Письма в ЖЭТФ, том 103, вып. 11, с. 785 – 791 © 2016 г. 10 июня

Квантовые точки, сформированные в гетеросистемах InSb/AlAs и AlSb/AlAs

Д. С. Абрамкин[+*1)], *К. М. Румынин*[+*], *А. К. Бакаров*[+], *Д. А. Колотовкина*[+*], *А. К. Гутаковский*[+*], *Т. С. Шамирзаев*[+*×]

[+]*Институт физики полупроводников им. Ржанова СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия*

[*]*Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия*

[×]*Уральский федеральный университет, 620002 Екатеринбург, Россия*

Поступила в редакцию 25 марта 2016 г.
После переработки 15 апреля 2016 г.

Кристаллическое строение новых самоорганизованных InSb/AlAs и AlSb/AlAs квантовых точек (КТ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, исследовано с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Теоретические расчеты энергетического спектра КТ дополнены экспериментальными данными спектроскопии стационарной и время-разрешенной фотолюминесценции. Осаждение 1.5 монослоев InSb или AlSb на поверхность AlAs, выполненное в режиме атомно-слоевой эпитаксии, приводит к формированию псевдоморфно напряженных КТ, состоящих из твердых растворов InAlSbAs или AlSbAs, соответственно. В зависимости от состава твердого раствора КТ могут иметь энергетический спектр, как первого, так и второго рода. Основное дырочное состояние КТ принадлежит зоне тяжелых дырок, при этом энергия локализации дырки значительно превосходит энергию локализации электронов. В КТ первого рода основное электронное состояние принадлежит непрямой X_{XY} долине зоны проводимости твердого раствора. В КТ второго рода основное электронное состояние принадлежит непрямой X долине зоны проводимости AlAs матрицы.

DOI: 10.7868/S0370274X16110060

Введение. Самоорганизованные полупроводниковые квантовые точки (КТ) интересны не только с точки зрения решения фундаментальных проблем физики твердого тела, но и находят применение при создании оптоэлектронных устройств [1]. На основе гетероструктур с КТ уже построены эффективные однофотонные излучатели и фотоприемники, открывающие новые возможности для развития технологий передачи информации [2, 3]. Использование структур с КТ не только для передачи или приема, но, одновременно, и для хранения информации создает новые перспективы для развития информационных технологий. Среди всего многообразия различных систем КТ, гетеросистемы на основе узкозонных антимонидов In, Ga и Al в широкозонной матрице AlAs, обеспечивают сильную локализацию носителей заряда, необходимую для длительного хранения информации. Так, например, в работе [4] предсказывается, что основанная на GaSb/AlAs КТ ячейка памяти может хранить заряд в течение 10^6 лет.

Кроме того, теоретические расчеты, проведенные в работах [5, 6], показывают, что КТ, сформированные в гетеросистемах III-Sb/AlAs, могут иметь энергетическое строение первого рода (носители заряда обоих знаков локализованы в КТ) с основным электронным состоянием, принадлежащим непрямой долине зоны проводимости. Необходимость выполнения закона сохранения квазиимпульса уменьшает вероятность излучательной рекомбинации, приводя к увеличению времени жизни непрямых экситонов вплоть до сотен микросекунд [7], что в сочетании с длительной спиновой релаксацией экситона [8, 9] делает подобные КТ подходящими объектами для создания элементов спиновой памяти.

В настоящее время, несмотря на наличие теоретических исследований, III-Sb/AlAs гетероструктуры экспериментально не исследовались. Получение таких гетероструктур осложнено гигантским рассогласованием параметров решетки антимонидов и AlAs (7.1÷12.6 % [10]). Кроме того, существенны различия в оптимальных условиях роста слоев антимонидов и AlAs. Так, например, пленки AlAs наилучшего кристаллического совершенства формируются при температуре подложки около 600 °C [11], в то время как для роста пленок InSb оптимальной является температура около 400 °C [12]. Недавно нами были впер-

[1)]e-mail: demid@isp.nsc.ru

вые получены гетероструктуры с GaSb/AlAs КТ и исследованы их кристаллическое и энергетическое строение [13]. В настоящей статье мы впервые сообщаем о получении InSb/AlAs и AlSb/AlAs гетероструктур с КТ и результатах исследования их кристаллического строения и энергетического спектра. Полученные КТ являются псевдоморфно напряженными, характеризуются высокой степенью кристаллического совершенства и высокой интенсивностью люминесценции. Показано, что перемешивание материалов при формировании КТ оказывает существенное влияние на их кристаллическое и энергетическое строение.

