С., Онищенко Е. Е., Новиков А. В., Шалеев М. В. Тонкая структура излучения двумерной электронно-дырочной жидкости в SiGe/Si квантовых ямах // Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – № 3. – С. 161-166.
DOI: 10.7868/S0370274X16150042
[50] Кривобок В. С., Николаев С. Н., Новиков А. В., Шалеев М. В., Багаев В. С., Онищенко Е. Е., Лебедев В. С., Скориков М. Л., Уцина Е. В., Кочиев М. В. Плазмонное усиление интенсивности четырехчастичной излучательной рекомбинации в кремний-германиевых квантовых ямах// Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – № 4. – С. 229-234.
DOI: 10.1134/S0021364016160086
[51] Аминев Д. Ф., Клоков А. Ю., Кривобок В. С., Николаев С. Н., Новиков А. В., Шарков А. И., Сибельдин Н. Н. Нагрев и испарение двумерной электронно-дырочной жидкости под действием тепловых импульсов// Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105. – № 3. – С. 164-169.
DOI: 10.1134/S0021364017030031
[52] 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.
DOI: 10.1134/S0021364018060097
[53] Н. Николаев, М. А. Чернопицский, В. С. Багаев, В. С. Кривобок. Антистоксова люминесценция объемного β-InSe и его тонких пленок при оптическом ИК-возбуждении // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – № 3. – С. 96-160.
DOI: 10.31857/S1234567820150033
[54] Васильченко А.А., Кривобок В.С., Николаев С.Н., Багаев В.С., Онищенко Е.Е., Копытов Г.Ф. Спектр излучения и стабильность двух типов электронно-дырочной жидкости в мелких Si/Si1-xGexSi квантовых ямах //Физика твёрдого тела. – 2020. – Т. 62. – №. 4. – С. 529-536.

DOI:10.1134/S106378342004023X
[55] Klokov A. Y., Krivobok V. S., Sharkov A. I., Tsvetkov V. A., Martovitskii V. P., Novikov A. V. Acoustic properties of strained SiGe/Si layers in the sub-terahertz frequency range // Applied Physics Letters. – 2020. – V. 127. – I. 15. – No. 154304.
DOI: 10.1063/1.5129847
[56] Багаев В.С., Клевков Ю.В., Колосов С.А., Кривобок В.С., Онищенко Е.Е., Шепель А.А. Фотолюминесценция CdTe, выращенного при значительном отклонении от термодинамического равновесия //Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45. – №. 7. – С. 908-915.
DOI:10.1134/S1063782611070025
[57] Багаев В.С., Кривобок В.С., Онищенко Е.Е., Скориков М.Л., Шепель А.А. Резонансная спектроскопия донорных и акцепторных центров в компенсированном теллуриде кадмия //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 113. – №. 5. – С. 929-941.
DOI: 10.1134/S1063776111130024
[58] Adiyatullin A. F., Krivobok V. S., Onishchenko E. E. The exciton luminescence in Zn (Cd) Se/ZnMgSSe quantum wells //Journal of Russian Laser Research. – 2012. – V. 33. – №. 3. – P. 231-239.
DOI: 10.1007/s10946-012-9277-8
[59] Адиятуллин А.Ф., Белых В.В., Козловский В.И., Кривобок В.С., Мартовицкий В.П., Николаев С.Н. Влияние размытия гетерограницы на свойства экситонных состояний в квантовых ямах Zn(Cd)Se/ZnMgSSe // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 142. – № 5. – С. 1005-1019.
DOI: 10.1134/S1063776112090014
[60] Adiyatullin, A. F., Shevtsov, S. V., Sviridov, D. E., Kozlovsky, V. I., Pruchkina, A. A., Kuznetsov, P. I.; Krivobok, V. S. Effects of photoinduced charge redistribution on excitonic states in Zn(Cd)Se/ZnMgSSe quantum wells // Journal of Applied Physics. – 2013. – V. 114. – I. 16. – No. 163524.
DOI: 10.1063/1.4827183
[61] Пручкина А. А., Кривобок В. С., Николаев С. Н., Онищенко Е. Е., Белов А. Г., Денисов Н. А., Меринов В. Н. Исследования

