

# Фотоэлектронные свойства гетеронаноструктур GaAs/InGaAs с комбинированными слоями квантовых ям и точек, выращенных газофазной МОС-гидридной эпитаксией

И.А.Карпович<sup>1\*</sup>, Н.В.Байдусь<sup>2</sup>, Б.Н.Звонков<sup>2</sup>, С.Б.Левичев<sup>1</sup>, С.В.Тихов<sup>1</sup>,  
Д.О.Филатов<sup>3</sup>, А.П.Горшков<sup>1</sup>, С.Ю.Ермаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ

<sup>3</sup>Научно-образовательный центр твердотельных наноструктур ННГУ  
Н.Новгород, 606950 Россия

Исследовано влияние покрытия слоя самоорганизованных квантовых точек (КТ) InAs тонким двойным покровным слоем, состоящим из слоя квантовой ямы (КЯ) In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As химического состава  $x$  и ширины  $L$  и внешнего слоя GaAs толщины  $d_c$ , на спектры фотолуминесценции и фотоэдс. Гетероструктуры выращены газофазной МОС-гидридной эпитаксией. Показано, что изменением параметров двойного покровного слоя  $x$ ,  $L$  и  $d_c$  можно контролируемо управлять энергией основного перехода в КТ в интервале 0,72 – 0,95 эВ, перекрывающем оба окна прозрачности оптического волокна на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм, при высоком выходе фотоэмиссии. Малая толщина двойного слоя ( $d_c + L < 20$  нм) обеспечивает релаксацию упругих напряжений в КТ, приводящую к красному смещению энергии основного перехода в КТ, а энергетические барьеры для электронов и дырок на границе In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs снижают скорость поверхностной рекомбинации. В комбинированных слоях КЯ/КТ имеет место также красное смещение энергии основного перехода в гибридной КЯ (In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As + смачивающий слой InAs), образующейся в пространстве между квантовыми точками.

Нанесение металлических слоев Au и Pt на структуры с тонким двойным покровным слоем толщиной до 20 нм не создает упругих дополнительных напряжений в КТ и поэтому не влияет на энергию оптических переходов диодов с барьером Шоттки. При  $d_c < 7$  нм исчезает фоточувствительность от КТ в барьерах Шоттки, но сохраняется в барьерах полупроводник/электролит. Обнаружено увеличение обратного тока диодов Шоттки, связанное с тунелированием электронов из металла на уровни КТ. Полученные структуры с тонким двойным покровным слоем могут быть использованы для создания оптоэлектронных приборов.

## Введение

Гетероструктуры с самоорганизованными квантовыми точками (ГКТ) InAs/GaAs вызывают повышенный интерес исследователей благодаря широким перспективам их применения в оптоэлектронике, в частности, для создания высокоэффективных инжекционных лазеров для волоконно-оптических линий связи [1,2]. Актуальной задачей является выращивание светодиодных и лазерных структур, излучающих в окне максимальной прозрачности оптического волокна на длине волны  $\approx 1,55$  мкм, которой соответствует энергия основного перехода в КТ  $E_0(QD) \approx 0,8$  эВ. Одним из путей ее решения является покрытие слоя квантовых точек (КТ) InAs слоем квантовой ямы (КЯ) In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As [3–5], снижающим упругие

\* Тел.: +7-8312-65-69-67; E-mail: karpovich@phys.unn.ru

напряжения в КТ, что приводит к красному смещению энергии  $E_0(QD)$ . Недавно в подобных структурах удалось получить фотолуминесценцию в этой области, но с низким квантовым выходом [6].

Изучение структур с комбинированными слоями КЯ/КТ представляет и самостоятельный интерес благодаря проявлению в них ряда корпоративных эффектов, обусловленных объединением слоев КЯ и КТ в процессе их роста: перераспределения и релаксации упругих напряжений, диффузионного перемешивания компонентов КТ и КЯ, гибридизации их энергетического спектра и др. Эти эффекты, очевидно, могут в разной степени влиять на морфологию и энергетический спектр КТ в структурах, выращенных разными методами и при разных условиях. В связи с этим отметим, что свойства комбинированных слоев КЯ/КТ исследовались, в основном, на структурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

В [7] нами исследовано влияние покрытия слоя КТ квантовой ямой в структурах, выращенных газофазной эпитаксией с применением металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) при атмосферном давлении. В отличие от ГКТ, полученных МПЭ, в структурах, полученных ГФЭ МОС, эффект красного смещения энергии основного перехода в КТ при покрытии слоя КТ слоем КЯ оказался мал,  $\Delta E_0(QD) < 30$  мэВ. Однако в этих структурах и без покрытия слоя КТ внешней КЯ были получены рекордно низкие значения энергии  $E_0(QD)$  до 0,85 эВ при комнатной температуре [8]. Предполагается, что в структурах, полученных ГФЭ МОС, в результате диффузионного перемешивания In и Ga на гетерогранице GaAs/InAs самопроизвольно образуется прослойка твердого раствора, играющая роль внешней КЯ. Она вызывает перераспределение и частичную релаксацию в КТ упругих напряжений, что должно приводить к красному смещению спектра КТ в результате возможности роста более крупных псевдоморфных кластеров–КТ и непосредственного влияния уменьшения напряжений на энергию перехода. Естественно, что в этом случае нанесение дополнительной КЯ должно слабо влиять на энергию перехода.