Детали эксперимента. Гетероструктуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках GaAs ориентации (001). На буферном слое GaAs выращивался слой AlAs толщиной 50 нм при температуре подложки 620 °C. Затем рост прекращался и температура подложки снижалась до 480 °C. Квантовые точки формировались в режиме атомно-слоевой эпитаксии: осаждался In(Al) в количестве, эквивалентном 0.5 монослоя вещества, после чего поток элементов 3 группы прерывался и в течение 15 с осаждалась Sb. Данные операции повторялись 3 раза. После формирования КТ заращивались слоем AlAs толщиной 50 нм без изменения температуры подложки. Слой AlAs защищался от окисления слоем GaAs толщиной 20 нм.

Кристаллическое строение гетероструктур с КТ было исследовано методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Для получения ПЭМ изображений использовался просвечивающий электронный микроскоп JEM-4000EX (400 кэВ). Стационарная фотолюминесценция (ФЛ) возбуждалась излучением GaN лазерного диода с энергией кванта 3.06 эВ и плотностью мощности (P_{ex}), изменяющейся в диапазоне $1 \div 100$ мВт/см^2 при помощи градиентного нейтрального фильтра. Спектры ФЛ анализировались с помощью спектрографа Acton Advanced SP2500A и измерялись ПЗС-камерой с азотным охлаждением. Время-разрешенная ФЛ возбуждалась N_2 лазером с энергией кванта 3.68 эВ, частотой следования импульсов 1кГц, длительностью импульса 7 нс и плотностью энергии в импульсе 1.75 мкДж/см^2, что соответствует плотности мощности в импульсе 250 Вт/см^2 и средней плотности мощности 1.75 мВт/см^2. Время-разрешенная ФЛ анализировалась с помощью двойного решеточного монохроматора СДЛ-1 и измерялась ФЭУ-79 в режиме время-коррелированного счета фотонов.

Кристаллическое строение гетероструктур с КТ. Планарное микроскопическое изображение, поперечный срез и изображение поперечного среза КТ в высоком разрешении представлены для InSb/AlAs гетероструктуры с КТ на рис. 1a и c, соответственно. Как видно из рисунков, в гетероструктуре формируется массив самоорганизованных КТ, в основании которых лежит тонкая квантовая яма – смачивающий слой. Это указывает на формирование КТ по механизму Странского–Крастанова. Плотность КТ, сформировавшихся в InSb/AlAs гетероструктуре, составляет $1.5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$, КТ имеют линзовидную форму с диаметром основания 30 ± 10 нм и высотой 5 ± 2 нм. Планарное микроскопическое изображение AlSb/AlAs гетероструктуры с КТ представлено на рис. 1d. На вставке к рисунку показано изображение поперечного среза AlSb/AlAs гетероструктуры. Сформированные в AlSb/AlAs гетероструктуре КТ также расположены на смачивающем слое, имеют линзовидную форму и высоту 5 ± 2 нм, однако, они характеризуются бóльшей плотностью (около $5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$) и меньшими латеральными размерами (20 ± 7 нм), чем КТ в InSb/AlAs гетероструктуре. Увеличение плотности КТ и снижение их среднего латерального размера при переходе от гетеросистемы InSb/AlAs к гетеросистеме AlSb/AlAs вызвано различной длиной латеральной диффузии адатомов In и Al по поверхности AlAs. Поскольку энергия связи атомов In–As и In–Sb ниже, чем атомов Al–As и Al–Sb [14], миграция адатомов Al по поверхности AlAs характеризуется меньшей длиной латеральной диффузии, чем в случае адатомов In. Это приводит к тому, что в AlSb/AlAs гетероструктуре КТ формируются из материала, собранного с участка AlAs поверхности меньшей площади, чем в InSb/AlAs гетероструктуре [15–18].

Отсутствие дислокаций несоответствия и муара на ПЭМ изображениях, представленных на рис. 1, указывает на то, что сформировавшиеся в обоих гетеросистемах КТ, псевдоморфно напряжены. Формирование напряженных КТ достаточно большого размера в условиях значительного рассогласования параметров решетки InSb/AlAs (12.6 % [10]) и AlSb/AlAs (7.7 % [10]), дает основания предполагать, что они состоят из твердого раствора $\mathrm{InxAl}_{1-x}\mathrm{Sb}_y\mathrm{As}_{1-y}$ и $\mathrm{AlSb}_y\mathrm{As}_{1-y}$, соответственно. Образование твердого раствора в процессе формирования КТ снижает рассогласование параметров решеток материала КТ и матрицы, предотвращая пластическую релаксацию механических напряжений [19].