комплексных акцепторов в CdTe:Cl методом разностной спектроскопии// Письма в ЖЭТФ. – 2013. – Т. 98. – № 8. – С. 508-512.
DOI: 10.1134/S0021364013210108
[62] Шевцов С.В., Адиятуллин А.Ф., Свиридов Д.Е., Козловский В.И., Кузнецов П.И., Николаев С.Н., Кривобок В.С. Фотоиндуцированное перераспределение заряда и его влияние на экситонные состояния в гетероструктурах Zn(Cd)Se/ZnMgSSe/GaAs с квантовыми ямами//Физика твёрдого тела. – 2014. – Т. 56. – №. 4. – С. 769-778.
DOI: 10.1134/S1063783414040313
[63] Пручкина А.А., Николаев Н.С., Кривобок В.С., Багаев В.С., Онищенко Е.Е., Клевков Ю.В., Колосов С.А. Влияние отжига в жидком кадмии на фотолюминесценцию поликристаллического CdTe, выращенного в неравновесных условиях// Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48. – №. 3. – С. 308-314.
DOI: 10.1134/S106378261403021X
[64] Кривобок В.С., Денисов И.А., Можевитина Е.Н., Николаев С.Н., Онищенко Е.Е., Пручкина А.А., Силина А.А., Смирнова Н.А., Чернопицский М.А., Шматов Н.И. Примесно-дефектное излучение нелегированных монокристаллов Cd1-xZnxTe вблизи края собственного поглощения //Физика твёрдого тела. – 2016. – Т. 58. – №. 5. – С. 950-960.
DOI: 10.1134/S1063783416050127
[65] Krivobok, V., Nikolaev, S., Onischenko, E., Pruchkina, A., Kolosov, S., Klevkov, Y., Bagaev, V. Electronic spectrum of Bi-related defects in crystalline CdTe //physica status solidi (c). – 2016. – V. 13. – I. 7-9. – PP. 481-485.
DOI:10.1002/pssc.201510274
[66] Bagaev, V., Krivobok, V., Nikolaev, S., Onischenko, E. & Pruchkina, A. Application of the difference spectroscopy for studying of complex acceptors in CdTe //physica status solidi (c). – 2016. – V. 13. – I. 7-9. – PP. 477-480
DOI:10.1002/pssc.201510262
[67] 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 ZnSe/ZnMgSSe// Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – № 2. – С. 108-113.
DOI: 10.1134/S0021364016150121
[68] Shapiro B. I., Nekrasov A. D., Krivobok V. S., Lebedev V. S., Optical properties of molecular nanocrystals consisting of J-aggregates of anionic and cationic cyanine dyes //Optics Express. – 2018. – V. 26. – I. 23. – PP. 30324-30337.
DOI: 10.1364/OE.26.030324
[69] Shapiro B. I., Nekrasov A. D., Manulik E. V., Krivobok V. S., Lebedev V. S., Optical and photoelectric properties of multichromic cyanine dye J-aggregates // Quantum Electronics. – 2018. – V. 48. – I. 9. – no. 856.
DOI: 10.1070/QEL16758
[70] Chentsov S. I., Pruchkina A. A., Krivobok V. S. Isolated (Quantum) Emitters Generated with the Participation of Donor–Acceptor Pairs in the ZnSe/ZnMgSSe Heterostructure //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2018. – V. 82. – I. 4. – PP. 431-434.
DOI: 10.3103/S1062873818040056
[71] Pruchkina, A. A., Krivobok, V. S., Nikolaev, S. N., Onishchenko, E. E., Chentsov, S. I., Chernopitssky, M. A., Velikovskiy, N. A., Anufrienko, O. D. & Skakov, Yu. A. New Type of Quantum Emitters Related to Dislocations in Crystalline CdZnTe Revealed by Laser-Based Spectroscopy //Journal of Russian Laser Research. – 2018. – V. 39. – I. 3. – PP. 280-285.
DOI: 10.1007/s10946-018-9719-z
[72] 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.
DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.03.026
[73] Bagaev, V. S., Krivobok, V. S., Chentsov, S. I., Onishchenko, E. E., Pruchkina, A. A., Nikolaev, S. N., Chernopitssky, M. A. & Litvinov, D. M. Separation of Quantum Emitters Produced by Single Donor–Acceptor Pairs Under Laser Excitation //Journal of Russian Laser Research. – 2019. – V. 40. – I. 3. – PP. 274-279.