В этих же структурах обнаружено большое красное смещение энергии основного перехода в КЯ InGaAs,  $\Delta E_0(QW) \sim 100$  мэВ, при нанесении ее на слой КТ, связанное с гибридизацией энергетического спектра внешней КЯ InGaAs и квантовой ямы смачивающего слоя InAs в пространстве между квантовыми точками.

Вопрос о влиянии покрытия слоя КТ слоем КЯ остается не выясненным, в частности, зависимость эффектов красного смещения энергии основного перехода  $E_0(QD)$  от параметров КЯ, от толщины спейсерного слоя между ними, от толщины покровного слоя и др. Целью данной работы являлось изучение влияния состава и толщины материала КЯ, а также толщины покровного слоя GaAs на энергетический спектр и фотоэлектронные свойства гетеронаноструктур с комбинированными слоями КЯ/КТ, выращенных ГФЭ МОС при атмосферном давлении.

### ***Методика эксперимента***

Гетероструктуры выращивали на регулярной или с отклонением на  $3^0$  в направлении [110] поверхности (100) полуизолирующего GaAs методом ГФЭ МОС. Буферный слой n-GaAs, толщиной  $\sim 0,6$  мкм, с концентрацией электронов порядка  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , выращивали при температуре  $650^0 \text{ C}$ , затем температуру снижали до

520<sup>0</sup> С и наносили слои КТ InAs (5 монослоев), КЯ In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x \sim 0,2-0,3$ , ширина ямы  $L = 2-12$  нм) и покровный слой GaAs толщиной  $d_c = 2-30$  нм. Для повышения однородности КТ по размерам слой InAs в процессе его нанесения легировался висмутом [9].

Диоды Шоттки создавались нанесением на поверхность покровного слоя полупрозрачных блокирующих контактов толщиной  $\approx 20$  нм из Au и Pd методом термического распыления в вакууме и вжиганием в буферный слой омического контакта из Sn.

Морфология поверхностных и вскрытых селективным травлением слоев КТ [9] исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе “Accurex” TMX-2100 в контактном режиме. По данным атомно-силовой микроскопии КТ в полученных структурах имели латеральные размеры  $40 \div 50$  нм, высоту  $4 \div 5$  нм, поверхностную плотность  $\approx 5 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>. Исследовались также спектры фотолюминесценции (ФЛ) ГНС и фотоэдс в переходе полупроводник/электролит (ФПЭ) и в барьерах Шоттки (ФБШ). Методика фотоэлектрических измерений описана в [10].

### *Экспериментальные результаты и обсуждение*

Структуры КЯ/КТ с толстым покровным слоем GaAs. В результате изменения некоторых условий роста, в частности, уменьшения содержания In в слое КТ, исследованные структуры имели более высокие значения энергии основного перехода  $E_0(QD) \sim 0,95$  эВ при 300 К, чем исследованные ранее структуры [7,8]. Они оказались более чувствительными к покрытию слоя КТ внешней КЯ, вероятно, в связи с меньшим диффузионным размытием гетерограницы КТ InAs/GaAs.

Рис.1а показывает влияние покрытия слоя КТ слоем внешней КЯ In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ( $x=0,2$ , ширина ямы  $L=5$  нм) на спектры ФПЭ при 300 К. Покровный слой структур в обеих структурах имел толщину 25 нм, значительно превышающую высоту КТ. В комбинированном слое КЯ/КТ красное смещение энергии основного перехода в КТ  $\Delta E_0(QD)$  на спектрах ФПЭ и ФЛ составило  $\approx 60$  мэВ и минимальное значение  $E_0(QD) \sim 0,87$  эВ при 300 К. Эти данные хорошо согласуются с измерениями спектров ФЛ структур при 77 К (рис.1б). Эффект красного смещения  $E_0(QD)$ , связанный с частичной релаксацией упругих напряжений в КТ, исчезает при нанесении между слоями КЯ и КТ спейсерного слоя GaAs толщиной 5 нм.

