

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

На правах рукописи

Шепель Денис Вячеславович

**Электронно-дырочная жидкость и экситонные молекулы
в низкоразмерных гетероструктурах Si/SiGe/Si**

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2012

Работа выполнена в Лаборатории физики неоднородных систем Отделения физики твёрдого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Бурбаев Тимур Маруанович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Днепровский Владимир Самсонович
(МГУ, Физический факультет)

кандидат физико-математических наук
Силин Андрей Павлович
(ФИАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Защита состоится _____ 2012 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, с авторефератом – на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан _____ 2012 г.

Отзывы на автореферат просим присылать по адресу: 119991 г. Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН, Отделение физики твёрдого тела.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук,
профессор

Шиканов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Имеется широкая область экспериментально почти неизученных проблем, связанных с межчастичными взаимодействиями в низкоразмерных экситонных и электронно-дырочных системах высокой плотности. Одним из наиболее ярких коллективных явлений, изученных в объемных полупроводниках, но практически неизученных в низкоразмерных системах, является конденсация экситонов в электронно-дырочную жидкость (ЭДЖ), впервые предсказанная Л. В. Келдышем [1]. ЭДЖ представляет собой макроскопическую квантовую ферми-жидкость, в которой почти свободные электроны и дырки удерживаются внутренними силами кулоновского происхождения. ЭДЖ обладает рядом необычных свойств, например, возможностью переноса энергии по кристаллической решетке без какого-либо ее нарушения; в ряде работ было высказано предположение, что ЭДЖ должна обладать сверхпроводимостью и сверхтекучестью. К середине 1980-х годов было выполнено большое число теоретических и экспериментальных работ по конденсации экситонов и установлены основные свойства ЭДЖ в объемных полупроводниках и, прежде всего, в германии и кремнии, где благодаря многодолинности электронного спектра стабильность жидкости высока и фазовый переход экситонный газ – ЭДЖ изучен наиболее полно (см. обзоры [2-6]).

Тема диссертационной работы состояла в исследовании основных характеристик этого фазового перехода в гетероструктурах Si/ Si_{1-x}Ge_x /Si с квазидвумерными слоями твердого раствора Si_{1-x}Ge_x. Предстояло выяснить, существует ли квазидвумерная ЭДЖ и, если существует, то каковы ее свойства. В литературе вплоть до последнего времени не имелось надежных сведений о наблюдении ЭДЖ в квантово-размерных структурах, хотя обнаружение этого явления имело бы существенный научный интерес для физики коллективных явлений в низкоразмерных электронно-дырочных системах. По аналогии с объемными полупроводниками следовало ожидать, что это явление следует искать в наноструктурах на основе гетеропары Si/Ge, в которых исследования должны быть наиболее информативными. Однако первой (и единственной до настоящей работы) гетеросистемой, в которой была обнаружена ЭДЖ, оказалась гетеросистема Si/SiO₂/Si I^o-го рода с квазидвумерным окисным слоем SiO₂, образующим на зонной диаграмме гетероструктуры квантовую яму (КЯ) [7, 8]. Гетеросистема Si/Si_{1-x}Ge_x/Si предоставляет более широкие экспериментальные возможности. В отличие от гетеросистемы Si/SiO₂/Si в гетероструктурах Si/Si_{1-x}Ge_x/Si для реализации раз-

мерного квантования возможно изменение не только ширины КЯ (то есть толщины $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ – слоя), но также и глубины КЯ, путем изменения состава x , определяющего величины разрыва зон на гетерогранице $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

Спектр возбуждений в гетероструктурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ изучен в мировой литературе весьма подробно при содержании Ge в слое $x > 0.1$. Однако данных о структурных и оптических свойствах структур с составом с $x < 0.1$ до начала выполнения диссертационной работы практически не было. В литературе до наших работ молчаливо предполагалось, что состав слоя со столь малым содержанием Ge не представляет интереса. Это оказалось не так. Квазидвумерная ЭДЖ, излучение квазидвумерных биэкситонов (в напряженных слоях), обнаружение экситонов локализованных на гетерогранице (в частично релаксированных слоях) были обнаружены нами именно в структурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ такого состава.

В работах [9, 10], выполненных в ФИАН-е до начала данной диссертационной работы, была обнаружена и исследована конденсация экситонов в ЭДЖ в напряженных $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слоях гетероструктур $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ($x \approx 0.05$). В этих работах толщина $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слоев d составляла 25-70 нм, то есть значительно превышала величину боровского радиуса экситона a_x (в объемном кремнии $a_x \approx 5$ нм). По этой причине наблюдавшаяся ЭДЖ была трехмерной и по своим свойствам практически не отличалась от ЭДЖ в объемном одноосно деформированном кремнии [2-6]. Таким образом, вопрос о существовании квазидвумерной ЭДЖ в наноструктурах на основе кремния и германия оставался открытым до начала выполнения диссертационной работы.

Кремний и соединения кремния с германием являются основными материалами современной наноэлектроники. Уменьшение толщины слоев в гетероструктурах на основе этих материалов до квантово-размерных величин, обусловленное потребностями практики, приводит к возникновению новых свойств, не наблюдавшихся или слабо проявляющихся в объемных материалах. Изучение этих свойств актуально для практических приложений.

Напряженный слой твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в кремниевой гетероструктуре образует довольно глубокую потенциальную яму для дырок в валентной зоне. Такие слои широко используются в кремниевой интегральной технологии, в частности, для создания высокочастотных гетеро-биполярных транзисторов, а также для создания p -канала КМОП – элементов интегральных схем. Несмотря на растущую важность для практики этих гетероструктур, в мировой научной литературе до сих пор встречаются противоречивые утверждения о величине и даже о знаке разрыва зоны проводимости на гетерогранице $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ (то есть

фактически о типе гетероструктуры). Исследование конденсации экситонов в слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при изменении x позволило в настоящей работе не только определить свойства ЭДЖ и условия ее образования в зависимости от состава слоя, но также получить дополнительные данные об экситонном спектре и типе гетероструктуры, что очевидно важно для разработки новых приборов нанoeлектроники. Действительно, если слой твердого раствора в $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ структуре образует потенциальную яму не только для дырок, но и для электронов, то экситоны в слое будут пространственно прямыми. Если же слой твердого раствора образует барьер в зоне проводимости, выталкивающий электроны в соседние слои Si , то будут образовываться пространственно непрямые экситоны. Пороговые характеристики по плотности возбуждения и температуре для образования ЭДЖ в этих двух случаях различны, что позволило определить знак разрыва зоны проводимости на гетерогранице $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$. Оказалось, что $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ гетероструктура при любой концентрации германия x является гетероструктурой II рода, в которой слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ образует барьер для электронов.