DOI: 10.1007/s10946-019-09802-7
[74] Gladilin A., Chentsov S., Uvarov O., Nikolaev S., Krivobok V., Kalinushkin V. Luminescence spatial characteristics of ZnSe:Fe // Journal of Applied Physics. – 2019. – V. 126. – I. 1. – No. 015702.
DOI: 10.1063/1.5094954
[75]. Кривобок В. С., Колобов А. В., Димитриева С. Е., Аминев Д. Ф., Ченцов С. И., Николаев С. Н., Мартовицкий В. П., Онищенко Е. Е. Нестандартная кинетика низкотемпературной люминесценции микро- и нанопорошков антазной фазы диоксида титана// Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – № 8. – С. 501-507.
DOI: 10.1134/S0021364020200084
[76] Krivobok, V. S., Nikolaev, S. N., Bagaev, V. S., Onishchenko, E. E., Chentsov, S. I., Chernopitssky, M. A. & Sharkov, A. I. Observation of Phase Transitions in an Electron–Hole System Associated with Dislocation Cores in Cadmium Telluride// Bull. Lebedev Phys. Inst. – 2020. – V. 47. – PP. 123–126.
DOI: 10.3103/S106833562004003X
[77] Кривобок В. С., Николаев С. Н., Багаев В. С., Ченцов С. И., Онищенко Е. Е., Пручкина А. А. Нестандартные особенности взаимодействия одиночных люминесцентных центров, сформированных ядрами частичных дислокаций в CdTe и ZnSe, с продольными оптическими фононами// Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 114. – № 2. – С. 96-101.
DOI: 10.1134/S002136402114006X
[78] Nikolaev, S. N.; Chernopitssky, M. A.; Bagaev, V. S.; Krivobok, V. S.; Onishchenko, E. E.; Savin, K. A.; Klokov, 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 - No. 117812 - p. 117812
DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117812
[79] Ekimov, E. A.; Krivobok, V. S.; Kondrin, M. V.; Litvinov, D. A.; Grigoreva, L. N.; Koroleva, A. V.; Zazymkina, D. A.; Khmelnitskii, 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. – I. 11. – No. 3111.

DOI: 10.3390/nano11113111
[80] Ченцов С. И., Кривобок В. С., Николаев С. Н., Аминев Д. Ф., Онищенко Е. Е., Клоков А. Ю. Адресное лазерное воздействие на частичные дислокации в CdTe/Si при низкой температуре //Краткие сообщения по физике. – 2022. – №. 4. – С. 12-19.
DOI: 10.3103/S1068335622040029
[81] Sedov, V. S., Kuznetsov, S. V., Ralchenko, V. G., Mayakova, M. N., Krivobok, V. S., Savin, S. S., Zhuravlev, K. P., Martyanov, A. K., Romanishkin, I. D., Khomich, A. A., Fedorov, P. P., Konov, V. I. Diamond-EuF 3 nanocomposites with bright orange photoluminescence // Diamond and Related Materials. – 2017. – V. 72. – P. 47-52.
DOI: 10.1016/j.diamond.2016.12.022
[82] Bolshakov, A., Ralchenko, V., Sedov, V., Khomich, A., Vlasov, I., Khomich, A., Trofimov, N., Krivobok, V., Nikolaev, S., Khmelnitskii, R., Saraykin, V. Photoluminescence of SiV centers in single crystal CVD diamond in situ doped with Si from silane //physica status solidi (a). – 2015. – V. 212. – I. 11. – PP. 2525-2532.
DOI: 10.1002/pssa.201532174
[83] Sedov, V.; Boldyrev, K.; Krivobok, V.; Nikolaev, S.; Bolshakov, A.; Khomich, A.; Khomich, A.; Krasilnikov, A.; Ralchenko, V. SiV color centers in Si-doped isotopically enriched 12 C and 13 C CVD diamonds // Physica Status Solidi (a). – 2017. – V. 214. – I. 11. – No. 1700198.
DOI: 10.1002/pssa.201700198
[84] Ekimov E. A., Sherin P. S., Krivobok V. S., Lyapin S. G., Gavva V. A., Kondrin M. V. Photoluminescence excitation study of split-vacancy centers in diamond // Physical Review B. – 2018. – V. 97. – I. 4. – No. 45206.
DOI: 10.1103/PhysRevB.97.045206
[85] Sedov, V.; Martyanov, A.; Savin, S.; Bolshakov, A.; Bushuev, E.; Khomich, A.; Kudryavtsev, O.; Krivobok, V.; Nikolaev, S.; Ralchenko, V. Growth of polycrystalline and single-crystal CVD diamonds with bright photoluminescence of Ge-V color centers using germane GeH4 as the dopant source // Diamond and Related Materials. – 2018. – V. 90. – PP. 47-53.
DOI: 10.1016/j.diamond.2018.10.001