Спектр ФЛ изолированной КЯ при указанных выше параметрах  $x$  и  $L$  приведен на рис.1б. Значение  $E_0(QW)$  для нее  $\approx 1,36$  эВ близко к энергии основного перехода для смачивающего слоя InAs  $E_0(WL) \approx 1,35$  эВ. В гибридной КЯ, образованной слоями InGaAs и InAs в пространстве между КТ, энергия основного перехода  $E_0(QW+WL) \approx 1,29$  эВ при 77 К (рис.1б) и  $\approx 1,21$  эВ при 300 К (рис.1а). Причину красного смещения  $E_0(QW+WL)$  поясняет схема на рис.2.

Расчеты энергетического спектра гибридной ступенчатой КЯ показывают, что влияние двух ям слабо влияет на энергию основного состояния электронов  $E_{e0}$ , которое определяется, в основном, параметрами КЯ InGaAs. Но в гибридной дырочной КЯ, из-за большой эффективной массы дырок, основное состояние  $E_{h0}$  попадает в потенциальную яму смачивающего слоя, что и приводит к красному смещению  $E_0(QW+WL) = E_{e0} - E_{h0}$ .

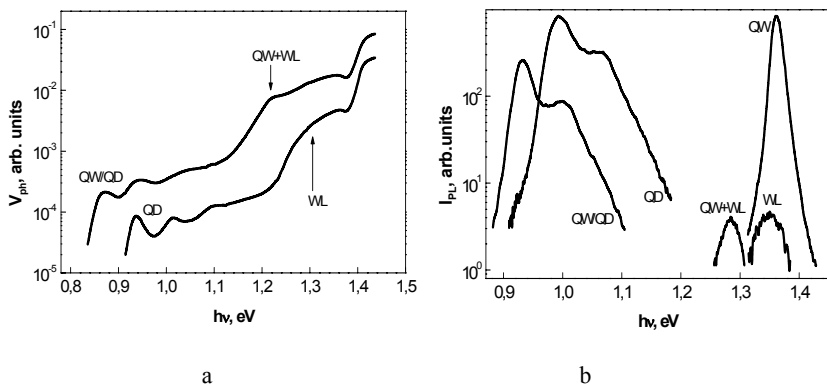


Рис. 1. Влияние покрытия слоя КТ слоем КЯ на энергию основного перехода в КТ: а) Спектры ФПЭ (300 К). б) Спектры ФЛ (77 К).

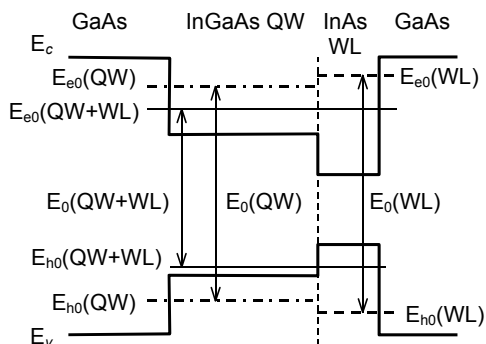


Рис. 2. Энергетическая диаграмма гибридной КЯ QW+WL, образованной слиянием КЯ смачивающего слоя (WL) и внешней КЯ (QW) в пространстве между КТ. Пунктиром показаны уровни основного состояния в изолированных слоях WL и QW.

Структуры с поверхностным слоем КЯ/КТ. Значительно большее красное смещение  $E_0(QD)$  получено в структурах с поверхностным слоем КЯ/КТ, в которых роль покровного слоя выполнял слой внешней КЯ. Уменьшение толщины покровного слоя GaAs с 25 до 5 нм привело к уменьшению  $E_0(QD)$  на спектрах ФПЭ с 0,955 до 0,86 эВ (рис.3), а нанесение вместо GaAs такого же по толщине слоя InGaAs ( $x = 0,2$ ) уменьшило  $E_0(QD)$  до значения 0,78 эВ, которому соответствует длина волны ФЛ 1,59 мкм. Встраивание слоя КТ между двумя одинаковыми КЯ ( $x = 0,2$ ,  $L=5$  нм) привело к относительно небольшому дополнительному красному

смещению  $E_0(QD) \approx 0,755$  эВ, но значительно ухудшило однородность КТ, о чем свидетельствует отсутствие в спектре тонкой структуры, связанной с возбужденными состояниями КТ.