Энергетический спектр гетероструктур с КТ. Для того, чтобы определить энергетический спектр носителей заряда в псевдоморфно напряженных $\mathrm{In}_x\mathrm{Al}_{1-x}\mathrm{Sb}_y\mathrm{As}_{1-y}$/AlAs и $\mathrm{AlSb}_y\mathrm{As}_{1-y}$/AlAs КТ,

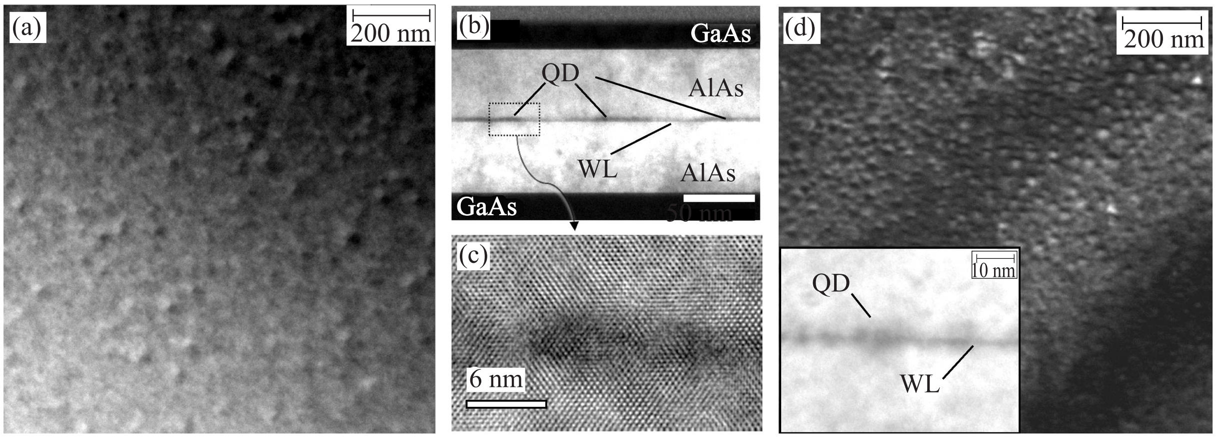

Рис. 1. (a) – Планарное ПЭМ изображение. (b) – Изображение поперечного среза InSb/AlAs гетероструктуры с КТ. (c) – Изображение высокого разрешения поперечного среза КТ в InSb/AlAs гетероструктуре. (d) – Планарное ПЭМ изображение AlSb/AlAs гетероструктуры с КТ. На вставке представлено изображение поперечного среза AlSb/AlAs гетероструктуры. Квантовые точки QD, смачивающий слой WL

необходимо знать зонную диаграмму КТ и учесть эффекты размерного квантования, которые смещают энергетические уровни относительно положения дна соответствующей зоны. Для расчета зонной диаграммы КТ необходимо принять во внимание: (i) зависимость параметров твердого раствора от состава; (ii) разрыв валентных зон на гетерогранице КТ/матрица и (iii) смещение краев энергетических зон вследствие упругих деформаций, вызванных рассогласованием параметров решетки материала КТ и AlAs матрицы. Обсудим все эти факторы подробно.

Параметры твердого раствора. Поскольку экспериментальных данных о зависимости параметров твердых растворов $\mathrm{InxAl}_{1-x}\mathrm{Sb}_y\mathrm{As}_{1-y}$ и $\mathrm{AlSb}_y\mathrm{As}_{1-y}$ от состава в литературе недостаточно, для проведения расчетов мы вынуждены использовать теоретические приближения, позволяющие рассчитать параметры твердых растворов, зная параметры исходных бинарных соединений. Следуя авторам работы [10], мы использовали квадратичное приближение:

$$P_{\mathrm{InAlSbAs}} = xy \cdot P_{\mathrm{InSb}} + (1-x)y \cdot P_{\mathrm{AlSb}} +$$
$$+ (1-x)(1-y) \cdot P_{\mathrm{AlAs}} + x(1-y) \cdot P_{\mathrm{InAs}} +$$
$$+x(1-x)y \cdot C_{\mathrm{InAlSb}} + (1-x)y(1-y) \cdot C_{\mathrm{AlSbAs}} +$$
$$+ X(1-x)(1-y) \cdot C_{\mathrm{InAlAs}} + Xy(1-y) \cdot C_{\mathrm{InSbAs}}, \quad (1)$$