СПИСОК НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В данном разделе приведен список из 49 публикаций, включая 31 публикацию за последние 10 лет (2012-2022 гг.) в научных изданиях первого и второго квартилей, согласно международной базе Scopus. Публикации первого и второго квартилей дополнительно помечены как (Q1) и (Q2), соответственно.

A1. Bagaev, V. S., **Krivobok, V. S.**, Nikolaev, S. N., Novikov, A. V., Onishchenko, E. E., Zaitsev, V. V., Caldas, M. & Studart, N. Collective effects in SiGe/Si quantum wells //AIP Conference Proceedings. – American Institute of Physics. – **2010**. – V. 1199. – №. 1. – PP. 189-190. DOI:10.1063/1.3295361

A2. Bagaev V., **Krivobok V.**, Klevkov Y., Shepel A., Onishchenko E., Martovitsky V. High quality n-type CdTe produced by ultra-rapid crystallization //physica status solidi c. – **2010.** – V. 7. – №. 6. – PP. 1470-1472.
DOI:10.1002/pssc.200983163

A3. **(Q1)** 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 Si 1− x Ge x/Si quantum wells by steady-state and time-resolved photoluminescence measurements //Physical Review B. – **2010**. – V. 82. – №. 11. – no. 115313.
DOI:10.1103/PhysRevB.82.115313

A4. Багаев В.С., Клевков Ю.В., Колосов С.А., **Кривобок В.С.**, Онищенко Е.Е., Шепель А.А. Фотолюминесценция CdTe, выращенного при значительном отклонении от термодинамического равновесия//Физика и техника полупроводников. – **2011**. – Т. 45. – №. 7. – С. 908-915.
DOI:10.1134/S1063782611070025

A5. **(Q2)** Багаев В. С., **Кривобок В. С.**, Николаев С. Н., Онищенко Е. Е., Скориков М. Л., Новиков А. В., Лобанов Д. Н. Влияние барьера для электронов на конденсацию экситонов и спектр многочастичных

