

**Абрамкин Д.С.* , Бакаров А.К., Петрушков М.О., Емельянов Е.А.,
Путято М.А., Преображенский В.В., Семягин Б.Р., Есин М.Ю.,
Кожухов А.С., Гутаковский А.К., Шамирзаев Т.С.**

Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова,
Россия, г. Новосибирск, *e-mail: dalamber.07@mail.ru

НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ: ФОРМИРОВАНИЕ, КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

В работе обсуждаются полупроводниковые низкоразмерные АЗ-В5 гетероструктуры с энергетическим спектром нового типа – первого рода с непрямой запрещённой зоной. Разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов в таких структурах ведёт к увеличению времени жизни локализованных экситонов вплоть до сотен микросекунд. Это делает возможным исследование процессов, изучение которых в прямозонных системах с малым временем жизни (~ 1 нс) затруднено, например спиновой релаксации экситонов в квантовых точках (КТ). Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Кристаллическое строение гетероструктур исследовано с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии. Энергетическое строение структур изучено при помощи спектроскопии стационарной и время разрешённой фотолюминесценции. Экспериментальные данные дополнены расчётами. В результате было показано, энергетический спектр первого рода и непрямой запрещённой зоной реализуется в структурах с GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ, механические напряжений в которых полностью релаксировали, а также с псевдоморфно напряжёнными III-Sb/AlAs квантовыми ямами.

Ключевые слова: квантовые точки, квантовые ямы, энергетическое строение первого рода, непрямая запрещённая зона, экситон, спиновая релаксация, длительное время жизни.

Abramkin D.S.* , Bakarov A.K., Petrushkov M.O., Emelyanov E.A.,
Putyato M.A., Preobrazhensky V.V., Semyagin B.R., Yesin M.Yu.,
Kozhukhov A.S., Gutakovskii A.K., Shamirzaev T.S.

A.V. Rzhanov Institute of semiconductor physics of Siberian Branch of Russian Academy of Science,
Russia, Novosibirsk, *e-mail: dalamber.07@mail.ru

Novel semiconductor low-dimensional heterostructures: formation, crystal structure and energy spectrum

Semiconductor low-dimensional III-V heterostructures with novel energy spectrum of type-I and indirect bandgap are discussed in the paper. Charge carriers separation in reciprocal space for these structures results in localized exciton lifetime rising up to hundreds of microseconds. This is allow to investigate processes which are hard to study in direct bandgap systems with fast lifetime (~ 1 ns), for example exciton spin relaxation in quantum dots (QDs). The heterostructures were grown by molecular-beam epitaxy technique. Crystal structure was investigated by transmission electron microscopy. Energy spectrum was studied by steady-state and time-resolved photoluminescence spectroscopy. The experimental data supplied by calculations. It was shown, that energy spectrum of type-I and indirect bandgap forms in structures with fully relaxed GaAs/GaP and GaSb/GaP QDs and with pseudomorphically strained III-Sb/AlAs quantum wells.

Key words: quantum dots, quantum wells, band alignment of type-I, indirect bandgap, exciton, spin relaxation, long lifetime.

Абрамкин Д.С.* , Бакаров А.К., Петрушков М.О., Емельянов Е.А.,
Путятю М.А., Преображенский В.В., Семягин Б.Р., Есин М.Ю.,
Кожухов А.С., Гутаковский А.К., Шамирзаев Т.С.

РФА СБ А.В. Ржанов атындағы Жартылай өткізгіш физика институты,
Новосибирск, Ресей, *e-mail: dalamber.07@mail.ru

Жаңа жартылай өткізгіш гетероструктуралар: қалыптастыру, кристалдық құрылым және энергетикалық спектр

Мақалада бірінші түрлі жанама тыйым салынған жолағы бар жана типті энергетикалық спектрге ие жартылай өткізгішті АЗ-В5 гетероструктурасы талқыланған. Мұндай құрылымдарда квазиимпульстар кеңістігінде заряд тасымалдаушылардың бөлінуі локализацияланған экситондардың жүздеген микросекундқа дейінгі өмір сүру мерзімінің ұзартылуына әкеледі. Бұл қысқа мерзімде (~ 1 нс) туразондық жүйелерді игеруін қиын болатын үрдістерді зерттеуге мүмкіндік береді, мысалы, кванттық нүктелердегі (КН) экситондардың спин релаксациясын. Гетероструктурлар молекулярлық сәуленің эпिताксия арқылы өсірілді. Гетероқұрылымдардың кристалдық түрі трансмиссиялық электронды микроскопия әдісімен зерттелді. Құрылымдардың энергетикалық құрылымы стационарлық спектроскопия және уақыт уәжілетті фотолюминесценция әдістерімен зерттелді. Эксперименттік деректер есептеулермен толықтырылды. Нәтижесінде, бірінші реттік энергетикалық спектрі және жанама тыйым салынған топ GaAs/GaP және GaSb/GaP КН құрылымдарында, оларда механикалық кернеулер толығымен өшетін, сондай-ақ псевдоморфты түрде III-Sb/AlAs кванттық ұңғымалары бар жүзеге асырылғанын көрсетілді.

Түйін сөздер: кванттық нүктелер, кванттық құдықтар, бірінші түрдегі энергетикалық құрылым, жанама тыйым салынған жолақ, экситон, спин релаксациясы, ұзақ өмір.