где P_{InAlSbAs} – параметр четверного твердого раствора $\mathrm{In}_x\mathrm{Al}_{1-x}\mathrm{Sb}_y\mathrm{As}_{1-y}$, x и y – состав твердого раствора, P_{ij} – параметр бинарного материала, C_{ijk} – коэффициенты нелинейности для тройного твердого раствора. В случае тройного твердого раствора $\mathrm{AlSb}_y\mathrm{As}_{1-y}$ формула (1) приобретает более простой вид [10]:

$$P_{\mathrm{AlSbAs}} = y \cdot P_{\mathrm{AlSb}} + (1-y) \cdot P_{\mathrm{AlAs}} + y(1-y) \cdot C_{\mathrm{AlSbAs}}. \quad (2)$$

К сожалению, для некоторых параметров бинарных соединений имеется значительный разброс значений. В работах [5, 20, 21] детально обсуждается выбор значений этих параметров. Значения постоянных решетки, компонент тензора жесткости, эффективных масс носителей заряда, ширины запрещенной зоны в различных долинах были взяты в обзорной работе [10]. Значения деформационных потенциалов взяты в работах [22, 23]. Положение потолка валентных зон определялось в соответствии с работой [24]. Известные коэффициенты нелинейности для параметров тройных твердых растворов были взяты в [10]. Для определения параметров, коэффициенты нелинейности для которых неизвестны, было использовано линейное приближение.

Разрыв валентных зон. Энергетические барьеры для электронов и дырок на гетерограницах КТ/AlAs определяются разрывами валентных зон между AlAs матрицей и твердыми растворами бинарных материалов InSb, InAs и AlSb, из которых состоят КТ. К сожалению, положения потолка валентной зоны для рассматриваемых в настоящей работе материалов известны с точностью ±50 мэВ [24]. Следовательно, неопределенность в величине разрыва валентных зон на гетерогранице для пары материалов достигает ±100 мэВ. Расчеты энергетического строения КТ были проведены для трех наборов положений потолков валентных зон AlAs, InSb, InAs и AlSb: (1) – для приведенных в работе [24] средних значений;

(2) – в случае, когда значения потолков валентной зоны для InSb, InAs и AlSb завышены на 100 мэВ относительно их средних значений; и (3) – когда эти значения занижены на 100 мэВ относительно их средних значений.

Влияние упругих деформаций. Рассогласование кристаллических решеток КТ и матрицы приводит к появлению упругих деформаций в гетероструктурах. Влияние деформаций на энергетическую структуру материалов, выражается в: (i) изменении объема элементарной ячейки, которое влечет за собой изменение значения ширины запрещенной зоны; (ii) расщеплении вырожденных состояний валентной зоны и непрямых минимумов зоны проводимости под действием одноосной компоненты деформации [25]. Так, например, при одноосной деформации в направлении (001) трехкратно вырожденные по направлению квазиимпульса состояния X долины зоны проводимости расщепляются на двукратно вырожденные состояния X_{XY} и состояние X_Z. Расчет деформаций в КТ проводился в приближении сплошной среды [25].

Учет эффектов размерного квантования. Рассчитав зонную диаграмму КТ, мы имеем все необходимые данные для проведения расчетов спектра энергетических состояний. Из данных ПЭМ видно, что основной вклад в эффект размерного квантования в рассматриваемых КТ дает ограничение движения носителей заряда вдоль оси роста структуры, поэтому расчеты энергетического спектра гетероструктур были проведены в одномерном приближении. КТ моделировались как слой твердого раствора $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$ ($AlSb_yAs_{1-y}$), помещенный в матрицу AlAs. В соответствии с данными ПЭМ, размер КТ был взят равным 5 нм. Расчет уровней размерного квантования проведен в однозонном приближении с использованием программного пакета Nextnano^{++} [26]. Эффективная масса носителей заряда, локализованных в слое твердого раствора, рассчитывалась по формулам (1) или (2). Для определения собственных значений гамильтониана применялся пакет *arpack* [27]. Экситонный эффект во внимание не принимался в целях упрощения расчета.

Результаты расчетов представлены на рис. 2. По горизонтальной и вертикальной осям отложены значения составов x и y твердого раствора $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$ соответственно. Символом "**I**" обозначена область составов твердых растворов (x, y), для которых $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$/AlAs КТ имеют энергетический спектр первого рода, символом "**II**" – второго рода. Области, рассчитанные для различных наборов положений потолков валентных зон, разделены линиями: красным цветом выделена линия, рассчитанная для набора средних значений положения потолков валентных зон согласно [24], зеленым и синим – для набора положений потолков валентных зон заниженного и завышенного относительно среднего значения на 100 мэВ, соответственно. Видно, что изменение положения потолка валентных зон материалов в рамках имеющейся неопределенности [24] может заметно изменять составы твердых растворов, при которых происходит смена рода энергетического спектра КТ. Тем не менее расчет однозначно показывает, что: (i) КТ $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$/AlAs имеют энергетическое строение первого рода для $x > 0.1$ при любом значении y; (ii) КТ $AlSb_yAs_{1-y}$/AlAs имеют энергетическое строение первого рода при $y > 0.55$ и энергетическое строение второго рода при $y < 0.35$.