состояний в квантовых ямах SiGe/Si//Письма в ЖЭТФ. – **2011**. – Т. 94. – №. 1. – С. 63-67.
DOI: 10.1134/S0021364011130042
А6. **(Q2)** Багаев В.С., **Кривобок В.С.**, Онищенко Е.Е., Скориков М.Л., Шепель А.А. Резонансная спектроскопия донорных и акцепторных центров в компенсированном теллуриде кадмия //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – **2011**. – Т. 113. – №. 5. – С. 929-941.
DOI: 10.1134/S1063776111130024
A7. Adiyatullin A. F., **Krivobok V. S.**, Onishchenko E. E. The exciton luminescence in Zn (Cd) Se/ZnMgSSe quantum wells //Journal of Russian Laser Research. – **2012**. – V. 33. – №. 3. – P. 231-239.
DOI: 10.1007/s10946-012-9277-8
А8. (**Q2**). Адиятуллин А.Ф., Белых В.В., Козловский В.И., **Кривобок В.С.**, Мартовицкий В.П., Николаев С.Н. Влияние размытия гетерограницы на свойства экситонных состояний в квантовых ямах Zn(Cd)Se/ZnMgSSe // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – **2012.** – Т. 142. – № 5. – С. 1005-1019.
DOI: 10.1134/S1063776112090014
А9. (**Q2**). Багаев В.С., **Кривобок В.С.**, Николаев С.Н., Онищенко Е.Е., Пручкина А.А., Аминев Д.Ф., Скориков М.Л., Лобанов Д.Н., Новиков А.В. Динамика фазовых переходов в системе неравновесных носителей заряда в квантоворазмерных структурах $Si_{1-x}Ge_x/Si$ // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – **2013.** – Т. 144. – № 5. – С. 1045-1060.
DOI: 10.1134/S1063776113130074
A10. (**Q2**). Adiyatullin, A. F., Shevtsov, S. V., Sviridov, D. E., Kozlovsky, V. I., Pruchkina, A. A., Kuznetsov, P. I.; **Krivobok, V. S**. Effects of photoinduced charge redistribution on excitonic states in Zn(Cd)Se/ZnMgSSe quantum wells // Journal of Applied Physics. – **2013**. – V. 114. – I. 16. – No. 163524.
DOI: 10.1063/1.4827183
A11. (**Q2**). Пручкина А. А., **Кривобок В. С.**, Николаев С. Н., Онищенко Е. Е., Белов А. Г., Денисов Н. А., Меринов В. Н. Исследования комплексных акцепторов в CdTe:Cl методом

разностной спектроскопии// Письма в ЖЭТФ. – **2013.** – Т. 98. – № 8. – С. 508-512.
DOI: 10.1134/S0021364013210108
А12. Шевцов С.В., Адиятуллин А.Ф., Свиридов Д.Е., Козловский В.И., Кузнецов П.И., Николаев С.Н., **Кривобок В.С**. Фотоиндуцированное перераспределение заряда и его влияние на экситонные состояния в гетероструктурах Zn(Cd)Se/ZnMgSSe/GaAs с квантовыми ямами//Физика твёрдого тела. – **2014.** – Т. 56. – №. 4. – С. 769-778.
DOI: 10.1134/S1063783414040313
А13. (**Q2**). **Кривобок В. С.**, Николаев С. Н., Багаев В. С., Лебедев В. С., Онищенко Е. Е. Сверхизлучение вырожденного экситонного газа в полупроводниках с непрямым краем собственного поглощения// Письма в ЖЭТФ. – **2014.** – Т. 100. – № 5. – С. 343-348.
DOI: 10.1134/S0021364014170081
А14. Пручкина А.А., Николаев Н.С., **Кривобок В.С.**, Багаев В.С., Онищенко Е.Е., Клевков Ю.В., Колосов С.А. Влияние отжига в жидком кадмии на фотолюминесценцию поликристаллического CdTe, выращенного в неравновесных условиях// Физика и техника полупроводников. – **2014**. – Т. 48. – №. 3. – С. 308-314.
DOI: 10.1134/S106378261403021X
A15. Bagaev V. S., **Krivobok V. S.**, Nikolaev S. N., Novikov A. V., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A., Influence of Boron Selective Doping on the Edge Luminescence of SiGe/Si Quantum Wells //Journal of Russian Laser Research. – **2015**. – V. 36. – №. 1. – PP. 66-73.
DOI: 10.1007/s10946-015-9478-z
A16. (**Q2**). Bagaev V. S., **Krivobok V. S.**, Nikolaev S. N., Novikov A. V., Onishchenko E. E., Pruchkina A. A. Excitonic luminescence of SiGe/Si quantum wells δ-doped with boron // Journal of Applied Physics. – **2015.** – V. 117. – I. 18. – No. 185705.
DOI: 10.1063/1.4921103
A17. **(Q2)** Bolshakov, A., Ralchenko, V., Sedov, V., Khomich, A., Vlasov, I., Khomich, A., Trofimov, N., **Krivobok, V.**, Nikolaev, S., Khmelnitskii, R., Saraykin, V. Photoluminescence of SiV centers in single crystal CVD diamond in situ doped with Si from silane //physica status solidi (a). – **2015**. – V. 212. – I. 11. – PP. 2525-2532.