Введение

В настоящее время прогресс микроэлектроники определяется исследованием и внедрением новых полупроводниковых низкоразмерных гетероструктур. Появление низкоразмерных полупроводниковых гетероструктур не только открыло возможности для создания новых полупроводниковых приборов, но и позволило проводить исследования новых физических явлений фундаментального характера [1,2]. Благодаря эффектам размерного квантования энергетический спектр носителей заряда в низкоразмерных гетероструктурах – квантовых ямах (КЯ) и квантовых точках (КТ), существенно модифицируется по сравнению со спектром носителей заряда в объемном полупроводнике.

По типу энергетического спектра полупроводниковые гетероструктуры можно подразделить на структуры первого рода, в которых носители заряда обоих знаков локализованы в одной области пространства (рис. 1 (а)), и на структуры второго рода, в которых носители заряда одного типа локализованы внутри гетероструктуры, а другого – в матрице вблизи структуры (рис. 1 (б)). Кроме того, электроны в $A^{III}B^V$ гетероструктурах, могут лежать как в центральной Γ долине зоны Брюллиэна, так и в боковых X или L долинах, в то время как дырки всегда локализованы в центре зоны Брюллиэна [1] (рис. 1 (с)). Соответственно, гетероструктуры, в которых носители

заряда обоих знаков принадлежат центральной Γ долине зоны Брюллиэна называют прямозонными, а структуры с разделением носителей заряда в пространстве квазиимпульсов – непрямозонными. Таким образом, можно выделить всего 4 типа полупроводниковых низкоразмерных гетероструктур: первого/второго рода и прямозонные/непрямозонные.

В данный момент, наиболее исследованными гетероструктурами являются прямозонные GaAs/AlGaAs КЯ [3] и (In,Ga)As/GaAs КТ [4] первого рода, прямозонные GaSb/GaAs КЯ и КТ второго рода [5,6], а так же непрямозонные GaAs/AlAs КЯ [3,7] и Ge(Si)/Si КТ [8] второго рода. В то же время, гетероструктуры с энергетическим строением первого рода и непрямой запрещенной зоной остаются значительно менее изученным классом полупроводниковых систем. Между тем, разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов налагает значительные ограничения на процесс излучательной рекомбинации экситонов из-за необходимости выполнения закона сохранения квазиимпульса. Это приводит к существенно увеличению времени жизни экситона до сотен микросекунд [9], что почти на 5 порядков величины больше, чем в прямозонных системах (~1 нс [10]). Сочетание длительного времени жизни экситона и сильной локализации носителей заряда в системах с энергетическим спектром первого рода делает такие гетероструктуры перспективными объектами для исследования физических

процессов, изучение которых в других объектах затруднено, в частности спиновой релаксации локализованных экситонов [11-13]. Кроме того, теоретически предсказанное в работах [14] и экспериментально продемонстрированное [11] длительное время спиновой релаксации экситона,

локализованного в КТ с энергетическим строением первого рода и непрямой запрещённой зоной, делает подобные структуры перспективными с точки зрения создания ячеек для проведения вычислений с использованием спиновой степени свободы.

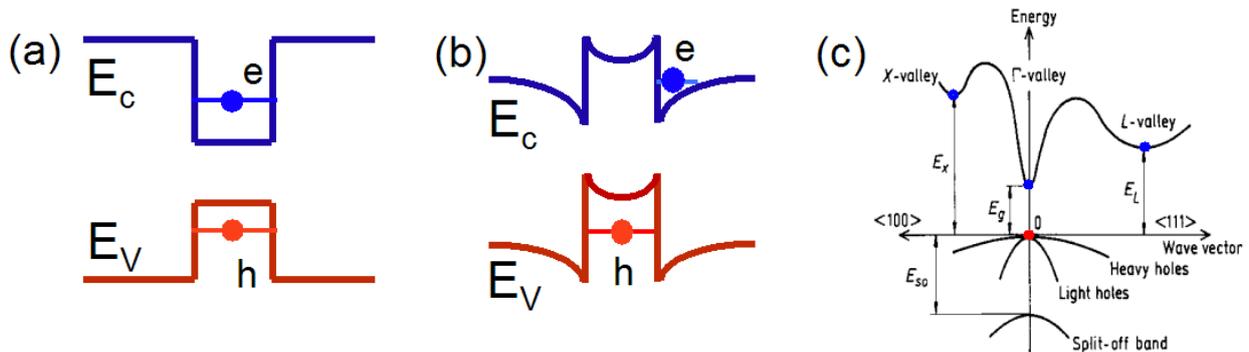


Рисунок 1 – Схематическое изображение зонных диаграмм гетероструктур с энергетическим спектром (а) первого и (б) второго рода. (с) Схематическое изображение зоны Брюллиэна GaAs. Синими точками обозначены электроны принадлежащие (слева на право) X, Γ и L долинам зоны проводимости. Красной точкой обозначена дырка в Γ долине валентной зоны

Пожалуй, самой хорошо изученной парой материалов, для которых реализуются гетероструктуры первого рода с непрямой запрещённой зоной, является InAs/AlAs [9, 15,16]. Теоретические расчёты [17,18], выполненные с учётом влияния упругих деформаций на положения краёв энергетических зон, указывают на других потенциальных представителей этого нового класса полупроводниковых систем: (1) AlAs, InAs, GaSb и InSb в матрице AlP; (2) InAs, GaAs, AlSb, GaSb и InSb в матрице GaP; (3) InSb, GaSb и AlSb в матрице AlAs и (4) InSb в матрицах GaAs, InP и AlSb. К сожалению, данные расчёты не принимают во внимание таких факторов, как частичная либо полная пластическая релаксация упругих деформаций за счёт введения сетки дислокаций несоответствия, и формирование гетероструктур из тройных и/или четверных твёрдых растворов вследствие перемешивания материалов. Кроме того, имеет место заметная неопределённость некоторых параметров материалов, таких как величина разрыва валентных зон на гетерогранице [19] и значения ширины запрещённой зоны для непрямых долин [16]. Всё это указывает на необходимость экспериментальных исследований процессов формирования, кристаллического строения и энергетического спектра данных гетероструктур.