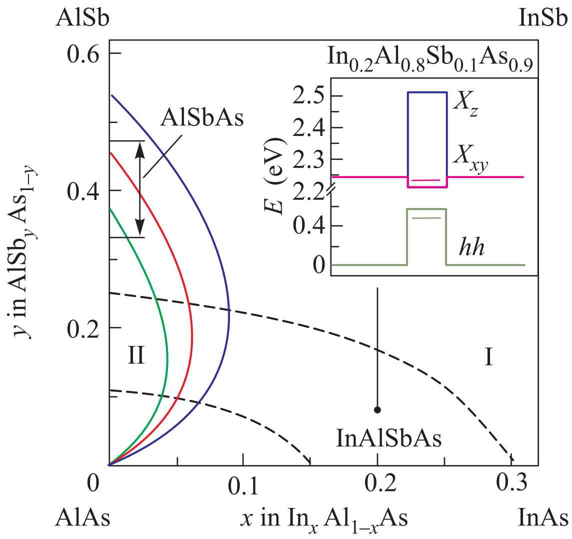

Рис. 2. (Цветной онлайн) Род энергетического спектра $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$/AlAs и $AlSb_yAs_{1-y}$/AlAs КТ в зависимости от состава твердых растворов x и y: I – область составов твердого раствора (x, y), для которых реализуется энергетический спектр первого рода, II – второго рода. Линии, разделяющие области значений составов твердых раствор (x, y), соответствующих квантовым точкам первого и второго рода, отмечены цветами. Красным показана линия, рассчитанная для набора средних значений потолков валентных зон согласно [24], зеленым и синим – для набора положений потолков валентных зон заниженного и завышенного относительно среднего значения на 100 мэВ, соответственно. Оцененные нами области значений состава твердого раствора, из которого состоят КТ в изучаемых гетероструктурах, выделены на рисунке пунктиром. На вставке приведена энергетическая диаграмма $In_{0.2}Al_{0.8}Sb_{0.1}As_{0.9}$/AlAs КТ первого рода