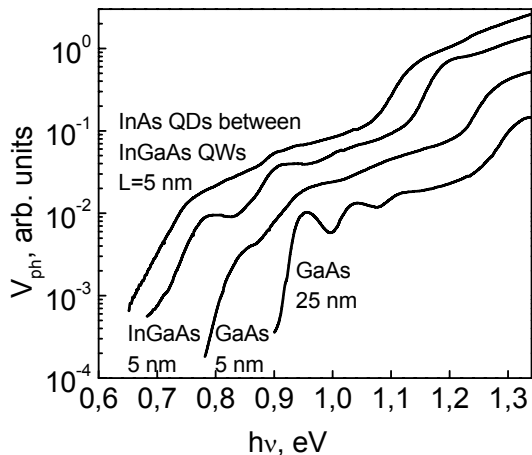


Рис. 3. Влияние толщины и состава покровного слоя на спектры ФПЭ. Состав и толщина покровного слоя указаны на рисунке.

Как и для структур с относительно толстым покровным слоем, на структурах с поверхностными слоями КЯ/КТ наблюдается красное смещение спектра гибридной КЯ, которое составляет около 150 мэВ относительно смачивающего слоя. Интересно, что в структуре с тонким покровным слоем GaAs также наблюдается небольшое красное смещение спектра смачивающего слоя, свидетельствующее о том, что он имеет большую толщину, чем в структурах с толстым покровным слоем. Увеличение толщины покровного слоя и связанный с этим рост упругих напряжений в смачивающем слое приводят к его структурной перестройке, которая заключается в его утонении и образовании мелких КТ [9].

В структурах с поверхностными слоями КЯ/КТ достигается энергия основного перехода даже меньше 0,8 эВ. Однако существенным недостатком этих структур является слабая интенсивность ФЛ от КТ из-за сильного влияния поверхностной рекомбинации.

Структуры с тонким двойным покровным слоем GaAs/InGaAs. Можно было ожидать, что нанесение на комбинированный слой КЯ/КТ достаточно тонкого покровного слоя GaAs ослабит канал поверхностной рекомбинации, при этом не произойдет сильного голубого смещения  $E_0(QD)$ . В [11] на примере гетеропары InGaP/GaAs было показано, что при нанесении на более узкозонный полупроводник (GaAs) тонкого слоя более широкозонного, структурно сопряженного с GaAs полупроводника ( $In_xGa_{1-x}P$  с  $x \approx 0,5$ ), наблюдается значительное уменьшение скорости

поверхностной рекомбинации в GaAs, связанное с наличием барьеров на границе InGaP/GaAs, ограничивающих рекомбинационные потоки электронов и дырок на внешнюю дефектную поверхность InGaP (это явление было названо гетерозпитаксиальной пассивацией поверхности). В данном случае слой GaAs должен играть роль пассивирующего покрытия по отношению к комбинированному слою КЯ/КТ, причем псевдоморфность последнего автоматически обеспечивает структурное сопряжение и, следовательно, низкую плотность поверхностных состояний на гетерогранице. Эксперимент должен был показать, можно ли при нанесении тонкого слоя GaAs обеспечить одновременно и релаксацию упругих напряжений и уменьшение скорости поверхностной рекомбинации.

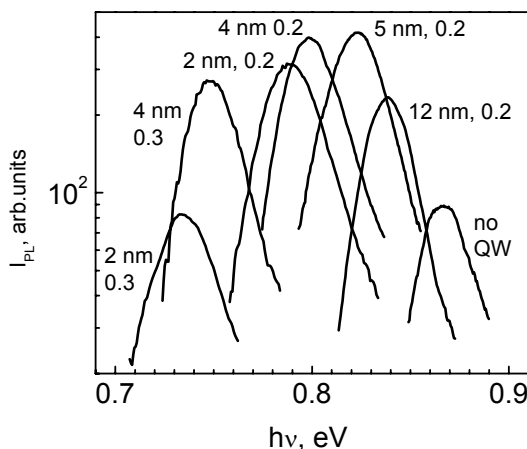


Рис. 4. Влияние ширины и состава КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  двойного покровного слоя InGaAs/GaAs на спектры ФЛ. Ширина и состав КЯ указаны на рисунке. Толщина внешнего слоя GaAs для всех структур 5 нм.

На рис.4 и 5 приведены спектры ФЛ и ФПЭ структур, в которых на комбинированный слой КЯ/КТ с разной шириной и составом КЯ нанесен покровный слой GaAs толщиной 5 нм. При этой толщине, как показано выше, он не создает больших упругих напряжений в подстилающем слое КТ. В структурах этого типа интенсивность ФЛ при 300 К осталась практически такой же, как в структурах с толстым покровным слоем GaAs, и в то же время сохраняется значительное красное смещение  $\Delta E_0(\text{QD})$ . Спектры ФЛ и ФПЭ свидетельствуют о высоком качестве структур с тонким покровным слоем GaAs. Ширина пика основного перехода составляет 30–35 мэВ. На спектрах ФПЭ разрешается до трех уровней возбужденных состояний КТ. Увеличение содержания In в КЯ и уменьшение ширины КЯ увеличивают красное смещение  $E_0(\text{QD})$ . При  $x = 0,3$  и  $L=2$  нм достигнуто значение  $E_0(\text{QD})=0,72$  эВ ( $\lambda_0 = 1,7$  мкм). Это, по-видимому, наименьшее достигнутое к настоящему времени значение  $E_0(\text{QD})$  для системы InGaAs/GaAs.