В своей работе мы сосредоточились на гетероструктурах, формируемых в широкозонных матрицах AlAs и GaP на подложках ориентации (100). В литературе встречаются упоминания лишь о получении и исследовании InAs/GaP структур с КТ [20,21], в то время как остальные гетеропары оставались практически не исследованными. Стоит отметить, что получение этих гетеросистем осложнено такими факторами как значительное рассогласование по параметру решётки (начиная от 3.5% для GaAs/GaP и кончая 15.9% для InSb/GaP [22]) и существенными отличиями в оптимальных условиях роста узкозонных и широкозонных материалов (например, плёнки AlAs и GaP наилучшего кристаллического совершенства формируются при температуре подложки около 600-620°C [23], в то время как для роста InSb плёнок оптимальной является температура 350-400°C [24]).

Методы формирования и исследования гетероструктур

Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках GaAs и GaP ориентации (100). На буферном слое GaAs (GaP) выращивался слой AlAs (GaP) толщиной 50-100 нм при температуре

подложки 600-620°C. Затем рост прекращался и температура подложки снижалась до необходимой для формирования гетероструктур (420 – 600°C в зависимости от гетеросистемы). Формирование КТ/КЯ проводилось путём осаждения 1-3 монослоёв (МС) GaAs, GaSb, InSb, и AlSb как в режиме атомно-слоевого осаждения (поочерёдное осаждение материалов III и V групп), так и в традиционном МЛЭ режиме одновременного осаждения материалов. После формирования слой КТ/КЯ наращивался 50 нм AlAs (GaP) при температуре роста КТ/КЯ. Слой AlAs защищался от окисления слоем GaAs толщиной 20 нм. Подробности процесса формирования гетероструктур можно найти в наших работах [19,25-33].

Кристаллическое строение полученных гетероструктур исследовалось с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Анализ планарных изображений и изображений поперечных срезов гетероструктур позволяет получить информацию о форме и размерах КТ/КЯ. Полная или частичная релаксация механических напряжений в КТ определялась по наличию микроскопического муара на полученных методом ПЭМ изображениях гетероструктур. Анализ периода муара позволяет определить степень релаксации механических напряжений [26,34,35]. Химическое картирование гетероструктур проводилось с помощью метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX).

Энергетическое строение гетероструктур было исследовано методом спектроскопии стационарной и время-разрешённой фотолюминесценции (ФЛ). Для определения типа энергетического строения (первого/второго рода) нами была разработана методика, основанная на измерении зависимости интегральной интенсивности и положения максимума полосы стационарной ФЛ от плотности мощности возбуждения (P_{ex}) [32]. В рамках методики смещение максимума полосы ФЛ исследуемой гетероструктуры описывается выражением $U \cdot \ln(P_{ex}) + b \cdot P_{ex}^{1/3}$ в диапазоне линейной зависимости интегральной интенсивности ФЛ от P_{ex} . В этом выражении смещение, $\sim P_{ex}^{1/3}$ связано с эффектом искривления энергетических зон и вызванного им смещения уровней размерного квантования в системах с энергетическим строением второго рода [5,6], а смещение, описываемое логарифмическим членом, обусловлено заполнением «хвостов» плотности электронных состояний и не зависит от рода энергетического спектра гетерострукту-

ры. Разделение носителей заряда в пространстве квазиимпульсов определялось по наличию длительной (вплоть до 100 мкс) динамики затухания ФЛ гетероструктур. Как уже упоминалось выше, такая длительная динамика рекомбинации обусловлена ограничением, налагаемым законом сохранения квазиимпульса на излучательную рекомбинацию в непрямозонных структурах [9].

Данные ФЛ были дополнены теоретическими расчётами энергетического спектра исследуемых гетероструктур. При расчётах учитывалось влияние перемешивания материалов и упругих деформаций на положение энергетических зон. Расчёты распределения упругих деформаций проведены в приближении сплошной среды [36]. Положение уровней размерного квантования в гетероструктурах рассчитывалось в однозонном приближении. Детали расчётов подробно описаны в работах [15,18,29].

Полученные результаты

GaAs/GaP гетероструктуры

Данная гетеросистема характеризуется рассогласованием параметров решётки 3.7% [22], что оказывается сравнимым с рассогласованием для хорошо изученной гетеропары Ge/Si. Проведённые исследования [19,25] показали, что в зависимости от температуры подложки при осаждении 3-х монослоёв GaAs возможно формирование: (1) псевдоморфно напряжённой GaAs/GaP КЯ при 420°C; (2) КТ GaAs/GaP, механические напряжения в которых полностью релаксировали, при 550°C и (3) псевдоморфно напряжённых GaAsP/GaP КТ при 600°C. Изменения в кристаллическом строении гетероструктур обусловлены зависимостью длины диффузии адатомов по ростовой поверхности от температуры подложки. Поскольку количество адатомов, формирующих критический зародыш КТ в заданном месте ростовой поверхности, пропорционально длине поверхностной диффузии, при низкой (420°C) температуре малая длина диффузии не обеспечивает формирование КТ и идёт рост GaAs/GaP КЯ. Увеличение температуры до 550°C, а с ней и длины диффузии, приводит к формированию GaAs КТ. Уровень механических напряжений в КТ превосходит критический и происходит их пластическая релаксация путём введения сетки ломеровских дислокаций в гетерограницу КТ/матрица. Отдельно стоит отметить, что введение дислокаций в гетероструктуру не приводит к падению интенсивности ФЛ за счёт увеличения темпа безызлучательной рекомбинации, потому

