

Оптоэлектронные свойства гетеронаноструктур с комбинированными слоями квантовых ям и точек In(Ga)As/GaAs

© Н.С. Волкова[†], А.П. Горшков, А.В. Здоровейцев, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Проведен анализ влияния встраивания квантовой ямы InGaAs в структуры с квантовыми точками InAs/GaAs, выращенными газофазной эпитаксией в режиме с увеличенным временем прерывания роста, на их оптоэлектронные свойства. Установлено, что энергетический спектр квантовых точек слабо чувствителен к изменениям толщины и состава двойного покровного слоя InGaAs/GaAs. Нанесение квантовой ямы на слой квантовых точек снижает эффективную высоту эмиссионного барьера в них. Определены условия, при которых квантовая яма может быть использована для защиты активного слоя квантовых точек от проникновения дефектов, возникающих при анодном окислении поверхности структуры.

1. Введение

В современной микро- и нанoeлектронике важное место занимают полупроводниковые квантово-размерные структуры на основе соединений A^{III}B^V (GaAs, InAs, GaN, InSb и др.). Благодаря высокой эффективности излучательной рекомбинации в этих материалах, обусловленной их прямозонностью, основной областью применения таких структур является создание светоизлучающих приборов [1,2]. До настоящего времени актуальной остается задача создания бездефектных приборных структур с квантовыми точками (КТ) InAs/GaAs, излучающих в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм, перспективных для применения в волоконно-оптических линиях связи. Одним из вариантов смещения длины волны излучения КТ в требуемую область спектра является покрытие слоя КТ InAs слоем квантовой ямы (КЯ) InGaAs [3–6]. Однако, как показывает сравнительный анализ [3–6], величина сдвига энергетического спектра КТ в структурах, выращенных разными методами в разных режимах роста, может существенно различаться (от 40 мэВ в [4] до 140 мэВ в [3]).

В данной работе исследованы структуры с КТ InAs/GaAs, выращенными газофазной эпитаксией в недавно разработанном режиме роста с увеличенным временем прерывания подачи реагентов. Установлены закономерности влияния встраивания слоя КЯ InGaAs на энергетический спектр, эффективность эмиссии фотовозбужденных носителей из КТ и чувствительность фотоэлектрического сигнала от КТ к поверхностному дефектообразованию.

2. Методика эксперимента

В работе исследовались структуры с одиночным слоем КТ и с комбинированным слоем КЯ/КТ, в которых слой КЯ наносился либо непосредственно на слой КТ,

либо они разделялись спейсерным слоем GaAs. Структуры выращивались в группе эпитаксиальной технологии Научно-исследовательского физико-технического института ННГУ методом газофазной эпитаксии (ГФЭ) из металлоорганических соединений (МОС) при атмосферном давлении водорода — газа-носителя паров МОС. На поверхности (100) подложек n^+ -GaAs при температуре 600°C выращивался буферный слой n -GaAs толщиной ~ 0.6 мкм с концентрацией электронов $\sim 10^{16}$ см⁻³, затем температура снижалась до 520°C и последовательно наносились слой КТ InAs, спейсерный слой GaAs толщиной $d_s \approx 0, 3$ или 12 нм, КЯ In_{0.2}Ga_{0.8}As толщиной 5 нм и покровный слой GaAs толщиной 30 нм. В процессе роста слоя InAs время технологического прерывания между подачей триметилиндия и арсина в реактор было увеличено относительно стандартного режима (с 4 до 8 с) [7,8]. Данное время было определено в результате оптимизации ростового процесса с целью получения более однородных массивов КТ [8].

Для введения в структуры дефектов применялось анодное окисление. Окисление проводилось в вольт-статическом режиме. В качестве электролита использовался водный раствор 0.5 М пентабората аммония в смеси с этиленгликолем в соотношении 1:1. Толщина окисла $d_{ок}$ определялась по постоянной роста 2 нм/В [9]. При расчете остаточной толщины покровного слоя учитывалось, что на образование окисла толщиной $d_{ок}$ расходуется слой GaAs толщиной $0.67d_{ок}$ [9].