DOI: 10.1002/pssa.201532174

A18. (**Q2**). Багаев В.С., Давлетов Э.Т., **Кривобок В.С.**, Николаев С.Н., Новиков А.В., Онищенко Е.Е., Пручкина А.А., Скориков М.Л. Многочастичные состояния и факторы, осложняющие экспериментальное наблюдение квантовой когерентности в экситонном газе квантовых ям SiGe/Si // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – **2015.** – Т. 148. – № 6. – С. 1198-1214.

DOI: 10.1134/S106377611512002X

A19. (**Q2**). Krivobok, V. S.; Nikolaev, S. N.; Bagaev, V. S.; Pruchkina, A. A.; Onishchenko, E. E.; Kolosov, S. A.; Klevkov, Yu. V.; Skorikov, M. L. Electronic spectrum of non-tetrahedral acceptors in CdTe:Cl and CdTe:Bi,Cl single crystals // Journal of Applied Physics. – **2016.** – V. 119. – I. 5. – No. 055704.

DOI: 10.1063/1.4941026

A20. **Кривобок В.С.**, Денисов И.А., Можевитина Е.Н., Николаев С.Н., Онищенко Е.Е., Пручкина А.А., Силина А.А., Смирнова Н.А., Чернопицский М.А., Шматов Н.И. Примесно-дефектное излучение нелегированных монокристаллов Cd1-xZnxTe вблизи края собственного поглощения //Физика твёрдого тела. – **2016**. – Т. 58. – №. 5. – С. 950-960.

DOI: 10.1134/S1063783416050127

A21. **Krivobok, V.**, Nikolaev, S., Onischenko, E., Pruchkina, A., Kolosov, S., Klevkov, Y., Bagaev, V. Electronic spectrum of Bi-related defects in crystalline CdTe //physica status solidi (c). – **2016**. – V. 13. – I. 7-9. – PP. 481-485.

DOI:10.1002/pssc.201510274

A22. Bagaev, V., **Krivobok, V**., Nikolaev, S., Onischenko, E. & Pruchkina, A. Application of the difference spectroscopy for studying of complex acceptors in CdTe //physica status solidi (c). – **2016**. – V. 13. – I. 7-9. – PP. 477-480

