

# Влияние дефектообразования при встраивании $\delta$ -слоя Mn на спектр фоточувствительности от квантовых ям InGaAs/GaAs

© А.П. Горшков<sup>†</sup>, И.А. Карпович, Е.Д. Павлова, И.Л. Калентьева

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603600 Нижний Новгород, Россия

(Получена 6 июля 2011 г. Принята к печати 11 июля 2011 г.)

Исследовано влияние дефектообразования при нанесении  $\delta$ -слоя Mn и покровного слоя GaAs лазерным испарением на спектры фоточувствительности гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs, расположенными в приповерхностной области.

## 1. Введение

В связи с развитием спинтроники [1–3] внимание исследователей привлекают полупроводниковые квантово-размерные гетеронаноструктуры (ГНС) с ферромагнитными слоями, в которых возможна спиновая поляризация неравновесных носителей. Одной из таких структур является ГНС с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs/GaAs, селективно легированная вблизи них  $\delta$ -слоем Mn. В этих структурах обнаружены ферромагнитные свойства и циркулярная поляризация излучения в КЯ, связанная с излучательной рекомбинацией спин-поляризованных носителей [4].

Однако встраивание  $\delta$ -слоя Mn может приводить к образованию дефектов в окрестности этого слоя в результате возникновения упругих напряжений и химического взаимодействия Mn с GaAs-матрицей, ухудшающих оптоэлектронные и чувствительные к спиновой поляризации характеристики ГНС. В данной работе исследовано влияние процесса дефектообразования при встраивании  $\delta$ -слоя Mn на фотоэлектрические спектры от КЯ InGaAs/GaAs в ГНС, выращенные комбинированным методом газофазной эпитаксии и лазерного испарения. Упругонапряженные слои квантовых ям могут существенно влиять на пространственное распределение дефектов в структуре, так как образуют для них потенциальный барьер или потенциальную яму, в зависимости от влияния дефектов на упругие напряжения в КЯ [5]. Так как фоточувствительность от КЯ зависит от соотношения времен жизни неравновесных носителей по отношению к процессам эмиссии и рекомбинации, КЯ можно рассматривать как зонды, реагирующие на появление в их окрестности дефектов, изменяющих рекомбинационные характеристики КЯ [6].

## 2. Методика

ГНС выращивались на поверхности (100) с отклонением на  $3^\circ$  в направлении [110] подложек  $n$ -GaAs комбинированным методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) и лазерного испарения [7]. Сначала при относительно высокой

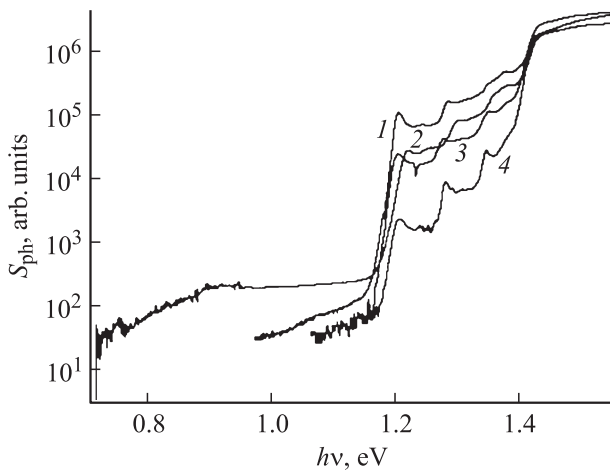
температуре ( $600^\circ\text{C}$ ) методом ГФЭ МОС при атмосферном давлении водорода выращивались буферный слой и 3 КЯ. Затем при пониженной температуре ( $400^\circ\text{C}$ ) методом импульсного лазерного испарения наносились  $\delta$ -слой Mn и покровный слой GaAs толщиной 40 нм. Слои КЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  одинаковой ширины 9 нм и разного состава  $x \approx 0.1, 0.2$  и  $0.25$  были разделены спейсерными слоями GaAs шириной  $d_s \approx 25$  нм. Спейсерный слой между  $\delta$ -слоем Mn толщиной 0.3 или 1.0 монослоя (МС) и самой глубокой КЯ с  $x = 0.26$  составлял 12 нм. Понижение температуры при лазерном осаждении слоев применялось для уменьшения диффузионного размытия примесно-дефектного  $\delta$ -слоя. Также были выращены структуры с тремя КЯ без  $\delta$ -слоя Mn. В одной из них КЯ зарастивались низкотемпературным покровным слоем GaAs, выращенным лазерным испарением, а в другой — высокотемпературным покровным слоем, выращенным ГФЭ МОС.