что ядро ломеровской дислокации не содержит оборванных атомных связей [37]. Дальнейшее увеличение температуры до 600°C приводит к активации процесса перемешивания материалов поэтому идёт формирования КТ из твёрдого раствора GaAsP. Вызванное перемешиванием снижение рассогласования параметров решётки материала КТ и GaP матрицы предотвращает пластическую релаксацию напряжений и способствует формированию напряжённых КТ. Исследования методом комбинационного рассеяния показали, что содержание GaP в твёрдом растворе составляет около 32%.

Исследования энергетического строения полученных GaAs/GaP гетероструктур показали, что GaAs/GaP КЯ имеют энергетический спектр второго рода с основным электронным состоянием, принадлежащим непрямой X долине зоны проводимости GaP. Полностью релаксированные GaAs/GaP КТ характеризуются энергетическим строением первого рода с основным электронным состоянием, принадлежащим непрямой L долине зоны проводимости GaAs. В случае напряжённых GaAsP/GaP КТ реализуется энергетическое строение второго рода с основным электронным состоянием, принадлежащим X_z подзоне зоны проводимости GaP. Расщепление зоны проводимости GaP на X_z и X_{xy} вблизи КТ вызвано неоднородным распределением упругих деформаций.

GaSb/GaP гетероструктуры

Для данной гетеросистемы характерно существенное рассогласование параметров решётки 10.5% [22], что создало значительные проблемы при формировании гетероструктур. Исследования, результаты которых представлены в работах [26,28,29], показали, что осаждение уже 1 монослоя GaSb на поверхность GaP в диапазоне температур 420-470°C ведёт к формированию массива псевдоморфно напряжённых КТ, расположенных на ультра-тонкой КЯ, называемой смачивающим слоем (СС). Перемешивание материалов и формирование КТ и СС из твёрдого раствора GaSbP предотвращает пластическую релаксацию механических напряжений и способствует росту напряжённых КТ. Сопоставление данных ФЛ и расчётов энергетического строения КТ и КЯ позволили оценить состав твёрдого раствора GaSbP из которого состоят КТ и СС: в зависимости от температуры осаждения GaSb доля P в твёрдом растворе может изменяться от 0.5 до 0.9. Были проведены дополнительные исследования [26,29], в ходе которых изучалось формирование КТ на GaP

поверхности с развитым рельефом, которая затрудняет поверхностную диффузию адатомов P. Развитый рельеф поверхности создавался за счёт роста GaP слоя на рассогласованной GaAs подложке [29]. Обнаружено, что, действительно, блокировка поверхностной диффузии адатомов P ведёт к формированию КТ из чистого GaSb. Гигантское рассогласование параметров решётки материалов приводит к полной пластической релаксации механических напряжений. Как и в случае с GaAs/GaP КТ, релаксация проходит за счёт введения сетки ломеровских дислокаций, залегающих в плоскости гетерограницы КТ/матрица и не пересекающих объём КТ. Как и для GaAs/GaP КТ релаксация не увеличивает темп безызлучательной рекомбинации носителей заряда в КТ.

Исследования энергетического строения КТ и СС показали, что независимо от состава твёрдого раствора псевдоморфно напряжённая GaSbP/GaP КЯ и КТ имеют энергетическое строение первого и второго рода, соответственно. Основное электронное состояние КЯ принадлежит непрямой X_{xy} подзоне зоны проводимости GaSbP, а КТ – X_z подзоне зоны проводимости GaP. Расщепление зоны проводимости GaP на X_z и X_{xy} вблизи КТ вызвано неоднородным распределением упругих деформаций. В случае GaSb/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений реализуется энергетическое строение первого рода с основным электронным состоянием, принадлежащим непрямой L долине зоны проводимости GaSb.

III-Sb/AlAs гетероструктуры

Гетеропары антиминоидов In, Ga и Al с AlAs характеризуются значительным рассогласованием параметров решёток 12.6%, 7.0% и 7.6%, соответственно. Результаты исследования процессов формирования, кристаллического строения и энергетического спектра таких гетероструктур представлены в работах [27,30-33]. Большой атомный радиус Sb и значительно более слабые межатомные связи In-Sb, Ga-Sb и Al-Sb по сравнению с In-As, Ga-As и Al-As [38] приводит к сильной сегрегации Sb при зарождении сформированных гетероструктур AlAs. В целях подавления сегрегации была применена методика помонослойного осаждения материала (атомно-слоевая эпитаксия) при температурах 450-500°C. В результате произошло образование крупных дефектных кластеров, окружённых массивом напряжённых III-Sb/AlAs КТ [31], расположенных на СС. Спектроскопические исследования показали, что ос-

новой сигнал ФЛ таких гетероструктур связан именно с СС, а ФЛ от КТ наблюдать не удаётся. Поэтому мы перешли на рост в традиционном режиме одновременного осаждения материалов. Показано, что при осаждении 1 монослоя III-Sb при температурах 450-500°C происходит формирование псевдоморфно напряжённых КЯ, состоящих из твёрдых растворов IIIAlSbAs. Сегрегация **Sb и In приводит к сильному размытию гетерограниц КЯ**. В дальнейшем планируется исследование формирования III-Sb/AlAs гетероструктур при более низких температурах (300-370°C) [39], целью которых будет получение структур с III-Sb КТ.