Цель диссертационной работы состояла в исследовании методом низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) энергетического спектра многочастичных возбуждений в наноструктурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с квазидвумерным слоем твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. В исследовании свойств и условий образования квазидвумерных электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ), электронно-дырочной плазмы (ЭДП) и биэкситонов в указанных структурах.

Для реализации этой цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Отработать технологию выращивания $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ гетероструктур, с толщиной слоев твердого раствора SiGe в диапазоне отвечающему переходу от трехмерного 3D к двумерному 2D случаю. С этой целью планировалось вырастить высококачественные структуры с толщиной d слоя SiGe от 70 нм ($d \gg a_x$) до 2 нм ($d < a_x$). Задача состояла в том, чтобы при примерно одинаковой глубине потенциальной ямы (для дырок), то есть при примерно одинаковом составе x , проследить изменение свойств ЭДЖ и ЭДП с уменьшением толщины слоя SiGe от величин 50-70 нм, вплоть до величин d , при которых энергия размерного квантования превышает характерные энергии Ферми для дырок в ЭДЖ или ЭДП. Тем самым, предполагалось решить одну из основных целей,- выяснить, существует ли двумерная ЭДЖ в $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ - наноструктурах.

2. Провести диагностику выращенных наноструктур с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ТЕМ), рентгеновской дифрактометрии, по спектрам ФЛ и комбинационного рассеяния света (КРС). По энергетическому

сдвигу линий спектра ФЛ при увеличении уровня возбуждения предполагалось определить тип структуры (ковариантный или контравариантный) при выбранном составе и напряжениях в слоях. По спектрам КРС предполагалось определить степень релаксации напряжений в тонких слоях SiGe.

Увеличение толщины слоя d , а также увеличение содержания Ge в слое, приводит к возрастанию напряжений несоответствия, обусловленных различием постоянных решеток подложки (Si) и слоя ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$). При заданной величине x повышение толщины приводит, начиная с некоторых значений d , сначала к возникновению незначительных структурных несовершенств, а при превышении некоторой критической толщины к появлению дислокаций несоответствия. Дислокации несоответствия открывают как излучательный, так и безызлучательный каналы рекомбинации и препятствуют увеличению плотности экситонов, необходимому для образования ЭДЖ при возбуждении. По этой причине основное внимание в работе уделено структурам с небольшим содержанием Ge, $x \leq 0.1$. Однако даже при $x \approx 0.1$, при толщине $d > 40$ нм, слой твердого раствора попадает в метастабильную область для упругой деформации и становится частично релаксированным. Одна из задач диссертационной работы состояла в изучении влияния несовершенств, вызванных напряжениями несоответствия, на оптические свойства и процесс зарождения ЭДЖ в таких структурах.

3. Методом низкотемпературной ФЛ исследовать поведение системы экситонный газ-ЭДЖ и изменение основных термодинамических параметров (плотности, критической температуры, энергии связи) жидкости при переходе от размерности 3D к 2D. В структурах, в которых конденсация сохранится в квантово-размерных слоях, исследовать параметры ЭДЖ и фазового перехода, критические параметры, переход ЭДЖ-ЭДП вблизи критической точки, влияние размерного квантования и внутренних напряжений на фазовый состав жидкости. В структурах, в которых ЭДЖ не будет наблюдаться в квантово-размерных слоях, выявить условия и, возможно, причины, вследствие которых отсутствует конденсация; изучить изменение электронного спектра структуры и свойств неравновесной электронно-дырочной системы (в том числе, экситонных) при уменьшении ширины квантовой ямы. Изучить влияние внутренних напряжений и межчастичных взаимодействий на эти свойства (в частности, на изменение разрыва зоны проводимости на интерфейсе и перестройку экситонного спектра).

Научная новизна работы:

Поставленные цели работы были полностью выполнены, получены следующие новые результаты:

1. В квантово-размерных SiGe-слоях гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x/Si с низким содержанием германия ($x < 0.09$) обнаружена квазидвумерная электронно-дырочная жидкость. Показано, что ЭДЖ состоит из квазидвумерных тяжелых дырок на уровнях размерного квантования в потенциальной яме валентной зоны SiGe-слоя и квазитрехмерных электронов из Δ_4 -долины зоны проводимости. Определена плотность такой квазидвумерной ЭДЖ, ее энергия связи по отношению к экситонному газу. Оценена критическая температура перехода экситонный газ-ЭДЖ. Показано, что газовая фаза состоит из экситонов и экситонных молекул. Квазидвумерная ЭДЖ была обнаружена методом спектроскопии фотолюминесценции как в ближней инфракрасной области спектра при одноэлектронных переходах, так и в видимой области. Фотолюминесценция в видимой области возникает при двухэлектронных переходах, возможных только в многочастичных возбужденных состояниях (биэкситоны, ЭДП, ЭДЖ) и является независимым доказательством наличия таких состояний.

2. На основании исследований экситонной системы при высоких уровнях возбуждения в гетероструктурах Si/Si_{1-x}Ge_x/Si с напряженными Si_{1-x}Ge_x-слоями толщиной от 2 нм до 70 нм и концентрацией германия 5-25 % показано, что указанная структура представляет собой гетероструктуру II-го рода с барьером для электронов в зоне проводимости и ямой для дырок в валентной зоне.

3. Установлены требования к зонным параметрам структуры, при выполнении которых возможно образование ЭДЖ и биэкситонов в квазидвумерных слоях гетероструктур II рода. Показано, что если барьер, образованный слоем SiGe в зоне проводимости, узкий и невысокий, волновая функция электронов проникает в него (барьер туннельно-прозрачный) и неравновесные электроны, также как и дырки оказываются в SiGe-слое, образуя пространственно-прямые экситоны, которые при увеличении плотности, при низких температурах, образуют ЭДЖ. В структурах этого типа при невысоком уровне накачки в температурном диапазоне $12\text{K} < T < 23\text{K}$ обнаружено излучение свободных биэкситонов.