Исследовались спектры поверхностной барьерной фотодс [10] в диапазоне температур $T = 77–350$ К и фотолюминесценция (ФЛ) при 77 К. Фотоэлектрические спектры измерялись по методике „soft-contact“ [11].

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фоточувствительности S_{ph} при 300 К структур с комбинированным слоем КЯ/КТ при разной толщине спейсерного слоя d_s (кривые 1–3), а также с одиночным слоем КТ (кривая 4).

[†] E-mail: volkovans88@mail.ru

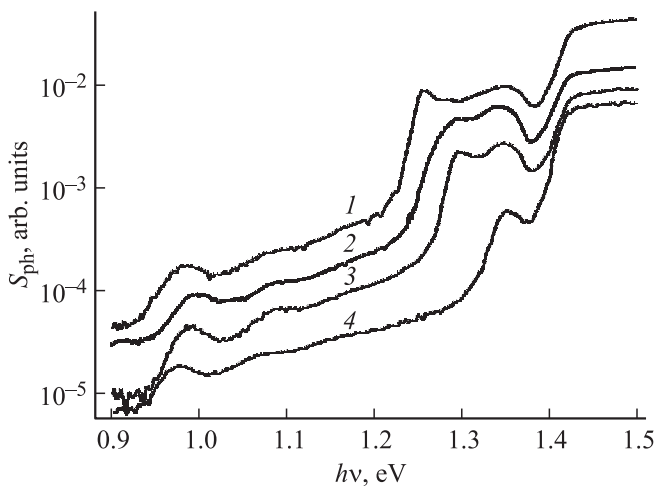


Рис. 1. Спектры фоточувствительности при 300 К структур с комбинированным слоем КЯ/КТ при разной толщине спейсерного слоя d_s (1–3) и с одиночным слоем КТ (4). d_s , нм: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 12.

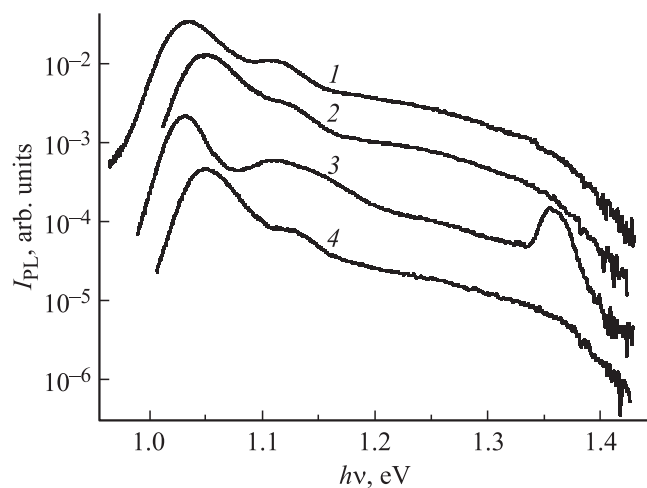


Рис. 2. Спектры ФЛ при 77 К структур с комбинированным слоем КЯ/КТ при разной толщине спейсерного слоя d_s (1–3) и с одиночным слоем КТ (4). d_s , нм: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 12.

Во всех спектрах наблюдается пик при энергии фотонов $h\nu \approx 0.99$ эВ, связанный с оптическими переходами между основными состояниями электрона и дырки в КТ, и полоса фоточувствительности с красной границей около 1.25–1.35 эВ от квантовой ямы $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и КЯ смачивающего слоя InAs . При толщине $d_s \approx 3$ нм они туннельно связаны и образуют единую гибридную КЯ [5] (кривая 2), как и при $d_s = 0$ нм (кривая 1), а при толщине спейсерного слоя 12 нм проявляются как отдельные КЯ (кривая 3). В спектрах ФЛ $I_{\text{PL}}(h\nu)$ этих структур при 77 К (рис. 2) пик основного перехода КТ наблюдается при $h\nu \approx 1.04$ эВ. Пик ФЛ от КЯ (при $h\nu \approx 1.36$ эВ) присутствует только в спектре структуры КЯ/КТ с $d_s \approx 12$ нм (кривая 3). При толщинах спейсера $d_s = 0$ и 3 нм ФЛ от КЯ не наблюдается (кривые 1