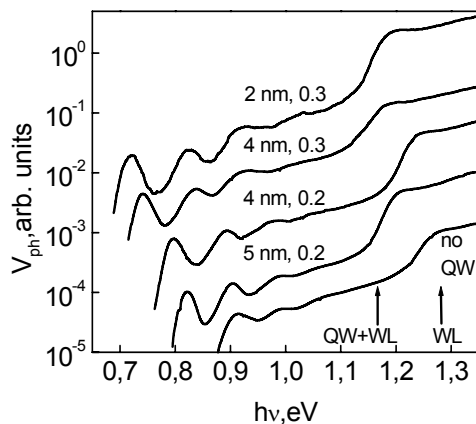


Рис. 5. Влияние ширины и состава КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  двойного покровного слоя  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  на спектры ФПЭ. Ширина и состав КЯ указаны на рисунке. Толщина внешнего слоя  $\text{GaAs}$  для всех структур 5 нм. Нижняя кривая – для структуры с однородным покровным слоем  $\text{GaAs}$  толщиной 20 нм.

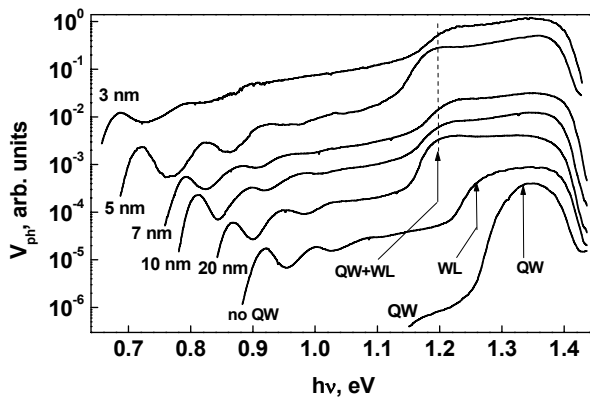


Рис. 6. Влияние толщины внешнего слоя  $\text{GaAs}$  двойного покровного слоя  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$  на спектры ФПЭ. Толщина слоя указана на рисунке. У всех структур ширина КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  2 нм, состав  $x = 0,3$ . Нижняя кривая – для структуры с изолированной КЯ шириной 2 нм,  $x = 0,3$ .

Варьируя параметры тонкого двойного покровного слоя  $x$ ,  $L$  и  $d_c$ , можно управлять длиной волны эмиссии из КТ в интервале 1,3–1,7 мкм. Эмиссия при 1,55 мкм может быть получена при различной комбинации этих параметров. Для выявления влияния толщины внешнего слоя GaAs  $d_c$  на энергию перехода  $E_0(QD)$  была изготовлена серия КЯ/КТ структур с фиксированными параметрами КЯ ( $x = 0,3$ ,  $L = 2$  нм), при которых наблюдается наибольшее красное смещение, и разными значениями  $d_c$ . Как видно из рис.6, с увеличением  $d_c$  энергия основного перехода увеличивается, причем особенно сильно в диапазоне малых толщин. Так как высота барьера в КТ при этом практически не изменяется, этот результат является дополнительным подтверждением того, что основной причиной красного смещения  $E_0(QD)$  является релаксация упругих напряжений в КТ, которая зависит как от суммарной толщины двойного покровного слоя, так и от его состава.

Измерения спектров этой серии структур показали, что длину волны излучения КТ 1,55 мкм можно получить при толщине внешнего слоя GaAs 10 нм. В связи с этим представляло интерес выяснение возможности создания диодных структур с барьером Шоттки и, возможно, светодиодных структур.

**Диоды Шоттки.** На рис.7 приведены спектры ФБШ ряда диодов с одинаковым комбинированным слоем КЯ/КТ и разной толщиной  $d_c$  (кривые 2 – 5). Все структуры получены в одинаковых условиях. Для сравнения приведен также спектр структуры с одиночным слоем КТ и покровным слоем толщиной 30 нм (кривая 1).