4. Показано, что при увеличении высоты и ширины барьера в зоне проводимости барьер становится туннельно-непрозрачным. Электроны не могут проникнуть в слой SiGe и образуют с дырками пространственно непрямые экситоны с электронами, локализованными в Si-слое и дырками в слое SiGe. Аналога такой системе в объемных материалах нет, поэтому исследования возбуждений в

системе пространственно непрямых экситонов в гетероструктурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ являются новыми. В гетероструктурах с туннельно-непрозрачным барьером для электронов, при невысоком уровне возбуждения обнаружено излучение пространственно непрямых локализованных биэкситонов, которое наблюдалось вплоть до температуры 15 К. Показано, что вследствие диполь-дипольного отталкивания пространственно непрямых биэкситонов, они локализуются в потенциальных ямах, обусловленных неоднородностями состава в плоскости слоя и на гетерогранице. Определена энергия связи локализованных биэкситонов. Показано, что температура, при которой наблюдается излучение локализованных биэкситонов, зависит от характерных амплитуд случайного потенциала, обусловленного неоднородностями состава в плоскости слоя.

5. В структурах с туннельно-непрозрачным барьером для электронов, при низкой температуре и высоком уровне возбуждения, обнаружено излучение электронно-дырочной плазмы с пространственно разделенными электронами и дырками. ЭДП состоит из тяжелых дырок в слое SiGe и связанных с ними кулоновским взаимодействием электронов из Δ_4 - долин зоны проводимости кремния на гетерогранице Si/SiGe , в потенциальной яме, возникающей из-за искривления зон при высоком возбуждении. Форма линии излучения в этом случае описывается двумерной плотностью состояний, как для тяжелых дырок, так и для Δ_4 -электронов.

6. Методом рентгеновской дифрактометрии исследовано возникновение структурных несовершенств при изменении состава слоя твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0.05 < x < 0.3$) и его толщины ($2 < d < 70$ нм). Методом спектроскопии низкотемпературной фотолюминесценции исследовано изменение зонной диаграммы гетеронаноструктуры и экситонного спектра SiGe -слоя, вызванное этими несовершенствами. Показано, что сегрегация германия вдоль направления роста приводит к смещению экситонной линии в синюю область спектра при увеличении накачки. Показано, что образование на поверхности растущей плёнки волнистого рельефа, гребни которого обогащены германием, приводит к расщеплению экситонной линии. Показано также, что в таких структурах, при определенных режимах роста и при превышении критической толщины слоя для упругой деформации, в метастабильной области, частичная релаксация напряжений происходит не на гетерогранице подложка/слой SiGe , а на гетерогранице слой SiGe /защитный (сар) кремниевый слой. В спектрах ФЛ при этом обнаружено излучение локализованных на гетерогранице SiGe/Si - (сар) экситонов с пространственно разделенными электронами и дырками.

Научная и практическая значимость работы:

Исследован спектр многочастичных возбуждений в Si/SiGe/Si наноструктурах с квазидвумерными слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ в диапазоне толщин 2-70 нм и концентраций германия 5-25%.

Экспериментально показано существование квазидвумерной ЭДЖ и определены ее основные термодинамические параметры: плотность, критическая температура, энергия связи относительно экситонов. Исследованы условия ее возникновения в структурах с квантовыми ямами с различными параметрами.

В гетероструктурах Si/SiGe/Si обнаружено образование биэкситонов. Определена энергия связи локализованного биэкситона относительно экситона.

В структурах с туннельно-непрозрачным барьером обнаружена ЭДП с пространственно разделенными электронами и дырками.

Все эти результаты имеют существенное значение для физики конденсированного состояния вещества.

Результаты, приведенные в работе весьма важны также для практических приложений. Напряженные слои твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выращенные на Si, широко используются в кремниевой интегральной технологии для создания *p*-канала в элементах интегральных схем. Уточнение зонной диаграммы Si/Si_{1-x}Ge_x/Si структуры при малом содержании Ge в слое, сделанное в настоящей работе, несомненно, важно при разработке приборов кремниевой наноэлектроники.

Положения, выносимые на защиту:

- Показано, что в квазидвумерных гетероструктурах Si/Si_{1-x}Ge_x/Si с туннельно-прозрачным барьером в зоне проводимости образуется электронно-дырочная жидкость (ЭДЖ), состоящая из квазидвумерных тяжелых дырок на уровнях размерного квантования в потенциальной яме валентной зоны SiGe-слоя и квазитрехмерных электронов из Δ_4 - долины зоны проводимости.

Основные термодинамические параметры ЭДЖ : концентрация электронов в жидкости $n_0 = 4.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, концентрация дырок – $p_0 = 8.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; работа выхода экситонов из ЭДЖ – 3 мэВ; критическая температура – 18 – 20 К.

Показано, что в структурах с туннельно-прозрачным барьером газовая фаза состоит из экситонов и экситонных молекул (свободных биэкситонов).

- Показано, что гетероструктура Si/Si_{1-x}Ge_x/Si при концентрациях германия от 5 до 30% является гетероструктурой II рода с барьером в зоне проводимости, образованным слоем твердого раствора.

- Установлены требования к зонным параметрам структуры, при выполнении которых возможно образование ЭДЖ и биэкситонов в квазидвумерных слоях гетероструктур II рода. Показано, что если барьер, образованный слоем SiGe в зоне проводимости, туннельно-прозрачный, то и неравновесные электроны, также как и дырки оказываются в SiGe- слое, образуя пространственно-прямые экситоны, которые при увеличении плотности, при низких температурах, образуют ЭДЖ.

- В структурах с туннельно-непрозрачным барьером, при частичном проникновении электронной волновой функции в слой твердого раствора, при низкой температуре и невысоком уровне возбуждения, образуются локализованные пространственно непрямые биэкситоны. Энергия связи пространственно непрямых локализованных биэкситонов оказалась равной 2 мэВ.

- В структурах с туннельно-непрозрачным барьером для электронов, при низкой температуре и высоком уровне возбуждения, обнаружено излучение электронно-дырочной плазмы с пространственно разделенными электронами и дырками. ЭДП состоит из тяжелых дырок в слое SiGe и связанных с ними кулоновским взаимодействием электронов из Δ_4 - долин зоны проводимости кремния на гетерогранице Si/SiGe, в потенциальной яме, возникающей из-за искривления зон при высоком возбуждении. Форма линии излучения в этом случае описывается двумерной плотностью состояний, как для тяжелых дырок, так и для Δ_4 -электронов.