Спектральные зависимости фоточувствительности ГНС исследовались методами спектроскопии фотоэдс (фототока) на барьере ГНС с металлом — барьере Шоттки (ФБШ). При комнатной температуре часть измерений фотоэлектрических спектров проведены на барьерах ГНС с жидким электролитом (ФПЭ) [8]. Спектры ФПЭ и ФБШ практически совпадали. В методе ФБШ на поверхность структуры методом термического испарения в вакууме наносился полупрозрачный золотой контакт, а в методе ФПЭ к поверхности структуры прижималась смоченная в электролите (раствор KCl в смеси глицерина и воды) фильтровальная бумага.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

На спектрах ФПЭ исследованных ГНС (рис. 1) хорошо выделяются 3 ступенчатые полосы фоточувствительности от квантовых ям с характерными пиками на их краях, которые хорошо заметны даже при комнатной температуре и становятся более острыми при низких температурах. Подобные пики наблюдались на спектрах оптического поглощения многоямных структур в работах [9,10] и связывались с генерацией экситонов. Методом фотоэлектрической спектроскопии они хорошо

<sup>†</sup> E-mail: gorskovap@phys.unn.ru



**Рис. 1.** Фотоэлектрические спектры гетеронаноструктур с квантовыми ямами при 300 К: 1 — структура без  $\delta$ -слоя Mn с покровным слоем GaAs, выращенным газовой эпитаксией при 600°C; 2 — структура с покровным слоем GaAs, выращенным лазерным осаждением при 400°C; 3, 4 — структуры с  $\delta$ -слоем Mn и покровным слоем, выращенным лазерным осаждением при 400°C (толщина слоя Mn: 3 — 0.3 мкм; 4 — 1 мкм).

выявляются на одноямных структурах [11]. В этой работе исследован квантово-размерный эффект Штарка на экситонах в КЯ.

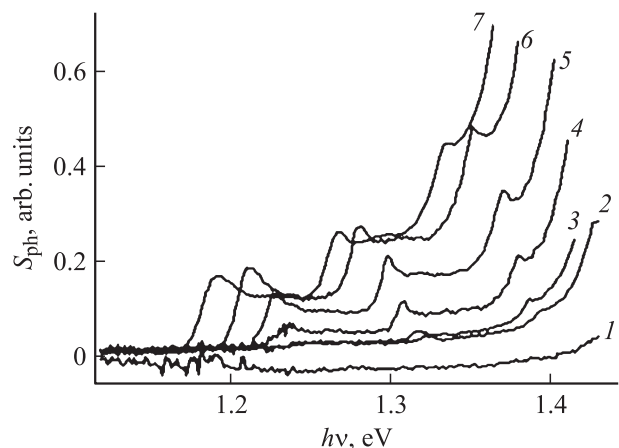
Максимальная фоточувствительность в области поглощения КЯ относительно собственной фоточувствительности в области поглощения матрицы (GaAs) наблюдалась в структурах без  $\delta$ -слоя Mn с покровным слоем, выращенным методом ГФЭ МОС при 600°C (рис. 1, кривая 1). В структуре с низкотемпературным покровным слоем GaAs без  $\delta$ -слоя Mn фоточувствительность в области КЯ заметно уменьшается (кривая 2). Встраивание  $\delta$ -слоя Mn приводит к дальнейшему уменьшению фоточувствительности от КЯ, возрастающему с увеличением концентрации Mn в  $\delta$ -слое (кривые 3, 4). Заметим, что значение фоточувствительности в экситонном пике при увеличении концентрации Mn не изменяется относительно значения фоточувствительности в полосе межзонного поглощения соответствующей КЯ. Также не было замечено какой-либо связи этих пиков с уровнем легирования структур мелкими донорами (Sn) или акцепторами (C). Это подтверждает связь этих пиков с экситонами, а не с примесями в КЯ.