Исследования энергетического строения полученных III-Sb/AlAs гетероструктур с КЯ показали, что в зависимости от состава твёрдого раствора, из которого состоят КЯ, они могут иметь энергетический спектр как первого, так и второго рода [27,30]. Основное электронное состояние таких КЯ принадлежит X долине зоны проводимости твёрдого раствора, либо AlAs матрицы (в зависимости от рода энергетического спектра КЯ). Показано, что размытие гетерограниц вследствие сегрегации материалов приводит к формированию протяжённых «хвостов» плотности локализованных электронных состояний. Появление этих «хвостов» вызвано флуктуациями размера и состава КЯ [40].

В гетероструктурах с InAlSbAs/AlAs КЯ обнаружено явление спиноподобного распада твёрдого раствора, заключающееся в распаде КЯ на сегменты с латеральными размерами 5-7 нм, характеризующиеся различным составом твёрдого раствора [33]. Люминесцентные исследования показали, что такой распад приводит к сосуществованию энергетических спектров первого и второго рода, причём основное электронное состояние в подсистеме первого рода принадлежит X_{XY} подзоне зоны проводимости InAlSbAs, а в подсистеме второго рода – X_Z подзоне зоны проводимости AlAs.

Заключение

В результате проведённых исследований было показано, что помимо хорошо изученных InAs/AlAs КТ и КЯ, энергетическое строение первого рода с непрямой запрещённой зоной может быть реализовано в GaAs/GaP и GaSb/GaP КТ с полной релаксацией механических напряжений, а также в псевдоморфно напряжённых III-Sb/AlAs КЯ. **В дальнейшем планируются работы по получению и исследованию III-Sb/AlAs гетероструктур с КТ.**

Благодарности. Работы выполнены при поддержке проектов РФФИ № 16-32-60015 и № 16-02-00242.

Литература

- 1 Bimberg D., Grundmann M., Ledentsov N. N. Quantum dot heterostructures. – Toronto: John Wiley & Sons, 2001. – 328 p.
- 2 Matsumoto Y., Takagahara T. Semiconductor Quantum Dots. Physics, Spectroscopy and Applications. – Berlin: Springer, 2002. – 486 p.
- 3 Tsu R. Superlattice to Nanoelectronics. – Amsterdam: Elsevier, 2005. – 325 p.
- 4 Grundmann M., Stier O., Bimberg D. InAs/GaAs pyramidal quantum dots: Strain distribution, optical phonons, and electronic structure // Phys. Rev. B – 1995. – Vol.52. – P.11969.
- 5 Ledentsov N. N., Bohrer J., Beer M., Heinrichsdorff F., Grundmann M., Bimberg D., Ivanov S. V., Meltser B.Y., Shaposhnikov S.V., Yassievich I.N., Faleev N.N., Kop'ev P.S. and Alferov Z. I. Radiative states in type-II GaSb/GaAs quantum wells // Phys. Rev. B – 1995. – Vol.52. – P.14058.
- 6 Hatami F., Ledentsov N.N., Grundmann M., Bohrer J., Heinrichsdorff F., Beer M., Bimberg D., Ruvimov S.S., Werner P., Gosele U., Heydenreich J., Richter U., Ivanov S.V., Meltser B. Ya., Kop'ev P.S. and Alferov Z.I. Radiative recombination in type-II GaSb/GaAs quantum dots // Appl. Phys. Lett – 1995. – Vol.67. – P.656.
- 7 van Kesteren H. W., Cosman E. C., Dawson P., Moore K. J. and Foxon C. T. Order of the X conduction-band valleys in type-II GaAs/AlAs quantum wells // Phys. Rev. B – 1989. – Vol. 39. – P. 13426.
- 8 Vailionis A., Cho B., Glass G., Desjardins P., Cahill David G. and Greene J.E. Pathway for the Strain-Driven Two-Dimensional to Three-Dimensional Transition during Growth of Ge on Si(001) // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol.85. – P.3672.
- 9 Shamirzaev T. S., Debus J., Abramkin D. S., Dunker D., Yakovlev D. R., Dmitriev D. V., Gutakovskii A. K., Braginsky L. S., Zhuravlev K. S., and Bayer M. Exciton recombination dynamics in an ensemble of (In,Al)As/AlAs quantum dots with indirect band-gap and type-I band alignment // Phys. Rev. B – 2011. – Vol.84. – P.155318.
- 10 Tomm J. W., Elsaesser T., Mazur Yu. I., Kissel H., Tarasov G. G., Zhuchenko Z. Ya. and Masselink W. T. Transient luminescence of dense InAs/GaAs quantum dot arrays // Phys. Rev. B – 2003. – Vol.67. – P.045326.
- 11 Dunker D., Shamirzaev T. S., Debus J., Yakovlev D. R., Zhuravlev K. S. and Bayer M. Spin relaxation of negatively charged excitons in (In,Al)As/AlAs quantum dots with indirect band gap and type-I band alignment // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol.101. – P.142108.