- Найдено, что при определенных режимах роста структур, при превышении критической толщины слоя для упругой деформации, в метастабильной области, частичная релаксация напряжений происходит не на гетерогранице подложка/слой SiGe, а на гетерогранице слой SiGe/защитный (cap) кремниевый слой. В спектрах ФЛ при этом присутствует излучение локализованных на гетерогранице SiGe/Si-(cap) экситонов с пространственно разделенными электронами и дырками.

Личный вклад автора в получение результатов:

Диссертация представляет итог самостоятельной работы автора, обобщающий полученные им и в соавторстве результаты. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке методик проведения экспериментальных исследований, проведении эксперимента, а также обработке и обсуждении полученных результатов.

Апробация работы:

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ФИАН, а также на следующих российских и международных конференциях:

- 13 Национальная конференция по росту кристаллов, НККР-2008. Москва, 2008;
- XII Школа молодых учёных «Актуальные проблемы физики». Звенигород, 2008;
- 10-ая Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург, 2008;
- IX Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 2009;
- 11-ая Всероссийская молодёжная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. Санкт-Петербург, 2009;
- Всероссийская конференция «Влияние атомно-кристаллической и электронной структуры на свойства конденсированных сред», посвященная памяти академика Ю.А. Осипьяна. Черноголовка, 2009;
- 10th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors, Paderborn (Germany), 2010;
- 15-ый Международный Симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника”. Нижний Новгород, 2011;
- International Conference “Functional Materials”, ICFM’2011. Partenit (Ukraine), 2011.

Публикации:

По теме диссертации опубликовано 13 работ, включая 3 статьи в реферируемых журналах и 10 публикаций в материалах конференций.

Структура и объём диссертации:

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объём диссертации составляет ___ страницы, включая ___ рисунков и ___ таблицы. Список цитированной литературы включает ___ наименования, список работ автора по теме диссертации - 12 наименований.

Основное содержание работы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, показана её научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы, представлены сведения о структуре и содержании работы, а также приведены положения, выносимые на защиту. Кратко излагается содержание диссертации.

Глава 1 обзорная, в ней представлен анализ современного состояния исследований явления конденсации экситонов в ЭДЖ, а также данные о структурных и оптических свойствах объемных кремния и германия и гетероструктур на их основе. Освещён вопрос об исследовании экситонных молекул в кремнии и германии. Глава завершается анализом нерешенных к началу выполнения работы вопросов по теме диссертации и вытекающей из этого анализа постановкой задач.

Главе 2 посвящена результатам исследования методом низкотемпературной фотолюминесценции энергетического спектр неравновесных носителей в Si/SiGe/Si структурах с толщиной слоёв SiGe отвечающими переходу от трехмерного 3D к двумерному 2D случаю (толщины плёнок составляли 10-70 нм). Данные ФЛ сопоставлялись с данными рентгеноструктурного анализа.

Параграф 2.1. представляет собой описание образцов и экспериментальных методик, использовавшихся в данной работе. Он включает в себя описание метода молекулярно-пучковой эпитаксии – основного метода при создании гетероструктур, метода спектроскопии низкотемпературной фотолюминесценции в ближней инфракрасной области – основного метода исследования оптических свойств образцов, а также (кратко) методов рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. В этом же параграфе представлены основные структурные данные исследуемых образцов и дано подробное описание экспериментальной установки низкотемпературной фотолюминесценции.

В **Параграфе 2.2.** представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие влияние структурных несовершенств, возникающих при гетероэпитаксиальном росте напряженного SiGe-слоя наноструктуры Si/SiGe/Si, на ее оптические свойства. Увеличение толщины слоя $Si_{1-x}Ge_x$ при его псевдоморфном росте на ненапряжённом кремниевом буферном слое приводит к увеличению напряжений несоответствия в слое твёрдого раствора, вызывающих появление структурных несовершенств. Так, даже при малой концентрации $x = 0.1$, критическая толщина слоя, при которой он становится полностью или частично релаксированным равна 40 нм (см. рисунок 1). Механизмы релаксаций напряже-

ний при $x < 0.1$ малоизучены. Также малоизучены оптические и структурные свойства наноструктур в метастабильной области при частичной релаксации слоя. Обычная ситуация состоит в том, что начиная с некоторой критической толщины слоя релаксация напряжений происходит путем образования дислокаций на гетерогранице Si-буферный слой/слой SiGe, с дальнейшим прорастанием дислокаций в слой при увеличении его толщины.

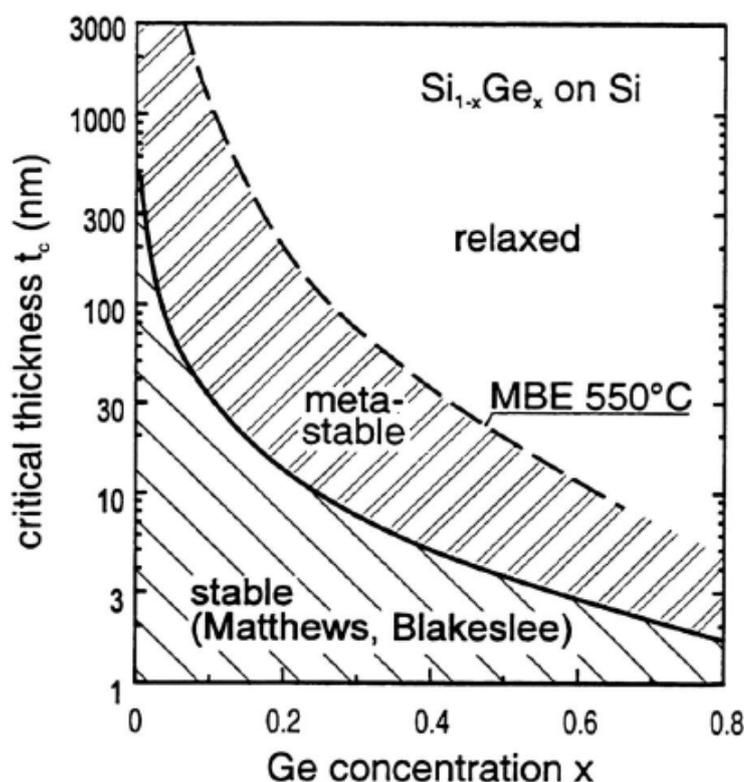


Рис.1. Зависимость критической толщины слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, выращенного на кремнии (100), от содержания германия.