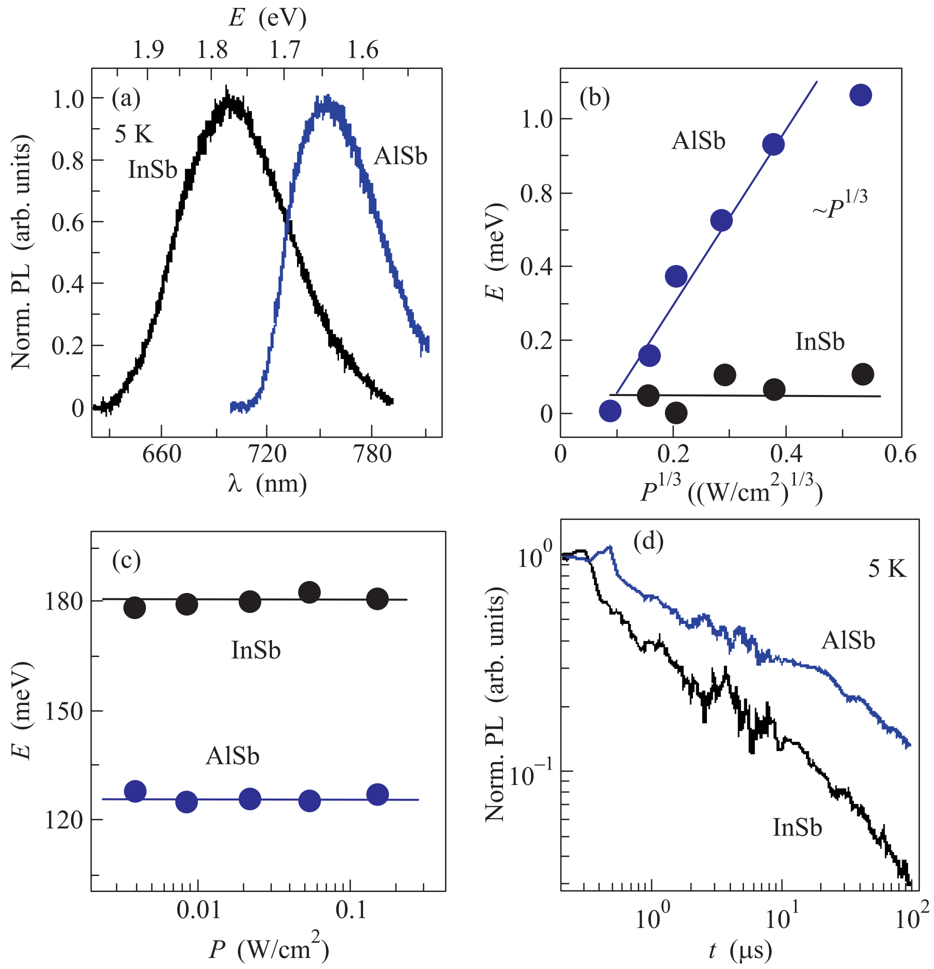

Рис. 3. (Цветной онлайн) (a) – Нормированные спектры стационарной ФЛ InSb/AlAs и AlSb/AlAs гетероструктур с КТ, измеренные при температуре 5 К и плотности мощности возбуждения $P_{\text{ex}} = 100$ мВт/см^2. (b) и (c) – Зависимости смещения положения максимума и ширины на полувысоте для полос ФЛ InSb/AlAs и AlSb/AlAs гетероструктур с КТ от плотности мощности возбуждения, соответственно. Линии на рисунках приведены для удобства восприятия; (d) – Нормированные кривые затухания ФЛ InSb/AlAs и AlSb/AlAs гетероструктур с КТ, измеренные в максимумах полос ФЛ

Энергетическая диаграмма для $In_{0.2}Al_{0.8}Sb_{0.1}As_{0.9}$/AlAs КТ первого рода приведена на вставке к рис. 2. Расчеты показывают, что основное электронное состояние в КТ принадлежит X_{XY} долине зоны проводимости (Γ и L долины расположены существенно выше по энергии и не показаны на рисунке), в то время как основное дырочное состояние принадлежит зоне тяжелых дырок. Энергия локализации дырки существенно превосходит энергию локализации электрона и составляет около 0.5 эВ. Для КТ второго рода основное электронное состояние принадлежит нерасщепленной деформацией X долине зоны проводимости AlAs матрицы.

Экспериментальные исследования энергетического строения КТ. Поскольку значения составов твердых растворов, реализующихся в КТ, заранее неизвестны, для определения рода гетероструктур необходимо было провести экспериментальные исследования. Спектры стационарной ФЛ InSb/AlAs и AlSb/AlAs гетероструктур с КТ, измеренные в режиме возбуждения носителей заряда в матрице AlAs при температуре 5 К и плотности мощности возбуждения $P_{\text{ex}} = 100$ мВт/см^2, представлены на рис. 3a. В спектрах видны полосы ФЛ, связанные с рекомбинацией экситонов в КТ. Полоса ФЛ ансамбля InAlSbAs/AlAs (AlSbAs/AlAs) КТ имеет максимум с энергией 1.77 эВ (1.64 эВ) и ширину на полувысоте 180 мэВ (125 мэВ). Разброс энергий оптических переходов в ансамбле КТ определяется дисперсией как размеров КТ (в данном случае высоты КТ, поскольку основной вклад в эффект размерного квантования дает ограничение движения носителей заряда вдоль оси роста КТ), так и состава твердого раствора, из которого состоят КТ. Расчеты, проведенные для $In_{0.2}Al_{0.8}Sb_{0.1}As_{0.9}/AlAs$ КТ, показывают, что изменение высоты КТ в пределах 3–7 нм (в соответствии с данными ПЭМ) приводит к изменению энергии оптического перехода КТ на 30 мэВ, что существенно меньше, чем наблюдаемая ширина полосы ФЛ на полувысоте (180 мэВ). Следовательно, разброс значений энергии оптического перехода в ансамбле главным образом определяется неоднородностью состава твердого раствора, из которого состоят КТ. Сопоставление рассчитанной энергии оптического перехода в КТ с энергиями переходов, измеренных в пределах ширины полос ФЛ на полувысоте, позволило оценить составы твердого раствора, из которого состоят КТ.

Для ансамбля КТ в $AlSb_yAs_{1-y}/AlAs$ гетероструктуре дисперсия составов тройного твердого раствора оценивается как $y = 0.4 \pm 0.07$ (обозначена черными штрихами на оси y рис. 2). Область возможных значений состава четвертного твердого раствора, из которого состоят КТ в $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}/AlAs$ гетероструктуре, находится в переделах $x < 0.3$ и $y < 0.25$ и обозначена на рис. 2 пунктирными кривыми. Таким образом, для обеих гетеросистем, с учетом дисперсии составов твердых растворов и неопределенности разрывов валентных зон, КТ, излучающие в пределах ширины полос ФЛ, могут иметь энергетическое строение, как первого рода, так и второго рода.