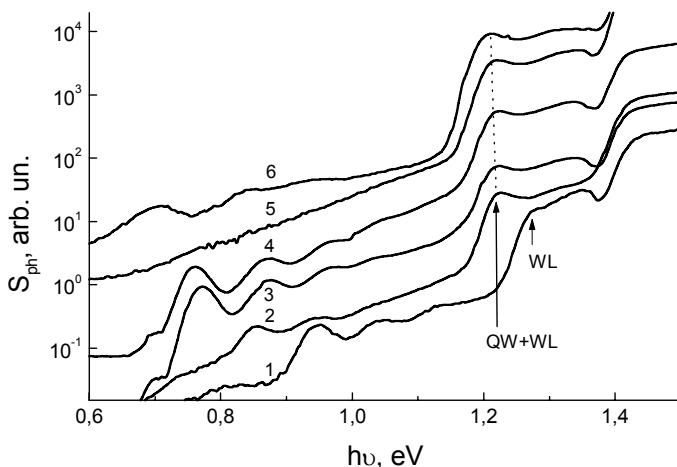


Рис.7. Спектры ФПЭ гетероструктур Au/KPC с комбинированным слоем КЯ/КТ с различной толщиной покровного слоя.  $d_c$ , нм: 1 – 30 (нет КЯ); 2 – 20; 3 – 10; 4 – 7; 5 – 5; 6 – 5 (контакт КРС/электролит)



Энергия основного перехода для последней структуры  $E_0(QD) = 0,95$  эВ имеет наибольшее значение. На кривой 1 замечен также экситонный пик ФЭЧ от смачивающего слоя при энергии  $E_0(WL) = 1,27$  эВ. На всех спектрах структур с комбинированными слоями КЯ/КТ наблюдается смещенный в область меньших энергий экситонный пик от гибридной КЯ (QW+WL) с энергией основного перехода  $E_0(QW+WL) = 1,22$  эВ. На спектрах структур с минимальной толщиной покровного слоя 3 и 5 нм, соизмеримой с высотой КТ, не видно полосы фоточувствительности от КТ (кривая 2), которая хорошо проявляется на структурах с большим значением  $d_c$  (кривые 3–5). О наличии КТ в этих структурах свидетельствуют спектры ФПЭ этих же структур (кривая 6), полученные на контакте КРС – жидкий электролит (2М раствор KCl в смеси с глицерином 1:1), причем на структуре с  $d_c = 3$  нм получено наибольшее красное смещение  $E_0(QD)$  до 0,69 эВ, которому соответствует длина волны 1,77 мкм. Это, по-видимому, минимальная энергия основного перехода, полученная для структур с КТ InGaAs/GaAs.

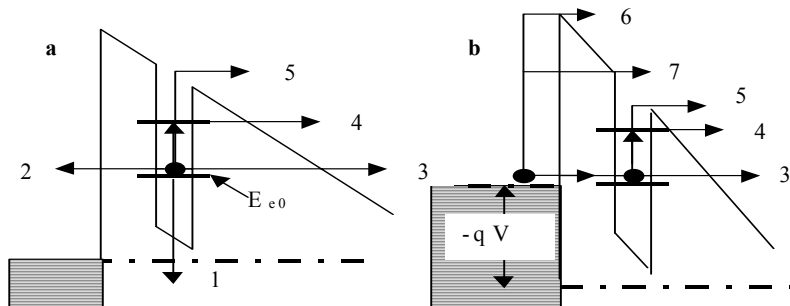


Рис.8. а) Возможные переходы фотовозбужденных электронов в КТ при тонком двойном покровном слое. б) Механизмы протекания обратного тока в диодах Шоттки с тонким двойным покровным слоем.

Отсутствие полосы ФБШ от КТ в структурах с  $d_c < 7$  нм (на вершинах КТ, обращенных к металлу, суммарная толщина КЯ и покровного слоя, вероятно, значительно меньше номинальной толщины этих двух слоев 9 нм), очевидно, обусловлено тем, что в этих структурах вместо эмиссии неравновесных электронов и дырок из КТ в GaAs и разделения их в электрическом поле барьера (рис.2а, переходы 3–5) более вероятным становится процесс туннелирования электронов и дырок из КТ в металл (переход 2) и их безызлучательной рекомбинации.

Этот механизм подтверждает и отсутствие ФЛ от КТ в этих структурах, хотя при фотовозбуждении участков структуры вне металлического электрода ФЛ от КТ наблюдается, причем пик ФЛ практически совпадает с пиком ФЭЧ на контакте КРС/электролит. Комбинированная КЯ находится в более выгодном для эмиссии и разделения электронов и дырок в полупроводнике положении, так как у нее значительно меньше эмиссионный барьер, чем у КТ, и толщина покровного слоя, препят-

ствующего туннелированию электронов и дырок в металл, близка к номинальной. Поэтому полоса ФЭЧ от нее сохраняется даже при толщине покровного слоя 3 нм. Сравнением спектров ФЛ КРС под электродами и вне их, а спектров ФБШ и ФПЭ на одних и тех же структурах было установлено, что нанесение электродов не влияет существенно на значение  $E_0(QD)$  и, следовательно, не создает значительных дополнительных напряжений в КТ.