Подавление фоточувствительности от КЯ объясняется тем, что при низкотемпературном лазерном осаждении как  $\delta$ -слоя Mn, так и только одного покровного слоя GaAs генерируются дефекты, достигающие даже самой удаленной от поверхности КЯ  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ . Эти дефекты создают в них дополнительный канал рекомбинации, уменьшающий эффективность эмиссии фотовозбужденных носителей. Примесь Mn в атомарно-дисперсном состоянии создает акцепторный уровень 0.11 эВ выше потолка валентной зоны. Поскольку встраивание  $\delta$ -слоя

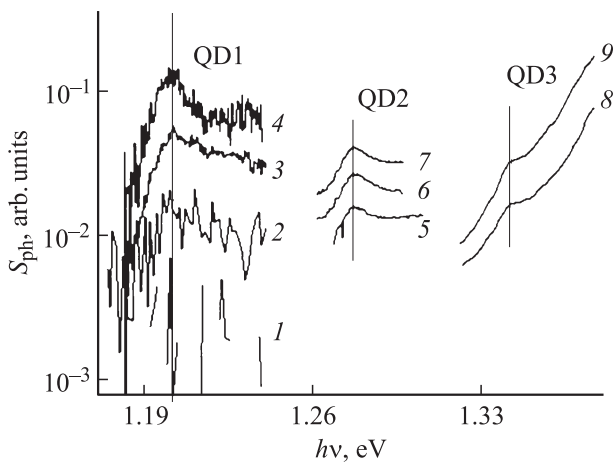
Mn качественно проявляется так же, как и нанесение низкотемпературного покровного слоя GaAs, наблюдаемое изменение спектров, вероятно, связано с образованием дефектов при лазерном осаждении слоев (вакансий в подрешетках Ga и As, межузельных атомов и различных комплексов дефектов). На образцах с низкотемпературными слоями наблюдается примесная фоточувствительность, которая на образце без  $\delta$ -слоя Mn (кривая 2) простирается до  $\sim 0.75$  эВ. На образцах с  $\delta$ -слоем Mn из-за их меньшей фоточувствительности эту полосу удается проследить только до  $\sim 0.9$ –1 эВ. Детальный анализ этой полосы, в частности перестроение кривой 2 в координатах Луковского [12]  $S_{\text{ph}}^{2/3} h\nu^2 = f(h\nu)$ , выявляет примесный уровень  $E_c = 0.75$  эВ, который, как известно [13], принадлежит собственному дефектному центру  $EL_2$ . Возможно, образуются и другие центры с меньшей глубиной залегания.

В отличие от структур без Mn с высокотемпературным покровным слоем, в которых фоточувствительность в области поглощения КЯ почти не зависит от температуры в интервале 300–77 К, в структурах с Mn наблюдается полное подавление фоточувствительности от КЯ при понижении температуры до 77 К (рис. 2). При повышении температуры последовательно появляются экситонные пики от мелкой, средней и глубокой КЯ и наблюдается характерное для экситонных пиков их уширение при повышении температуры, связанное с уменьшением времени жизни экситонов. Такая зависимость фоточувствительности от температуры свидетельствует о том, что без смещения на барьере, т.е. в относительно слабом электрическом поле в окрестности КЯ, эмиссия носит термоактивированный характер.

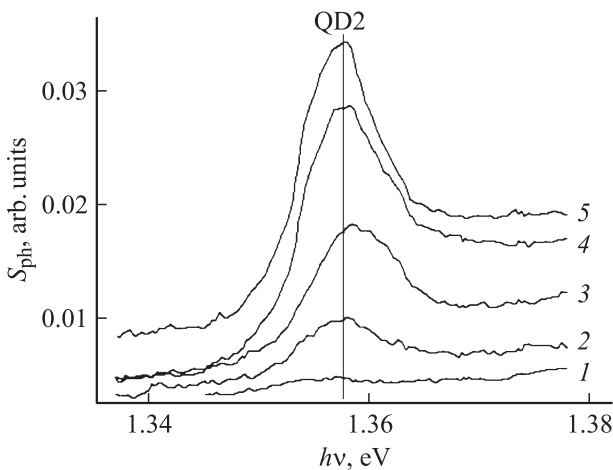
При обратном смещении на барьере фоточувствительность от КЯ при 77 К возрастала в связи с уменьшением высоты эмиссионного барьера КЯ (эффект Шоттки) и увеличением его туннельной прозрачности.



**Рис. 2.** Температурные зависимости фотосигнала от квантовой ямы в гетеронаноструктуре с  $\delta$ -слоем Mn (0.3 мкм) при отсутствии смещения на барьере.  $T$ , К: 1 — 83, 2 — 158, 3 — 175, 4 — 201, 5 — 223, 6 — 279, 7 — 306.



**Рис. 3.** Влияние электрического поля на спектры структур с барьерами Шоттки от трех квантовых ям в гетеронаноструктурах с  $\delta$ -слоем Mn (1 МС) при 300 К. Напряжение смещения  $V$ , В: 1 — (-0.4), 2 — (-0.2), 3 — 2, 4 — 2, 5 — 0, 6 — 5, 7 — 8, 8 — 0, 9 — 8.