Экспериментальное исследование образцов проводилось методами спектроскопии низкотемпературной ФЛ в ближней инфракрасной области, рентгеноструктурной дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии и комбинационного рассеяния света. Показано, что сегрегация германия по толщине слоя твёрдого раствора приводит к сдвигу линии фотолуминесценции в область с большей энергией, а флуктуации состава вдоль плоскости роста приводят к расщеплению экситонной линии на две составляющие (рисунок 2).

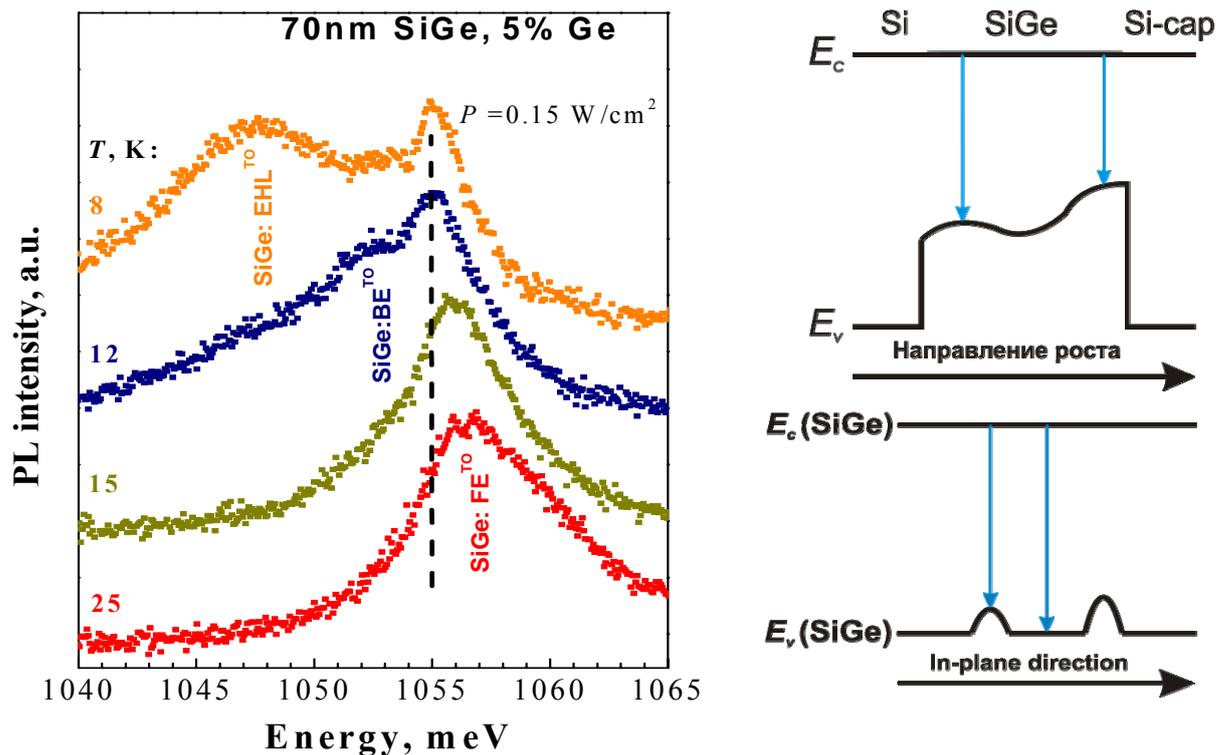


Рис.2. Слева: температурная зависимость спектров ФЛ образца с гетероструктурой Si/SiGe/Si (толщина – 70 нм, концентрация Ge – 5 %) при фиксированной плотности возбуждения. На рисунке представлены ТО-компоненты следующих линий: SiGe:FE-TO – линия излучения свободного экситона из слоя SiGe, SiGe:BE-TO – линия излучения связанного экситона из слоя SiGe, SiGe:EHL – линия излучения ЭДЖ из слоя SiGe. Мощность накачки фиксирована. Справа: схематическое изображение зонной диаграммы исследуемых гетероструктур с указанием переходов.

В **Параграфе 2.3.** показаны результаты исследования структурных и оптических свойств наногетероструктур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ ($x < 0.1$) с частично релаксированными слоями твердого раствора. Обнаружено, что из-за частичной релаксации на гетерогранице твёрдый раствор/cap-слой в спектрах фотолюминесценции из слоя присутствуют две линии – свободный экситон и локализованный на гетерогранице непрямой в пространстве экситон. С увеличением мощности накачки линия локализованного экситона испытывает смещение в коротковолновую область спектра, а линия свободного экситона нет. Это явление обнаружено для образца с толщиной слоя твёрдого раствора 45 нм и концентрацией германия в 10%.

В **Главе 3** представлены основные результаты работы, полученные для квазидвумерных напряженных слоёв SiGe квантово-размерных гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x/Si толщиной слоя менее 5 нм и при концентрациях германия от 9 до 25%. В ходе экспериментов была обнаружена квазидвумерная ЭДЖ, и определены ее основные термодинамические характеристики. В **Параграфе 3.1.** приведены результаты исследования электронно-дырочной жидкости для образцов с толщинами $d \gg a_x$ слоями SiGe. Излучение ЭДЖ обладает в таких структурах рядом особенностей, отличающей её по значению термодинамических параметров от ЭДЖ в трёхмерном (объёмном случае). В частности, порог образования ЭДЖ в напряжённой гетероструктуре существенно ниже, чем в объёмном Si. Параметры и поведение ЭДЖ в гетерослоях больше соответствуют ЭДЖ в одноосно сжатом трёхмерном кристалле Si. В **Параграфе 3.2.** представлены экспериментальные данные низкотемпературной фотолюминесценции для гетероструктур с квантово-размерным слоем (КЯ), полученные в ближней инфракрасной области спектра. В образце с узкой и не высокой КЯ (2 нм и 9%) обнаружено излучение ЭДЖ (рисунок 3).