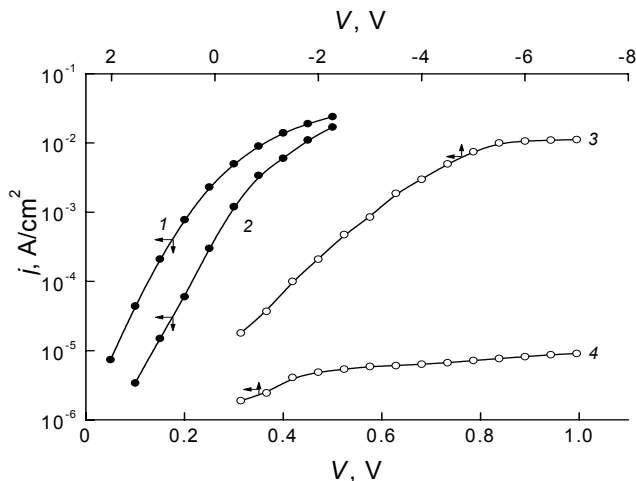


Рис. 9. Вольтамперные характеристики диодов при 350 К. 1, 2 – прямой ток; 3, 4 – обратный ток. 1, 3 – диод на структуре КЯ/КТ ( $d_c = 7$  нм); 2, 4 – диод на буферном слое GaAs.

**Вольтамперные характеристики.** Встраивание вблизи металлического контакта слоя КЯ/КТ приводит к увеличению прямого и обратного тока диодов (рис.9), причем величина изменения токов сильно зависит от толщины покровного слоя  $d_c$ . При малых и при больших толщинах эффект уменьшается. Максимальное увеличение обратного тока наблюдалось при  $d_c = 7$  нм (кривая 3). При  $d_c > 20$  нм обратный ток практически не зависел от наличия квантово-размерного слоя. Экспоненциальный рост обратного тока диодов Шоттки на GaAs при достаточно больших смещениях объясняется включением механизма термоактивированной туннельной эмиссии через вершину треугольного барьера (переход 7 на рис.8б) [14].

В диодах Шоттки с квантово-размерными слоями, расположенными достаточно близко к металлическому контакту, появляется возможность туннелирования электронов из металла на уровень основного состояния КТ  $E_{e0}$  при его приближении к уровню Ферми в металле (рис.8б). Из этого состояния происходит эмиссия электронов по возможным механизмам 3–5. Очевидно, что только при некотором опти-

мальном удалении слоя КТ от металла будет максимальное увеличение тока. При слишком малом удалении требуется большое напряжение смещения, чтобы приблизить уровень  $E_{c0}$  к уровню Ферми в металле, при большом удалении это легко достигается, но при этом вероятность туннелирования через барьер резко уменьшается.

К сожалению, ограничения на толщину внешнего слоя GaAs  $d_c$  позволяют использовать эти QW/QD структуры только в лазерах с поверхностным оптическим или электронным возбуждением и препятствуют их применению в лазерах инжекционного типа и в диодных структурах.

### ***Заключение***

В результате проведенных исследований установлена зависимость энергии основного перехода в КТ InAs от параметров тонкого двойного покровного слоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  (ширины  $L$  и состава  $x$  КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и толщины  $d_c$  внешнего слоя GaAs) в гетероструктурах, выращенных газофазной МОС-гидридной эпитаксией. Показано, что изменением этих параметров можно контролируемо управлять энергией перехода в КТ InAs в интервале 0,72–0,95 эВ, перекрывающем оба окна прозрачности оптического волокна на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм, при высоком выходе фотоэмиссии. Полученные структуры могут быть использованы в лазерах с поверхностным фото или электронным возбуждением, а также в диодах с барьером Шоттки.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (03-02-17178, 01-02-16441), Минобразования РФ (Е00-3.4-326), НАТО (SfP-973799) и совместной программы Минобразования РФ и CRDF (BRHE Program, REC-001).