и 2 соответственно), поскольку все фотовозбужденные носители быстро захватываются из КЯ в КТ и рекомбинируют в них. Такой результат свидетельствует об эффективном электронном обмене между КЯ и КТ при туннельно-тонком спейсерном слое.

В данных структурах, выращенных в режиме с увеличенным временем прерывания роста, практически не наблюдается эффекта красного смещения энергетического спектра КТ при нанесении на них слоя КЯ (кривые 1 и 4 на рис. 1 и 2). Незначительный разброс значений энергии основного перехода КТ в спектрах фоточувствительности и ФЛ (рис. 1 и 2) связан с технологическим разбросом величины этого параметра по площади структуры. Уменьшение толщины покровного слоя GaAs от 30 до 5 нм в результате анодного окисления приводит к небольшому красному смещению спектра КТ (< 20 мэВ). В исследованных ранее структурах, выращенных в других режимах [7], зарастание слоя КТ InAs слоем КЯ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и уменьшение толщины покровного слоя при анодном окислении обычно приводило к смещению основного перехода КТ в область низких энергий на ~ 70 мэВ [5,12], что объяснялось частичной релаксацией упругих напряжений в КТ. Значительно более слабая зависимость энергетического спектра КТ, полученных в режиме с прерыванием роста, от толщины и состава покровного слоя, вероятно, объясняется более сильным диффузионным перемешиванием In и Ga на гетерогранице InAs/GaAs в процессе зарастания массива КТ InAs покровным слоем GaAs с образованием прослойки твердого раствора InGaAs , снижающей упругие напряжения в КТ.

Тот факт, что встраивание квантовой ямы в структуры с КТ, выращенными в режиме с прерыванием роста, практически не влияет на положение уровней размер-

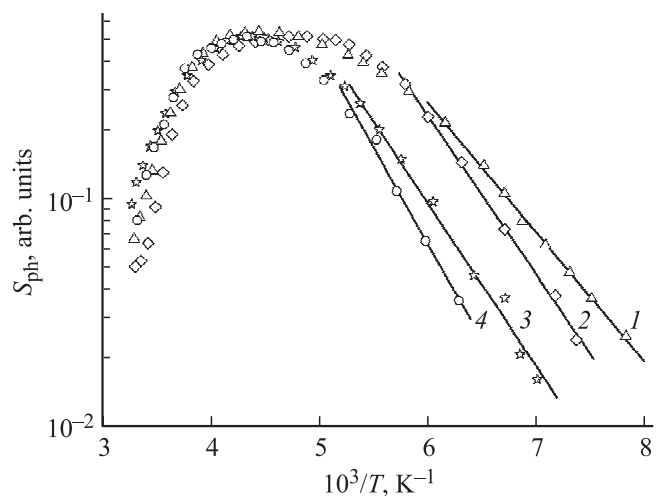


Рис. 3. Температурные зависимости фоточувствительности в области основного перехода в КТ в структурах с комбинированным слоем КЯ/КТ при разной толщине спейсерного слоя d_s (1–3) и с одиночным слоем КТ (4). d_s , нм: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 12.