**Рис. 4.** Влияние электрического поля на спектр структуры с барьером Шоттки от второй квантовой ямы в гетеронаноструктуре с  $\delta$ -слоем Mn (1 МС) при 77 К. Обратное напряжение смещения  $V$ , В: 1 — 0, 2 — 1.5, 3 — 3, 4 — 5, 5 — 8.

Измерения квантово-размерного эффекта Штарка при 300 и 77 К (рис. 3, 4) показали, что в структурах с Mn положение экситонных пиков во всех трех КЯ не зависит от приложенного к структуре напряжения смещения. Однако значение фоточувствительности в пике при 77 К возрастает с ростом обратного напряжения.

Образование нечувствительных к электрическому полю, т.е. не поляризующихся экситонов, наблюдалось ранее на подобных структурах без Mn в работе [11] при температурах ниже 100 К. Они были названы аномальными экситонами. Было показано, что их образованию способствует введение дефектов в структуру путем анодного окисления поверхности ГНС, и высказано предположение, что аномальные экситоны связаны на донорно-акцепторных парах. В исследованных структурах с Mn

аномальные экситоны наблюдаются и при комнатной температуре. Можно предположить, что в структурах с  $\delta$ -слоем Mn концентрация донорно-акцепторных пар и энергия связи экситонов с ними больше, чем в обычных структурах. Этим можно объяснить сохранение аномальных экситонов при высоких температурах.

### 3. Заключение

Проведенные исследования показывают, что низкотемпературное лазерное осаждение  $\delta$ -слоя Mn и покровного слоя, применяемое для уменьшения диффузионного размытия  $\delta$ -слоя, сопровождается образованием дефектов, подавляющих фоточувствительность от КЯ, расположенных в приповерхностной области. В структурах с Mn обнаружено образование аномальных, нечувствительных к электрическому полю экситонов в КЯ. Предполагается, что аномальные экситоны связаны на донорно-акцепторных парах в КЯ.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращивание структур для исследования.

Работа выполнялась при поддержке аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (грант № 2.2.2.2/4297) и CRDF (RUXO-001-NN-06/BR4M01), Министерства образования и науки РФ (проекты № 2.1.1/2833 и № 2.1.1/12029 АВИЦП „Развитие научного потенциала высшей школы“, проект № 02.740.11.0672 ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“).

### Список литературы

- [1] S.A. Wolf. *Science*, **294**, 1488 (2001).
- [2] Б.П. Захарченя, В.Л. Корнев. *УФН*, **175** (6), 628 (2005).
- [3] Б.А. Аронзон, А.Б. Грановский, А.Б. Давыдов и др. *ФТТ*, **49** (1), 165 (2007).
- [4] М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.С. Бричкин и др. *ФТТ*, **52**, 2147 (2010).
- [5] Y.C. Chen, J. Singh, P.K. Bhattacharya. *J. Appl. Phys.*, **74**, 3800 (1993).
- [6] И.А. Карпович, А.В. Аншон, Н.В. Байдусь, Л.М. Батукова, Б.Н. Звонков, С.М. Планкина. *ФТП*, **28**, 104 (1994).
- [7] Б.Н. Звонков, В.В. Подольский, В.П. Лесников и др. *Высокочистые вещества*, **4**, 114 (1993).
- [8] И.А. Карпович, А.П. Горшков, С.Б. Левичев и др. *ФТП*, **35**, 564 (2001).
- [9] S. Schmitt-Rink, D.S. Chemla, D.A.V. Miller et al. *Adv. Phys.*, **38**, 89 (1989).
- [10] D.A.V. Miller, D.S. Chemla, T.S. Damen et al. *Phys. Rev. B*, **32**, 1943 (1985).
- [11] А.П. Горшков, И.А. Карпович, А.В. Кудрин. *Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования*, **5**, 25 (2006).
- [12] G. Lucovsky. *Sol. St. Commun.*, **3**, 299 (1965).
- [13] Н.Г. Баграев. *ЖЭТФ*, **100**, 1378 (1991).

Редактор Т.А. Полянская

**Influence of forming defect for embedding  
of Mn  $\delta$ -layer on quantum wells  
InGaAs/GaAs heterostructures  
photosensitivity spectra**

*A.P. Gorshkov, I.A. Karpovich, E.D. Pavlova,  
I.L. Kalenteva*

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603600 Russia, Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** Influence of forming defect for embedding of Mn  $\delta$ -layer and applying integumentary layer GaAs of low-temperature laser vaporization method in heterostructures with single quantum well InGaAs/GaAs on photosensitivity spectra has been investigated.