Для определения рода энергетического строения КТ в выращенных гетероструктурах проведены измерения спектров стационарной ФЛ в зависимости от плотности мощности возбуждения (P_{ex}). Согласно результатам работ [28, 29], гетероструктуры с энергетическим строением второго рода демонстрируют "синее" смещение полосы стационарной ФЛ, пропорциональное $P_{\text{ex}}^{1/3}$, в то время как спектр ФЛ гетероструктур с энергетическим строением первого рода не испытывает заметного смещения при изменении P_{ex} в том же диапазоне. Кроме того, необходимо принять во внимание тот факт, что в соответствии с расчетами, в ансамбле КТ возможно сосуществование КТ с различным типом энергетического строения, излучающие на одной длине волны. В таком случае спектр ФЛ должен состоять из двух полос, положение максимума которых по-разному зависит от P_{ex}. Это выразилось бы в изменении формы спектра ФЛ, в частности в изменении ширины на полувысоте спектра ФЛ, при изменении плотности мощности возбуждения.

Сдвиг максимума и изменение ширины на полувысоте полос ФЛ исследуемых структур полосы в зависимости от плотности мощности возбуждения представлены на рис. 3b и c, соответственно. Видно, что при изменении P_{ex} на 2 порядка величины в структурах с КТ AlSb/AlAs имеет место "синее" смещение максимума полосы ФЛ, пропорциональное $P_{\text{ex}}^{1/3}$, в то время как положение максимума полосы ФЛ InSb/AlAs структуры с КТ практически не смещается. Незначительный, порядка 1.5 мэВ, "синий" сдвиг полосы ФЛ InSb/AlAs гетероструктур связан с заполнением энергетических состояний КТ носителями заряда [30]. Ширина полос на полувысоте для обеих структур не зависит от P_{ex}. Таким образом, результаты измерений позволяют отнести КТ, сформированные в гетеросистеме AlSb/AlAs, к системам с энергетическим спектром второго рода, а сформированные в гетеросистеме InSb/AlAs – к системам с энергетическим спектром первого рода. Наблюдаемое постоянство ширины на полувысоте полос ФЛ InSb/AlAs и AlSb/AlAs гетероструктур указывает на отсутствие сосуществования КТ первого и второго рода в изучаемых гетероструктурах. Определение InSb/AlAs гетероструктуры как структуры с энергетическим строением первого рода позволило уточнить границы области возможных значений составов твердого раствора, из которого состоят полученные $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}/AlAs$ КТ: $0.1 < x < 0.3$ и $0 < y < 0.25$ (область, ограниченная на рис. 2 двумя пунктирными и синей линиями).

Динамика затухания ФЛ ансамблей $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}/AlAs$ и $AlSb_yAs_{1-y}/AlAs$ КТ приведена на рис. 3d. Измерения проведены на длинах волн, соответствующих максимумам полос стационарной ФЛ гетероструктур при 5 К. В обоих системах наблюдается длительное (вплоть до 100 мкс) затухание ФЛ, не описываемое экспоненциальным законом. Неэкспоненциальность динамики ФЛ обусловлена тем, что на длине волны регистрации мы наблюдаем сумму большого количества моноэкспоненциальных кинетик экситонов с различными временами жизни, локализованных в КТ отличающиеся формой, размерами и химическим составом [7]. Длительное затухание ФЛ КТ свидетельствует о том, что КТ, сформированные в обеих гетеросистемах, имеют непрямую запрещенную зону [7], что хорошо согласуется с проведенными расчетами энергетического строения КТ. В ансамбле КТ, сформированных в гетеросистеме AlSb/AlAs, затухание ФЛ идет медленнее, чем в ансамбле InSb/AlAs КТ. Это вызвано дополнительным пространственным разделением носителей заряда в $AlSb_yAs_{1-y}$/AlAs КТ второго рода.