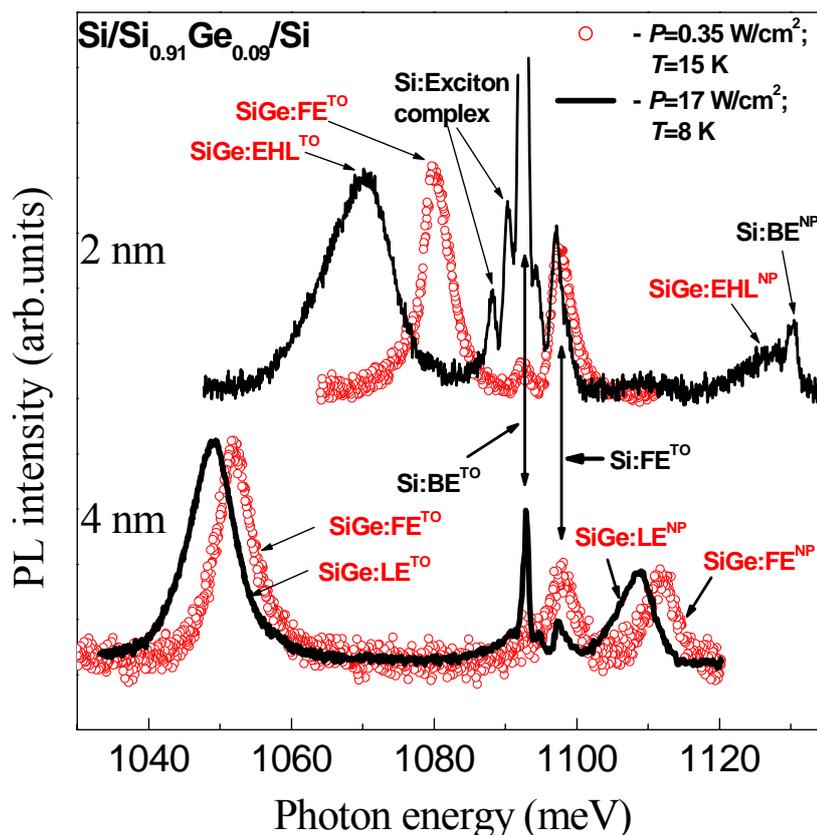


Рис.3. Сравнение спектров НТФЛ двух гетероструктур с одинаковым содержанием германия (9%), но с различной толщиной слоя Si_{1-x}Ge_x (2 и 4 нм).

На рисунке представлены следующие линии объёмного Si: Si:BE^{TO} – ТО-компонента линии связанного экситона, Si:FE^{TO} – ТО-компонента линии свободного экситона, Si:BE^{NP} – бесфононная линия связанного экситона, Si:Exiton complex – примесно-экситонный комплекс из гетероструктуры SiGe:FE^{NP} – бесфононная компонента линии свободного экситона, SiGe:FE^{TO} – ТО-компонента свободного экситона, SiGe:LE^{NP} – бесфононная компонента линии локализованного экситона, SiGe:LE^{TO} – ТО-компонента линии локализованного экситона, SiGe:EHL^{NP} – бесфононная линия ЭДЖ, SiGe:EHL^{TO} – ТО-компонента линии ЭДЖ.

Для образцов с толщиной слоя более 2 нм или высотой барьера более 10% линия излучения ЭДЖ не обнаружена.

Параграф 3.3. представляет собой подробное описание метода расчёта формы кривой ЭДЖ в спектрах ФЛ. Для расчёта формы кривой используется модель, включающая комбинированную плотность состояний для электронов и дырок. Для линии ЭДЖ в квантово-размерных структурах в работе была использована двумерная плотность состояний для дырок и трёхмерная для электронов – такой выбор даёт максимальное совпадение экспериментальной и расчётной кривых. На основании анализа были определены основные термодинамические параметры квазидвумерной ЭДЖ – концентрации носителей и энергия связи (они составили: $n_0 = 4.8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $p_0 = 8.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и 3 мэВ, соответственно).

В **Параграфе 3.4.** дано качественное описание процесса четырёхчастичной фотолюминесценции и представлены экспериментальные данные, полученные методом низкотемпературной ФЛ в видимой области спектра. При таком методе исследования на спектрах фотолюминесценции отсутствуют линии двухчастичных процессов – свободных и связанных экситонов, присутствуют только линии экситонных молекул и линии излучения коллективных состояний носителей. Экспериментальная информация, полученная методом, четырёхчастичной люминесценции представляют собой независимое доказательство существования ЭДЖ в структурах с туннельно-прозрачным барьером.

Глава 4 посвящена исследованию экситонных молекул в образцах с квантовыми ямами в ближней инфракрасной и видимой областях спектра. Было обнаружено, что в образцах с туннельно-прозрачным барьером в зоне проводимости в газовой фазе присутствует значительная парциальная доля свободных биэкситонов. Тогда как в образцах с частично-прозрачным барьером присутствуют локализованные биэкситоны. На основании полученной информации предложен

метод практического применения полученных результатов для анализа однородности слоя твердого раствора.

В Параграфе 4.1. представлены экспериментальные данные об обнаружении биэкситонов в образцах с КЯ в инфракрасной области спектра. В объёмном кремнии линия биэкситона довольно сложна для наблюдения, – по сравнению с экситонными линиями она имеет крайне слабую интенсивность. Кроме того, в объёмном материале при больших мощностях возбуждения линия биэкситонов быстро насыщается из-за конденсации экситонов в ЭДЖ. Наиболее успешно биэкситоны в объёмном кремнии наблюдались при одноосной деформации кристалла. Гетероструктуры $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ представляют значительно больше экспериментальных возможностей для наблюдения экситонных молекул: поля механических напряжений несоответствия в гетероструктуре действуют аналогично одноосному сжатию объёмного материала, кроме того, при соблюдении определённых параметров гетероструктуры в ней не образуется ЭДЖ, что даёт возможность наблюдать линию биэкситонов независимо. В исследуемых в данной работе гетероструктурах биэкситоны наблюдались в диапазоне температур от 1.8 до 18 К (в ИК-области). Из анализа спектров произведена оценка энергии связи локализованного биэкситона, которая составила 2 мэВ.

Параграф 4.2. включает данные об экспериментальном исследовании биэкситонов в видимой области спектра при четырёхчастичной рекомбинации (см. рисунок 4).

В Параграфе 4.3. предложен метод анализа однородности поверхности слоя твёрдого раствора SiGe , основанный на наблюдении линии локализованного биэкситона. Для образования локализованных биэкситонов необходимы флуктуации состава германия на гетерогранице SiGe/Si . Поэтому качество гетерограницы напрямую влияет на возможность наблюдения линии биэкситонов. Соответственно для образцов с высоким качеством гетероперехода линия биэкситонов вообще не наблюдается. Таким образом, по наличию и спектральным параметрам линии биэкситона можно сделать вывод о совершенстве структуры. Проведено сравнение спектров низкотемпературной ФЛ в ИК области для образцов с идентичными параметрами, но выращенных на разных установках (соответственно с разным качеством гетерограницы).