DOI:10.1002/pssc.201510262

A23. (**Q2**). **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

ZnSe/ZnMgSSe// Письма в ЖЭТФ. – **2016.** – Т. 104. – № 2. – С. 108-113.
DOI: 10.1134/S0021364016150121
А24. (**Q2**). Кривобок В. С., Николаев С. Н., Новиков А. В., Шалеев М. В., Багаев В. С., Онищенко Е. Е., Лебедев В. С., Скориков М. Л., Уцина Е. В., Кочиев М. В. Плазмонное усиление интенсивности четырехчастичной излучательной рекомбинации в кремний-германиевых квантовых ямах// Письма в ЖЭТФ. – 2016. – Т. 104. – № 4. – С. 229-234.
DOI: 10.1134/S0021364016160086
А25. (**Q2**). Николаев С. Н., **Кривобок В. С.**, Багаев В. С., Онищенко Е. Е., Новиков А. В., Шалеев М. В. Тонкая структура излучения двумерной электронно-дырочной жидкости в SiGe/Si квантовых ямах// Письма в ЖЭТФ. – **2016.** – Т. 104. – № 3. – С. 161-166.
DOI: 10.1134/S0021364016160086
А26. (**Q1**). Sedov, V. S., Kuznetsov, S. V., Ralchenko, V. G., Mayakova, M. N., **Krivobok, V. S.**, Savin, S. S., Zhuravlev, K. P., Martyanov, A. K., Romanishkin, I. D., Khomich, A. A., Fedorov, P. P., Konov, V. I. Diamond-EuF 3 nanocomposites with bright orange photoluminescence // Diamond and Related Materials. – **2017.** – V. 72. – P. 47-52.
DOI: 10.1016/j.diamond.2016.12.022
А27. (**Q2**). Аминев Д. Ф., Клоков А. Ю., **Кривобок В. С.**, Николаев С. Н., Новиков А. В., Шарков А. И., Сибельдин Н. Н. Нагрев и испарение двумерной электронно-дырочной жидкости под действием тепловых импульсов// Письма в ЖЭТФ. – **2017.** – Т. 105. – № 3. – С. 164-169.
DOI: 10.1134/S0021364017030031
А28. (**Q1)** Shapiro B. I., Nekrasov A. D., **Krivobok V. S.**, Lebedev V. S., Optical properties of molecular nanocrystals consisting of J-aggregates of anionic and cationic cyanine dyes //Optics Express. – **2018**. – V. 26. – I. 23. – PP. 30324-30337.
DOI: 10.1364/OE.26.030324
А29. (**Q2**). Sedov, V.; Boldyrev, K.; **Krivobok, V.**; Nikolaev, S.; Bolshakov, A.; Khomich, A.; Khomich, A.; Krasilnikov, A.; Ralchenko, V. SiV color centers in Si-doped isotopically enriched 12 C and 13 C CVD

diamonds // Physica Status Solidi (a). – **2017.** – V. 214. – I. 11. – No. 1700198.
DOI: 10.1002/pssa.201700198
A30. (**Q2**) Shapiro B. I., Nekrasov A. D., Manulik E. V., Krivobok V. S., Lebedev V. S., Optical and photoelectric properties of multichromic cyanine dye J-aggregates // Quantum Electronics. – 2018. – V. 48. – I. 9. – no. 856.
DOI: 10.1070/QEL16758
A31. (**Q2**). 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.
DOI: 10.1134/S0021364018060097
A32. Chentsov S. I., Pruchkina A. A., **Krivobok V. S.** Isolated (Quantum) Emitters Generated with the Participation of Donor–Acceptor Pairs in the ZnSe/ZnMgSSe Heterostructure //Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – **2018**. – V. 82. – I. 4. – PP. 431-434.
DOI: 10.3103/S1062873818040056
A33. Pruchkina, A. A., **Krivobok, V. S.,** Nikolaev, S. N., Onishchenko, E. E., Chentsov, S. I., Chernopitssky, M. A., Velikovskiy, N. A., Anufrienko, O. D. & Skakov, Yu. A. New Type of Quantum Emitters Related to Dislocations in Crystalline CdZnTe Revealed by Laser-Based Spectroscopy //Journal of Russian Laser Research. – **2018**. – V. 39. – I. 3. – PP. 280-285.
DOI: 10.1007/s10946-018-9719-z
A34. (**Q2**). **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.
DOI: 10.1016/j.jlumin.2018.03.026
A35. (**Q1**). Sedov, V.; Martyanov, A.; Savin, S.; Bolshakov, A.; Bushuev, E.; Khomich, A.; Kudryavtsev, O.; **Krivobok, V.**; Nikolaev, S.; Ralchenko, V. Growth of polycrystalline and single-crystal CVD diamonds with bright photoluminescence of Ge-V color centers using