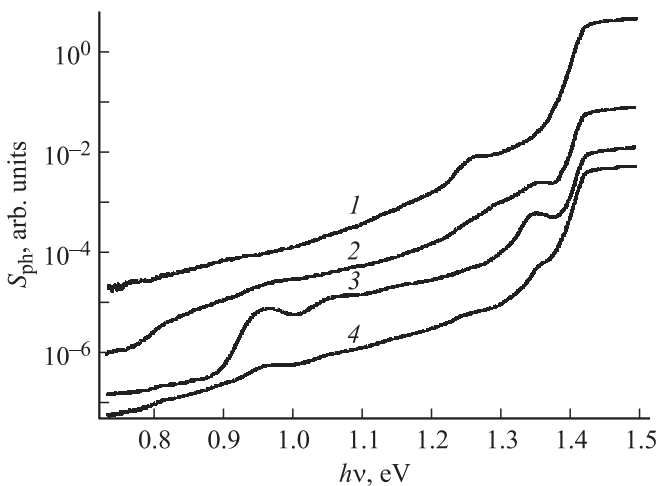


Рис. 4. Влияние анодного окисления покровного слоя ($V_a = 30$ В) на фотоэлектрические спектры структур с комбинированным слоем КЯ/КТ при разной толщине спейсерного слоя d_s (1–3) и с одиночным слоем КТ (4). d_s , нм: 1 — 0, 2 — 3, 3 — 12.

ного квантования в КТ, позволяет исследовать влияние КЯ на эффективность эмиссии фотовозбужденных носителей из КТ. На рис. 3 приведены температурные зависимости фотоэлектрической чувствительности в области основного перехода в КТ в исследованных структурах. Близкий к экспоненциальному рост фотоэлектрической чувствительности при низких температурах ($T < 200$ К) свидетельствует о доминировании механизма термоактивированной эмиссии фотовозбужденных носителей из КТ. В структурах с близко расположенной к слою КТ квантовой ямой фотоэлектрическая чувствительность от КТ сохраняется до более низких температур (рис. 3, кривые 1, 2). Приближение КЯ к слою КТ уменьшает энергию активации фотоэлектрической чувствительности при низких температурах ($T < 200$ К) от 170 мэВ в структуре без КЯ (кривая 4) до 120 мэВ в структуре с КЯ/КТ при $d_s = 0$ нм (кривая 1). Таким образом, встраивание квантовой ямы снижает эффективную высоту эмиссионного барьера в КТ вследствие того, что эмиссия из КТ может происходить не сразу в матрицу GaAs, а через КЯ.

Покрытие КТ слоем КЯ может быть использовано для защиты КТ от проникновения в них дефектов, возникающих при различных технологических воздействиях на поверхность квантово-размерной структуры (окисление, травление, нанесение химически активных металлов и др.). На рис. 4 показано влияние анодного окисления на спектры фотоэлектрической чувствительности исследованных структур при 300 К. При увеличении напряжения анодирования V_a до 30 В наблюдалось связанное с дефектообразованием [13] подавление фотоэлектрической чувствительности от КТ, обусловленное усилением рекомбинации фотовозбужденных носителей. Предполагалось, что расположенный перед слоем КТ упругонапряженный слой КЯ будет препятствовать распространению дефектов в

глубь структуры и, следовательно, уменьшать их влияние на фотоэлектрическую чувствительность от КТ. Однако оказалось, что КЯ эффективно защищает КТ от проникновения дефектов только при достаточно толстом спейсерном слое (кривая 3). При $d_s = 0$ и 3 нм пики фотоэлектрической чувствительности от КТ полностью исчезают (кривые 1, 2). Таким образом, при малой толщине спейсера в структуре с КЯ/КТ влияние дефектов проявляется даже сильнее, чем при отсутствии КЯ. По-видимому, это связано с тем, что задержка дефектов КЯ приводит к повышению в ней их концентрации, что при туннельно-тонком спейсерном слое может усиливать эффект подавления фотоэлектрической чувствительности от КТ.