- 12 Shamirzaev T. S., Rautert J., Yakovlev D. R., Debus J., Gornov A. Yu., Glazov M. M., Ivchenko E. L. and Bayer M. Spin dynamics and magnetic field induced polarization of excitons in ultrathin GaAs/AlAs quantum wells with indirect band gap and type-II band alignment // *Phys. Rev. B* – 2017. – Vol.96. – P.035302.
- 13 Debus J., Shamirzaev T. S., Dunker D., Sapega V. F., Ivchenko E. L., Yakovlev D. R., Toropov A. I. and Bayer M. Spin-flip Raman scattering of the Γ -X mixed exciton in indirect band gap (In,Al)As/AlAs quantum dots // *Phys. Rev. B* – 2014. – Vol. 90. – P.125431.
- 14 Khaetskii A.V. and Nazarov Yu.V. Spin relaxation in semiconductor quantum dots // *Phys. Rev. B* – 2000. – Vol.61. – P.12639.
- 15 Shamirzaev T.S., Gilinsky A. M., Kalagin A. K., Nenashev A. V. and Zhuravlev K. S. Energy spectrum and structure of thin pseudomorphic InAs quantum wells in an AlAs matrix: Photoluminescence spectra and band-structure calculations // *Phys. Rev. B* – 2007. – Vol. 76. – P. 155309.
- 16 Shamirzaev T. S., Nenashev A. V., Gutakovskii A. K., Kalagin A. K., Zhuravlev K. S., Larsson M. and Holtz P. O. Atomic and energy structure of InAs/AlAs quantum dots // *Phys. Rev. B* – 2008. – Vol. 78. – P.085323.
- 17 Pistol M.-E., Pryor C. E. Band structure of segmented semiconductor nanowires // *Phys. Rev. B* – 2009. – Vol. 80. – P.035316.
- 18 Шамирзаев Т.С. Полупроводниковые гетероструктуры первого рода с непрямой зоной проводимости // ФТП – 2011. – Т.45. – С. 97.
- 19 Abramkin D. S., Putyato M. A., Budenny S. A., Gutakovskii A. K., Semyagin B. R., Preobrazhenskii V.V., Kolomys O. F., Strelchuk V. V. and Shamirzaev T. S. Atomic structure and energy spectrum of Ga(As,P)/GaP heterostructures // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112. – P.083713.
- 20 Stracke G., Sala E. M., Selve S., Niermann T., Schliwa A., Strittmatter A. and Bimberg D. Indirect and direct optical transitions in In_{0.5}Ga_{0.5}As/GaP quantum dots // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol.104. – P.123107.
- 21 Heidemann M., Hofling S. and Kamp M. (In,Ga)As/GaP electrical injection quantum dot laser // *Appl. Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 104. – P. 011113.
- 22 Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 89. – P. 5815.
- 23 Petroff P. M., Gossard A.C. and Wiegmann W. Structure of AlAs-GaAs interfaces grown on (100) vicinal surfaces by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* – 1984. – Vol.45. – P.620.
- 24 Michel E., Singh G., Slivken S., Besikci C., Bove P., Ferguson I. and Razeq M. Molecular beam epitaxial growth of high quality InSb // *Appl. Phys. Lett.* – 1994. – Vol.65. – P.3338.
- 25 Shamirzaev T. S., Abramkin D. S., Gutakovskii A. K., Putyato M. A. High quality relaxed GaAs quantum dots in GaP matrix // *Appl. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 97. – P.023108.
- 26 Абрамкин Д.С., Путятю М. А., Гутаковский А. К., Семягин Б. Р., Преображенский В. В. и Шамирзаев Т. С. Новая система самоорганизованных квантовых точек GaSb/GaP // ФТП. – 2012. – Т.46. – С. 1571.
- 27 Shamirzaev T.S., Abramkin D.S., Gutakovskii A.K. and Putyato M.A. Novel self-assembled quantum dots in the GaSb/AlAs heterosystem // *Pis'ma v ZhETF* – 2012. – Vol.95. – P.601.
- 28 Abramkin D.S., Shamirzaev T.S., Putyato M.A., Gutakovskii A.K. and Shamirzaev T.S. Coexistence of type-I and type-II band alignment in Ga(Sb,P)/GaP heterostructures with pseudomorphic self-assembled quantum dots // *Pis'ma v ZhETF* – 2014. – Vol.99. – P.81.
- 29 Абрамкин Д.С., Емельянов Е.А., Путятю М.А., Гутаковский А.К., Кожухов А.С., Семягин Б.Р., Преображенский В.В. и Шамирзаев Т.С. Формирование и кристаллическое строение GaSb/GaP квантовых точек // *Изв. РАН. Серия физическая* – 2016. – Т.80. – С. 22.
- 30 Абрамкин Д.С., Румынин К.М., Бакаров А.К., Колотовкина Д.А., Гутаковский А.К. и Шамирзаев Т.С. Квантовые точки, сформированные в гетеросистемах InSb/AlAs и AlSb/AlAs // *Письма в ЖЭТФ*. – 2016. – Т.103. – С. 785.
- 31 Абрамкин Д.С., Бакаров А.К., Путятю М.А., Емельянов Е.А., Колотовкина Д.А., Гутаковский А.К. и Шамирзаев Т.С. Формирование низкоразмерных структур в гетеросистеме InSb/AlAs // ФТП – 2017. – Т.51. – С.1282.
- 32 Abramkin D.S., Gutakovskii A.K. and Shamirzaev T.S. Heterostructures with diffused interfaces: Luminescent technique for ascertainment of band alignment type // *J. Appl. Phys.* – 2018. – Vol.123. – P.115701.
- 33 Абрамкин Д.С., Бакаров А. К., Гутаковский А. К. и Шамирзаев Т. С. Спинодальный распад в InSb/AlAs-гетероструктурах // ФТП – 2018. – Т.52. – С.1280.
- 34 Хирш П., Хови А., Николсон Р., Пэшли Д. и Уэлан М. Электронная микроскопия тонких кристаллов, Мир, 1968 (пер. с англ). С. 574.
- 35 Ван дер Мерве Дж. Х. Несоответствие кристаллических решеток и силы связи на поверхности раздела между ориентированными пленками и подложками, В кн.: Монокристаллические пленки. – М.: Мир, 1966, 172-201 с.
- 36 Van de Walle C. G. Band lineups and deformation potentials in the model-solid theory // *Phys. Rev. B* – 1989. – Vol. 39. – P. 1871.
- 37 Stirman J.N., Crozier P.A., Smith D.J., Phillipp F., Brill G. and Sivanathan S. Atomic-scale imaging of asymmetric Lomer dislocation cores at the Ge/Si(001) heterointerface // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol.84. – P. 2530.
- 38 Harrison W.A. *Electronic Structure and Properties of Solids*. – San Francisco: W.H. Freeman, 1980. – 838 p.
- 39 Thainoi S., Kiravittaya S., Poempool T., Zon, Sopitpan S., Kanjanachuchai S., Ratanathamphan S. and Panyakeow S., Growth of truncated pyramidal InSb nanostructures on GaAs substrate // *J. of Crystal Growth*. – 2017. – Vol. 468. – P.737.