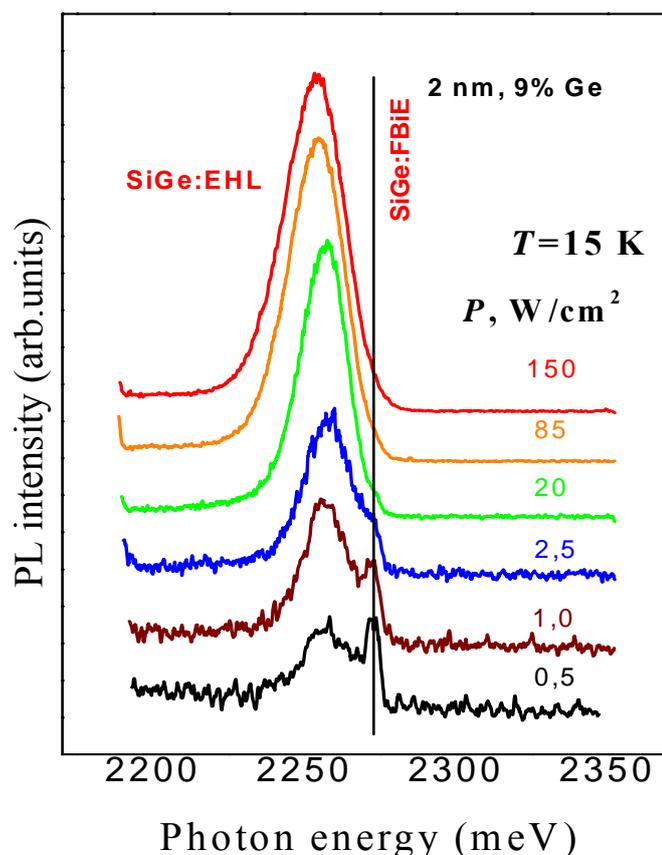


Рис.4. Спектры фотолюминесценции в видимой области образца с толщиной КЯ 2 нм и концентрацией германия 9%, измеренные при $T=15\text{K}$ и при различных плотностях возбуждения. Линии на рисунке: SiGe:EHL – линия ЭДЖ из слоя, SiGe:FBiE – линия свободного биэкситона из слоя твердого раствора.

В **Заключении** представлены основные результаты работы.

Основные результаты работы диссертационной работы:

- Показано, что сегрегация германия по направлению роста и неоднородности состава в плоскости роста приводят к образованию потенциального рельефа в зонной диаграмме, вследствие которого экситонная линия ФЛ в слое SiGe сдвигается в синюю сторону спектра с повышением температуры. Волнистые искажения поверхности роста приводят к тому, что в спектрах экситонной ФЛ различаются две линии, отвечающие излучательным переходам в полностью напряженном SiGe слое и в гребнях волн с повышенным содержанием Ge. Показано также, что при опре-

деленных режимах роста, при превышении критической толщины слоя для упругой деформации, в метастабильной области, частичная релаксация напряжений происходит не на гетерогранице подложка/слой SiGe, а на гетерогранице слой SiGe/защитный (cap) кремниевый слой. В спектрах ФЛ при этом обнаружено излучение локализованных на гетерогранице SiGe/Si-(cap) экситонов с пространственно разделенными электронами и дырками.

- При низких температурах в широком диапазоне интенсивностей возбуждения исследованы спектры ФЛ гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x/Si II рода с квазидвумерными ($d < a_x$) напряженными SiGe-слоями. Обнаружено, что в туннельно прозрачных для электронов SiGe-слоях при достаточно высоких уровнях возбуждения образуется ЭДЖ, которая состоит из электронов, заселяющих Δ_4 -долины зоны проводимости, и квазидвумерных тяжелых дырок в квантовой яме. Определены основные термодинамические параметры ЭДЖ.

- В гетероструктурах Si/Si_{1-x}Ge_x/Si с туннельно-прозрачным барьером для электронов обнаружено излучение квазидвумерной ЭДЖ и свободных биэкситонов в желто-зеленой области спектра, возникающей при двухэлектронных переходах. Эти результаты дают новое независимое доказательство образования, квазидвумерной ЭДЖ в указанных гетероструктурах. В гетероструктурах с невысокой туннельной прозрачностью барьера для электронов в зоне проводимости обнаружено излучение пространственно не прямых локализованных биэкситонов, которое наблюдалось вплоть до температуры 15 К. Температура, при которой наблюдается излучение, зависит от характерных амплитуд случайного потенциала, обусловленного неоднородностями состава в плоскости слоя. Из сопоставлений спектров в БИК и видимой области определена энергия связи пространственно не прямых локализованных биэкситонов, которая оказалась равной 2 мэВ.

- В структурах с туннельно-непрозрачным барьером для электронов, при низкой температуре и высоком уровне возбуждения P , обнаружено излучение электронно-дырочной плазмы с пространственно разделенными электронами и дырками. ЭДП состоит из тяжелых дырок в слое SiGe и связанных с ними кулоновским взаимодействием электронов из Δ_4 -долин зоны проводимости кремния на гетерогранице Si/SiGe, в потенциальной яме, возникающей из-за искривления зон при высоком возбужде-

нии. Форма линии излучения в этом случае описывается двумерной плотностью состояний, как для тяжелых дырок, так и для Δ_4 -электронов. В спектрах ФЛ в видимой области, обусловленной четырёхчастичной рекомбинацией, появление ЭДП с ростом уровня возбуждения P обнаруживается по значительному уширению длинноволнового крыла спектральной линии локализованного биэкситона. Зависимость интенсивности ФЛ биэкситонной линии от величины P при этом становится сублинейной.

- На основании исследований экситонной системы при высоких уровнях возбуждения в гетероструктурах $\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ с напряженными $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -слоями толщиной от 2 нм до 70 нм и концентрацией германия 5-25% показано, что указанная структура представляет собой гетероструктуру II-го рода с барьером для электронов в зоне проводимости и ямой для дырок в валентной зоне.