germane GeH4 as the dopant source // Diamond and Related Materials. – **2018.** – V. 90. – PP. 47-53.
DOI: 10.1016/j.diamond.2018.10.001
A36. Bagaev, V. S., **Krivobok, V. S.**, Chentsov, S. I., Onishchenko, E. E., Pruchkina, A. A., Nikolaev, S. N., Chernopitssky, M. A. & Litvinov, D. M. Separation of Quantum Emitters Produced by Single Donor–Acceptor Pairs Under Laser Excitation //Journal of Russian Laser Research. – **2019.** – V. 40. – I. 3. – PP. 274-279.
DOI: 10.1007/s10946-019-09802-7
A37. (**Q2**). Gladilin A., Chentsov S., Uvarov O., Nikolaev S., **Krivobok V.**, Kalinushkin V. Luminescence spatial characteristics of ZnSe:Fe // Journal of Applied Physics. – **2019.** – V. 126. – I. 1. – No. 015702.
DOI: 10.1063/1.5094954
A38. (**Q2**). **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. – P. 273-277.
DOI: 10.1016/j.jlumin.2019.04.062
A39. (**Q1). 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. – I. 23. – No. 232102.
DOI: 10.1063/1.5127259
A40. (**Q2**) С.Н. Николаев, М. А. Чернопицский, В. С. Багаев, **В. С. Кривобок**. Антистоксова люминесценция объемного β-InSe и его тонких пленок при оптическом ИК-возбуждении // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 112. – № 3. – С. 96-160.
DOI: 10.31857/S1234567820150033
A41. Васильченко А.А., **Кривобок В.С.**, Николаев С.Н., Багаев В.С., Онищенко Е.Е., Копытов Г.Ф. Спектр излучения и стабильность двух типов электронно-дырочной жидкости в мелких Si/Si1-xGexSi

квантовых ямах //Физика твёрдого тела. – **2020**. – Т. 62. – №. 4. – С. 529-536.
DOI:10.1134/S106378342004023X
А42. (**Q1**). **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. – I. 14. – No. 144103.
DOI: 10.1103/PhysRevB.101.144103
А43. (**Q1).** Klokov A. Y., **Krivobok V. S.**, Sharkov A. I., Tsvetkov V. A., Martovitskii V. P., Novikov A. V. Acoustic properties of strained SiGe/Si layers in the sub-terahertz frequency range // Applied Physics Letters. – **2020.** – V. 127. – I. 15. – No. 154304.
DOI: 10.1063/1.5129847
А44. (**Q2**). **Кривобок В. С.**, Колобов А. В., Димитриева С. Е., Аминев Д. Ф., Ченцов С. И., Николаев С. Н., Мартовицкий В. П., Онищенко Е. Е. Нестандартная кинетика низкотемпературной люминесценции микро- и нанопорошков антазной фазы диоксида титана// Письма в ЖЭТФ. – **2020.** – Т. 112. – № 8. – С. 501-507.
DOI: 10.1134/S0021364020200084
А45. (**Q1).** 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. – I. 2. – No. 210. DOI: 10.1364/OME.413374
А46. (**Q2**). **Кривобок В. С.**, Николаев С. Н., Багаев В. С., Ченцов С. И., Онищенко Е. Е., Пручкина А. А. Нестандартные особенности взаимодействия одиночных люминесцентных центров, сформированных ядрами частичных дислокаций в CdTe и ZnSe, с продольными оптическими фононами// Письма в ЖЭТФ. – **2021.** – Т. 114. – № 2. – С. 96-101.
DOI: 10.1134/S002136402114006X
А47. (**Q2**) Nikolaev, S. N.; Chernopitssky, M. A.; Bagaev, V. S.; **Krivobok, V. S.**; Onishchenko, E. E.; Savin, K. A.; Klokov, 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 - No. 117812 - p. 117812 DOI: 10.1016/j.jlumin.2020.117812

A48. (**Q1).** Ekimov, E. A.; **Krivobok, V. S.**; Kondrin, M. V.; Litvinov, D. A.; Grigoreva, L. N.; Koroleva, A. V.; Zazymkina, D. A.; Khmelnitskii, 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. – I. 11. – No. 3111.
DOI: 10.3390/nano11113111

A49. Ченцов С. И., **Кривобок В. С.**, Николаев С. Н., Аминев Д. Ф., Онищенко Е. Е., Клоков А. Ю. Адресное лазерное воздействие на частичные дислокации в CdTe/Si при низкой температуре //Краткие сообщения по физике. – **2022**. – №. 4. – С. 12-19.
DOI: 10.3103/S1068335622040029