Заключение. Впервые исследовано кристаллическое строение и энергетический спектр КТ, сформированных в гетеросистемах InSb/AlAs и AlSb/AlAs. Обнаружено, что осаждение 1.5 монослоев InSb или AlSb на поверхность AlAs, выполненное в режиме атомно-слоевой эпитаксии, приводит к формированию псевдоморфно напряженных КТ, состоящих из твердых растворов $In_xAl_{1-x}Sb_yAs_{1-y}$ или $AlSb_yAs_{1-y}$, соответственно. Экспериментальные исследования энергетического строения КТ и проведенные расчеты показали, что в зависимости от состава твердого раствора КТ могут иметь энергетический спектр как первого, так и второго рода. Оценены области значений составов твердых растворов, для которых реализуется энергетическая структура первого либо второго рода. Установлено, что основное электронное состояние принадлежит: в гетероструктурах с КТ первого рода непрямой X_{XY} долине зоны проводимости твердого раствора, в гетероструктурах с КТ второго рода нерасщепленной напряжениями непрямой X долине зоны проводимости AlAs.

Работа выполнена при финансовой поддержке постановление # 211 Правительства Российской федерации, контракт # 02.A03.21.0006, РФФИ (проекты, # 16-32-60015, 16-02-00242, 16-29-03034 и 14-02-00033), микроскопические исследования проведены при поддержке РНФ (грант # 14-22-00143).

---

1. Z. M. Wang, *Self Assembled Quantum Dots*, Springer, N.Y. (2008).
2. M. D. Eisaman, Rev. Sci. Instrum. **82**, 071101 (2011).
3. R. Buckley, K. Rivoire, and J. Vuckovic, Rep. Prog. Phys. **75**, 126503 (2012).
4. A. Marent, M. Geller, A. Schliwa, D. Feise, K. Potschke, D. Bimberg, N. Akcay, and N. Oncan, Appl. Phys. Lett. **91**, 242109 (2007).
5. Т. С. Шамирзаев, ФТП **45**, 97 (2011).
6. M.-E. Pistol and C. E. Pryor, Phys. Rev. B **80**, 035316 (2009).
7. T. 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).
8. A. V. Khaetskii and Yu. V. Nazarov, Phys. Rev. B **61**, 12639 (2000).
9. D. Dunker, T. S. Shamirzaev, J. Debus, D. R. Yakovlev, K. S. Zhuravlev, and M. Bayer, Appl. Phys. Lett. **101**, 142108 (2012).
10. I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan, J. Appl. Phys. **89**, 5815 (2001).
11. P. M. Petroff, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett. **45**, 620 (1984).
12. E. Michel, G. Singh, S. Slivken, C. Besikci, P. Bove, I. Ferguson, and M. Razegh, Appl. Phys. Lett. **65**, 3338 (1994).
13. T. S. Shamirzaev, D. S. Abramkin, A. K. Gutakovskii, and M. A. Putyato, Письма в ЖЭТФ **95**, 601 (2012).
14. W. A. Harrison, *Electronic Structure and Properties of Solids*, W. H. Freeman, San Francisco (1980), p. 838.
15. V. G. Dubrovskii, G. E. Cirlin, and V. M. Ustinov, Phys. Rev. B **68**, 075409 (2003).
16. K. M. Chen, D. E. Jesson, S. J. Pennycook, T. Thundat, and R. J. Warmack, Phys. Rev. B **56**, R1700 (1997).
17. Ch. Heyn, Phys. Rev. Lett. **64**, 165306 (2001).
18. C. W. Snyder, J. F. Mansfield, and B. G. Orr, Phys. Rev. B **46**, 9551 (1992).
19. D. S. Abramkin, M. A. Putyato, S. A. Budennyy, A. K. Gutakovskii, B. R. Semyagin, V. V. Preobrazhenskii, O. F. Kolomys, V. V. Strelchuk, and T. S. Shamirzaev, J. Appl. Phys. **112**, 083713 (2012).
20. T. S. Shamirzaev, A. M. Gilinsky, A. K. Kalagin, A. V. Nenashev, and K. S. Zhuravlev, Phys. Rev. B **76**, 155309 (2007).
21. 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).
22. S. H. Wei and A. Zunger, Phys. Rev. B **60**, 5404 (1999).
23. *Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, ed. by O. Madelung, M. Schultz, and H. Weiss, New series, (1982), v. 17; reprinted in: ed. by O. Madelung, Semiconductors-Basic Data, 2-nd ed., Springer, N.Y. (1996).
24. S. Wei and A. Zunger, Appl. Phys. Lett. **72**, 2011 (1998).
25. C. G. Van de Walle, Phys. Rev. B **39**, 1871 (1989).
26. Программный пакет NEXTNANO++ может быть получен на www.wsi.tum.de/nextnano и www.nextnano.de.
27. Программный пакет arpack может быть получен на http://www.caam.rice.edu/software/ARPACK.
28. 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. Kopev, and Z. I. Alferov, Phys. Rev. B **52**, 14058 (1995).
29. 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).
30. S. K. Brieley, J. Appl. Phys. **74**, 2760 (1993).