Список работ автора по теме диссертации:

1. Т. М. Бурбаев, М. Н. Гордеев, Д. Н. Лобанов, А. В. Новиков, М. М. Рзаев, Н. Н. Сибельдин, М. Л. Скориков, В. А. Цветков, Д. В. Шепель. "Электронно-дырочная жидкость и экситонные молекулы в квазидвумерных SiGe-слоях гетероструктур Si/SiGe/Si". Письма в ЖЭТФ. 92 341 (2010).
2. Д.В. Шепель, Н.С. Пташкин и Т.М. Бурбаев. "Конденсация экситонов в квазидвумерных SiGe-слоях гетероструктур Si/Si_{1-x}Ge_x/Si." Научно-технические ведомости СПбГПУ №3 (2010).
3. Denis Shepel, Timur Burbaev, Nikolai Sibeldin, and Mikhail Skorikov. Quasi-two-dimensional electron-hole liquid and biexcitons in SiGe layers of Si/SiGe/Si heterostructures. Physica Status Solidi B, 248, No.4 (2011).

Тезисы конференций:

1. Т.М. Бурбаев, В.П. Мартовицкий, М.М. Рзаев, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков, Д.В.Шепель. Влияние структурных несовершенств, возникающих при гетероэпитаксиальном росте SiGe-слоя наноструктуры Si/SiGe/Si, на ее оптические свойства. Тезисы докладов 13 Национальной конференции по росту кристаллов, НККР-2008, Москва, 17-22 ноября 2008, стр.379.

2. Т.М. Бурбаев, В.П. Мартовицкий, М.М. Рзаев, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков, Д.В.Шепель. Влияние структурных несовершенств, возникающих при гетероэпитаксиальном росте SiGe-слоя наноструктуры Si/SiGe/Si, на ее оптические свойства. Тезисы докладов XII Школы молодых учёных «Актуальные проблемы физики», г. Звенигород, 23-27 ноября 2008, стр. 83-84.
3. Д.В. Шепель, Т.М. Бурбаев. Каналы рекомбинации и переход Мотта в системе экситонов в тонких SiGe-слоях наноструктур на основе кремния. Тезисы докладов 10-ой Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой оптики и наноэлектронике. Санкт-Петербург, 1-5 декабря 2008 г., стр.48.
4. Т.М. Бурбаев, М.Н. Гордеев, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, Н.С. Пташкин, М.М. Рзаев, Н.Н. Сибельдин, В.А. Цветков, Д.В. Шепель, "Электронно-дырочная жидкость в SiGe-слоях гетероструктур Si/SiGe/Si". Тезисы докладов 9 российской конференции по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 28 сентября - 3 октября 2009 г., стр. 76.
5. Д.В. Шепель, Т.М. Бурбаев. Конденсация экситонов в квазидвумерных слоях SiGe кремниевых гетероструктур. Тезисы докладов 11 всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур. Санкт-Петербург, 30 ноября - 4 декабря 2009 г., стр. 46.
6. Н.Н. Сибельдин, Д.В. Шепель. «Исследование морфологии и электронного спектра наногетероструктур с системами кремниевых квантовых ям и квантовых точек на «виртуальных» германиевых подложках». Тезисы докладов Всероссийской конференции «Влияние атомно-кристаллической и электронной структуры на свойства конденсированных сред», посвященная памяти академика Ю.А. Осипьяна. Черноголовка, 24-27 ноября 2009 г., Проект А49.
7. Шепель Д.В., Гордеев М.Н., Пташкин Н.С. и Бурбаев Т.М. Электронно-дырочная жидкость и биекситоны в квазидвумерных слоях SiGe кремниевых наноструктур. Сборник трудов 13-ой Школы Молодых Учёных. г. Звенигород-Москва, 14-19 ноября 2010 г. Стр. 257-259.
8. Denis Shepel, Timur Burbaev, Nikolai Sibeldin, and Mikhail Skorikov. Quasi-two-dimensional electron-hole liquid and biexcitons in SiGe layers of Si/SiGe/Si heterostructures. 10th International Workshop on Nonlinear Optics and Excitation Kinetics in Semiconductors. Paderborn, Germany, August 16 - 19, 2010. Page 35.

9. Burbaev T.M., Shepel D.V., Sibeldin N.N., and Skorikov M.L. Quasi-two-dimensional electron–hole liquid and biexcitons in SiGe layers of Si/SiGe/Si heterostructures. International Conference “Functional Materials”/ ICFM-2011/ Ukraine, Partenit, October 3-8, page 324.
10. Т.М. Бурбаев, А.В. Новиков, Н.Н. Сибельдин, М.А. Скориков, Д.В. Шепель. Люминесценция электронно-дырочной жидкости и биэкситонов в квазидвумерных SiGe-слоях кремниевых гетероструктур в видимой области спектра. Труды 15-го Международного Симпозиума “Нанопизика и наноэлектроника”. Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 г., с.66-67.

Список цитированной в автореферате литературы:

- [1] Л.В. Келдыш, *Труды 9-ой международной конференции по физике полупроводников*, Москва, 1968, Л.: Наука, 1969, стр.1384.
- [2] T.M. Rice, J.C. Hensel, T.G. Fillips, and G.A. Thomas, *Solid State Physics*. 32, Academic Press, New York (1977).
- [3] The Electron-Hole Drops in Semiconductors, in: *Modern Problems in Condensed Matter Sciences*, 6, Eds. C.D. Jeffries and L.V. Keldysh, Amsterdam: North-Holland, 1983.
- [4] L.V. Keldysh and N.N. Sibeldin. *Ibid*, 16, Eds. W. Eisenmenger and A.A. Kaplyanskii, 1986, p.455-686.
- [5] С.Г. Тиходеев. *УФН*, **145**, 3 (1985).
- [6] N.N. Sibeldin. Electron-hole liquid in semiconductors, in *Problems of Condensed Matter Physics: Quantum coherence phenomena in electron-hole and coupled matter-light systems*, Eds. A.L. Ivanov and S.G. Tikhodeev, International Series of Monographs on Physics 139, p.227-257, Oxford University Press, 2008.
- [7] N. Pauc, V. Calvo, J. Eymery et al., *Phys. Rev. Lett.* 92, 236802-1 (2004).
- [8] N. Pauc, V. Calvo, J. Eymery et al., *Phys. Rev. B* 72, 205324 (2005).
- [9] T. M. Burbaev, E. A. Bobrik, B. A. Kurbatov et al, *JETP Letters*, 85, 331 (2007).
- [10] T. M. Burbaev, V. S. Bagaev, E. A. Bobrik et al, *Thin Solid Films*, 517, 55 (2008).