### ***Литература***

- [1] Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. //ФТП. 1998. Т.32. С.385.
- [2] M.Grundmann. //Physica. 2000. E5. P.167.
- [3] K.Nishi, H.Saito, S.Sugou, J-S Lee. Appl. Phys. Lett. //1999. V.74. P.1111.
- [4] Воловик Б.В., Цацульников А.Ф., Бедарев Д.А., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Малеев Н.А., Мусихин Ю.Г., Суворова А.А., Устинов В.М., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д., Вернер П. //ФТП. Т.33. С.990.
- [5] Ковш А.Р., Жуков А.Е., Малеев Н.А., Михрин С.С., Устинов В.М., Цацульников А.Ф., Максимов М.В., Валовик Б.В., Бедарев Д.А., Шерняков Ю.М., Кондратьева Е.Ю., Леденцов Н.Н., Копьев П.С., Алфёров Ж.И., Бимберг Д. //ФТП, 1999. Т.33. С.1020.
- [6] J.Tatebayashi, M.Nishioka, Y.Arakawa. //Appl. Phys. Lett. 2001. V.78. P.3469.
- [7] Карпович И.А., Звонков Б.Н., Филатов Д.О., Левичев С.Б., Байдусь Н.В., Некоркин С.М. //Поверхность. 2000. №11. С.27–31.
- [8] Zvonkov B.N., Karpovich I.A., Baidus N.V., Filatov D.O., Gushina Yu.Yu., Morozov S.V., Levichev S.B. //Proc.25th International Conference on Physics of Semiconductors (Eds. N. Miura and T. Ando), Osaka, Japan. 2000. P.397.

- [9] Звонков Б.Н., Карпович И.А., Байдусь Н.В., Филатов Д.О., Морозов С.В. //ФТП. 2001. Т.35, № 1. С.92–97.
- [10] Карпович И.А., Горшков А.П., Звонков Б.Н., Левичев С.Б., Морозов С.В., Филатов Д.О. //ФТП. 2001. Т.35, № 5 С.564–570.
- [11] Карпович И.А., Степихова М.В. //ФТП. 1998. Т.32, №2. С.182–186.
- [12] H. Saito, K. Nishi, S. Sugou. //Appl. Phys. Lett. 1998. V.73. P.2742.
- [13] Passaseo, G. Maruccio, M.De Vittorio, R. Rinaidi, R. Cingolani, M. Lomascolo. //Appl. Phys. Lett. 2001. V.78. P.1382.
- [14] Торхов Н.А. //ФТП. 2001. Т.35.С.823.
- [15] Brunrov P.N., Patane A., Levin A., et al. //Phys. Rev. B. 2002. V.65. P.085326.

### **Photoelectric properties of GaAs/InGaAs heterostructures with quantum well and dots combined layers grown by MOVPE**

**I.A.Karpovich<sup>1\*</sup>, N.V.Baidus<sup>2</sup>, B.N.Zvonkov<sup>2</sup>, S.B.Levichev<sup>1</sup>, S.B.Tikhov<sup>1</sup>, D.O.Filatov<sup>3</sup>, A.P.Gorshkov<sup>1</sup>, S.Yu.Ermakov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*University of Nizhni Novgorod, 23 Gagarin Ave., Nizhniy Novgorod 603950 Russia*

<sup>2</sup>*Physical-Technical Research Institute of NNSU*

<sup>3</sup>*Research and Educational Center for Physics of solid state nanostructures of NNSU, Nizhni Novgorod, Russia*

The effect of covering of a layer of the self-organized InAs quantum dots (QD) by a thin double covering layer consisting of a layer of a  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  quantum well (QW) of an elemental composition  $x$  and width  $L$  and GaAs external layers of the width  $d_c$ , on a photoluminescence and photovoltage spectra is investigated. The heterostructures are grown by Atmospheric Pressure Metal Organic Vapor Phase Epitaxy. It is shown that changing of parameters of a double covering layer  $x$ ,  $L$  and  $d_c$  it is possible tuning of energy of the ground transition in QD in an interval 0.72–0.95 eV, bridging over both spectral window of an optic fiber in region of 1.3 and 1.55  $\mu\text{m}$ , at high photoemission yield. The small thickness of a double layer ( $d_c + L < 20$  nm) provides a relaxation of elastic strain in QD, resulting to red shift of QD ground transition energy, and the energy barriers for electrons and holes on  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  interface decrease of a surface recombination. In QW/QD combined layers has a place also red shift of ground transition energy of hybrid QW ( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As} + \text{InAs}$  wetting layer), formed in a space between quantum dots.

The deposition of metal Au and Pt layers on the heterostructures with a thin double covering layer by width up to 20 nm does not create additional elastic stresses in QDs and consequently does not influence on the energy of optical transitions of diodes with a Schottky barrier. At  $d_c < 7$  nm a photosensitivity from QDs in Schottky barriers is disappeared, but ones is saved in the semiconductor / electrolyte barriers. The increase of a reverse current of Schottky diodes, related tunneling of electrons from metal to QD energy levels was found. The obtained heterostructures with a thin double covering layer can be utilized for development of optoelectronic devices.

---

\* Tel.: +7-8312-65-69-67; E-mail: karpovich@phys.unn.ru