40 Klochikhin A., Reznitsky A., Permogorov S., Breitkopf T., Grun M., Hetterich M., Klingshirn C., Lyssenko V., Langbein W. and Hvam J. M. Luminescence spectra and kinetics of disordered solid solutions // *Phys. Rev. B.* – 1999. – Vol. 59. – P.12947.

References

- 1 D. Bimberg, M. Grundmann, N.N. Ledentsov, *Quantum dot heterostructures*, (John Wiley & Sons, Toronto, 2001), 328 p.
- 2 Y. Matsumoto, T. Takagahara, *Semiconductor Quantum Dots. Physics, Spectroscopy and Applications*, (Springer, Berlin, 2002), 486 p.
- 3 R. Tsu, *Superlattice to Nanoelectronics*, (Elsevier, Amsterdam, 2005), 325 p.
- 4 M. Grundmann, O. Stier and D. Bimberg, *Phys. Rev. B*, 52, 11969 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.11969>
- 5 N. N. Ledentsov, J. Bohrer, M. Beer, F. Heinrichsdorff, M. Grundmann, D. Bimberg, S. V. Ivanov, B.Y. Meltser, S.V. Shaposhnikov, I.N. Yassievich, N.N. Faleev, P.S. Kop'ev and Z. I. Alferov, *Phys. Rev. B* 52, 14058 (1995). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.14058>
- 6 F. Hatami, N.N Ledentsov, M. Grundmann, J. Bohrer, F. Heinrichsdorff, M. Beer, D. Bimberg, S.S. Ruvimov, P. Werner, U. Gosele, J. Heydenreich, U. Richter, S.V. Ivanov, B. Ya. Meltser, P.S.Kop'ev and Z.I. Alferov, *Appl. Phys. Lett.* 67, 656 (1995). <https://doi.org/10.1063/1.115193>
- 7 H. W. van Kesteren, E. C. Cosman, P. Dawson, K. J. Moore, C. T. Foxon, *Phys. Rev. B*, 39, 13426 (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.13426>
- 8 Vailionis, B. Cho, G. Glass, P. Desjardins, David G. Cahill, J.E. Greene, *Phys. Rev. Lett.* 85, 3672, (2000). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3672>
- 9 S. Shamirzaev, J. Debus, D. S. Abramkin, D. Dunker, D. R. Yakovlev, D. V. Dmitriev, A. K. Gutakovskii, L. S. Braginsky, K. S. Zhuravlev, and M. Bayer *Phys. Rev. B* 84, 155318 (2011). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.155318>
- 10 W. Tomm, T. Elsaesser, Yu. I. Mazur, H. Kissel, G. G. Tarasov, Z. Ya. Zhuchenko, W. T. Masselink, *Phys. Rev. B* 67, 045326 (2003). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.67.045326>
- 11 D. Dunker, T. S. Shamirzaev, J. Debus, D. R. Yakovlev, K. S. Zhuravlev, and M. Bayerless, *Appl. Phys. Lett.* 101, 142108 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4754619>
- 12 S. Shamirzaev, J. Rautert, D. R. Yakovlev, J. Debus, A. Yu. Gornov, M. M. Glazov, E. L. Ivchenko, and M. Bayer, *Phys. Rev. B* 96, 035302 (2017). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.035302>
- 13 J. Debus, T. S. Shamirzaev, D. Dunker, V. F. Sapega, E. L. Ivchenko, D. R. Yakovlev, A. I. Toropov, and M. Bayer, *Phys. Rev. B* 90, 125431 (2014). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.90.125431>
- 14 A.V. Khaetskii, Yu.V. Nazarov, *Phys. Rev. B* 61, 12639 (2000). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.12639>
- 15 T.S. Shamirzaev, A. M. Gilinsky, A. K. Kalagin, A. V. Nenashev, and K. S. Zhuravlev, *Phys. Rev. B*, 76, 155309 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.155309>
- 16 T. S. Shamirzaev, A. V. Nenashev, A. K. Gutakovskii, A. K. Kalagin, K. S. Zhuravlev, M. Larsson and P. O. Holtz, *Phys. Rev. B* 78, 085323 (2008). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.085323>
- 17 M.-E. Pistol, C. E. Pryor, *Phys. Rev. B* 80,035316 (2009). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.80.035316>
- 18 Shamirzaev T.S. Type-I Semiconductor Heterostructures with an Indirect-Gap Conduction Band // *Semiconductors – 2011*, Vol. 45, P.96. DOI: 10.1134/S1063782611010180