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что энергетический спектр КТ InAs/GaAs, выращенных в новом ростовом режиме с увеличенным временем прерывания подачи реагентов, практически не зависит от толщины и состава тонкого двойного покровного слоя GaAs/InGaAs. Предположительно это связано с сильным диффузионным размытием гетерограницы InAs/GaAs и образованием над КТ слоя переходного состава InGaAs, уменьшающего упругие напряжения в КТ. Установлено, что нанесение слоя КЯ на слой КТ снижает эффективную высоту эмиссионного барьера в КТ, что проявляется в увеличении фотоэлектрической чувствительности от КТ при низких температурах. Показано, что встраивание слоя КЯ перед слоем КТ при толщинах спейсерного слоя между ними, превышающих эффективную длину туннелирования носителей заряда, существенно уменьшает влияние поверхностного дефектообразования на фотоэлектрическую чувствительность от КТ в результате задержки распространения дефектов упругонапряженным слоем КЯ. Это явление может быть использовано для защиты активного слоя КТ от проникновения дефектов при технологических операциях, сопровождающихся поверхностным дефектообразованием.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (соглашение с Министерством образования и науки № 14.В37.21.1945), РФФИ (грант № 11-02-00645а).

Список литературы

- [1] F. Heinrichsdorff, Ch. Ribbat, M. Grundmann, D. Bimberg. Appl. Phys. Lett., **76**, 556 (2000).
- [2] Y.D. Qi, H. Liang, W. Tang, Z.D. Lu, K.M. Lau. J. Cryst. Growth., **272**, 333 (2004).
- [3] K. Nishi, H. Saito, Sh. Sugou, J.-S. Lee. Appl. Phys. Lett., **74**, 1111 (1999).
- [4] И.А. Карпович, Б.Н. Звонков, Д.О. Филатов, С.Б. Левичев, Н.В. Байдусь, С.М. Некоркин. Поверхность, № 11, 27 (2000).

- [5] И.А. Карпович, Б.Н. Звонков, С.Б. Левичев, Н.В. Байдусь, С.В. Тихов, Д.О. Филатов, А.П. Горшков, С.Ю. Ермаков. *ФТП*, **38**, 448 (2004).
- [6] Y. Gu, T. Yang, H. Ji, P. Xu, Zh. Wang. *J. Appl. Phys.*, **109**, 064320 (2011).
- [7] Б.Н. Звонков, И.А. Карпович, Н.В. Байдусь, Д.О. Филатов, С.В. Морозов. *ФТП*, **35**, 92 (2001).
- [8] А.В. Здоровейцев, П.Б. Демина, Б.Н. Звонков. *Письма ЖТФ*, **35**, 15 (2009).
- [9] И.А. Карпович, А.В. Здоровейцев, С.В. Тихов, П.Б. Демина, О.Е. Хапугин. *ФТП*, **39**, 45 (2005).
- [10] И.А. Карпович, Д.О. Филатов. *ФТП*, **30**, 1745 (1996).
- [11] Sh. Datta, S. Ghosh, V.M. Arora. *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 177 (2001).
- [12] Н.С. Волкова, А.П. Горшков. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. физ.-мат. науки*, **3**, 63 (2010).
- [13] А.Ф. Вяткин, А.Г. Итальянцев, Н.В. Конечский, В.Н. Мордкович, Э.М. Темпер. *Поверхность*, № 11, 67 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

Optoelectronic properties of heteronanostructures with combined In(Ga)As/GaAs quantum well and dot layers

N.S. Volkova, A.P. Gorshkov, A.V. Zdoroveishchev, O.V. Vikhrova, B.N. Zvonkov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The influence of a InGaAs quantum well embedding in the structures with InAs/GaAs quantum dots on their optoelectronic properties has been studied. Quantum dots were grown by vapor phase epitaxy in the growth mode with increased growth interruption time. It has been defined that quantum dot energy spectrum is weakly sensitive to varying the thickness and the composition of the double GaAs/InGaAs cladding layer. Covering the quantum dot layer by a quantum well leads to reducing of emission barrier effective height in the quantum dots. The conditions at which a quantum well can be used for quantum dot active layer protection against defects induced by anodic oxidation of the structure have been defined.