- 19 D. S. Abramkin, M. A. Putyato, S. A. Budenny, A. K. Gutakovskii, B. R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii, O. F. Kolomys, V. V. Strelchuk, T. S. Shamirzaev, *J. Appl. Phys.* 112, 083713 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4759258>
- 20 G. Stracke, E. M. Sala, S. Selve, T. Niermann, A. Schliwa, A. Strittmatter, and D. Bimberg, *Appl. Phys. Lett.* 104, 123107 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4870087>
- 21 M. Heidemann, S. Hoffing, and M. Kamp, *Appl. Phys. Lett.* 104, 011113 (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4860982>
- 22 I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.* 89, 5815 (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1368156>
- 23 P. M. Petroff, A.C. Gossard, and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.* 45, 620 (1984). <https://doi.org/10.1063/1.95332>
- 24 E. Michel, G. Singh, S. Slivken, C. Besikci, P. Bove, I. Ferguson, and M. Razegh, *Appl. Phys. Lett.* 65, 3338 (1994). <https://doi.org/10.1063/1.112384>
- 25 Shamirzaev, D. S. Abramkin, A. K. Gutakovskii, M. A. Putyato, *Appl. Phys. Lett.* 97, 023108 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3464561>
- 26 D.S. Abramkin, M.A. Putyato, A.K. Gutakovskii, B.R. Semyagin, V.V. Preobrazhenskii, T.S. Shamirzaev, *Semiconductors*, 46, 1534 (2012). <https://doi.org/10.1134/S1063782612120020>
- 27 T.S. Shamirzaev, D.S. Abramkin, A.K. Gutakovskii and M.A. Putyato, *JETP Lett.* 95, 601 (2012). DOI: 10.1134/S0021364012100104
- 28 D.S. Abramkin, V.T. Shamirzaev, M.A. Putyato, A.K. Gutakovskii, T.S. Shamirzaev, *JETP Lett.* 99, 76 (2014). DOI: 10.1134/S0021364014020027
- 29 D. S. Abramkin, E. A. Emelyanov, M. A. Putyato, A. K. Gutakovskii, A. S. Kozhukhov, B. R. Semyagin, V. V. Preobrazhenskii and T. S. Shamirzaev, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, 80, 17 (2016). DOI: 10.3103/S1062873816010032
- 30 D.S Abramkin, K.M. Rumynin, A.K. Bakarov, D.A. Kolotovkina, A.K. Gutakovskii and T.S. Shamirzaev, *JETP Lett.* 103, 692 (2016). DOI: 10.1134/S0021364016110023
- 31 Abramkin D.S., Bakarov A.K., Putyato M.A., Emelyanov E.A., Kolotovkina D.A., Gutakovskii A.K. and Shamirzaev T.S. *Semiconductors* 51, 1233 (2017). DOI: 10.1134/S1063782617090020

- 32 D.S. Abramkin, A.K. Gutakovskii, T.S. Shamirzaev, *J. Appl. Phys.* 123, 115701 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5019993>
- 33 D.S. Abramkin, A. K. Bakarov, A. K. Gutakovskii, T. S. Shamirzaev, *Fizika i tehnika poluprovodnikov*, 52, 1280 (2018). DOI: 10.21883/000000000
- 34 P. B. Hirsch, A. Howie, R. B. Nicholson, D. W. Pashley and M. J. Whelan, *Electron microscopy of thin crystals*, Krieger Pub Co, p. 574, (1968).
- 35 Van der Merve J. H., «Nesootvetstvie kristallicheskih reshetok I sily svyazi na poverhnosti razdela mezhdu orientirovannymi plenkami I podlozhkami», *V kinge.: Monokristallicheskie plenki*. M.: Mir, 1966, p.172-201.
- 36 C. G. Van de Walle, *Phys. Rev. B* 39, 1871 (1989). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.1871>
- 37 J.N. Stirman, P.A. Crozier, D.J. Smith, F. Phillipp, G. Brill, S. Sivananthan. *Appl. Phys. Lett.*, 84, 2530 (2004). <https://doi.org/10.1063/1.1697625>
- 38 W.A. Harrison, «*Electronic Structure and Properties of Solids*», W.H. Freeman, SanFrancisco, (1980), p.838.
- 39 S. Thainoi, S. Kiravittaya, T. Poempool, Zon, S. Sopitpan, S. Kanjanachuchai, S. Ratanathamphan, S. Panyakeow, *J. of Crystal Growth* 468, 737 (2017). DOI: 10.1016/j.jcrysro.2016.11.093
- 40 Klochikhin, A. Reznitsky, S. Permogorov, T. Breitkopf, M. Grun, M. Hetterich, C. Klingshirn, V. Lyssenko, W. Langbein and J. M. Hvam, *Phys. Rev. B* 59, 12947 (1999). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.59.12947>