

Исследование гетероструктур с комбинированным слоем квантовых точек/квантовой ямы In(Ga)As/GaAs и δ -слоем Mn

© Е.Д. Павлова[†], А.П. Горшков, А.И. Бобров, Н.В. Малехонова, Б.Н. Звонков

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

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

С помощью методов высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и фотоэлектрической спектроскопии исследовано влияние встраивания δ -слоя Mn и методики выращивания покровного слоя GaAs в структурах с квантовыми точками и ямами In(Ga)As/GaAs на их кристаллические и оптоэлектронные характеристики. Обнаружено, что в структуре с δ -слоем Mn низкотемпературный покровный слой GaAs является структурно-неоднородным и может являться причиной снижения фоточувствительности от квантовых точек.

1. Введение

Одной из актуальных проблем спинтроники является поиск новых материалов, обладающих свойствами как ферромагнетиков, так и полупроводников. Такие магнитные полупроводники могут быть получены путем легирования атомами магнитного материала, например Mn, немагнитных полупроводников. δ -легирование Mn гетероструктур на основе A^{III}B^V с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми точками (КТ) представляет значительный интерес в связи с созданием на их основе приборов спинтроники, например, спинового светоизлучающего диода (ССИД) [1]. Особенностью указанного способа легирования является пространственное разделение носителей заряда в квантово-размерном слое и ионов Mn в барьере. В таких структурах наблюдалась сравнительно высокая степень циркулярной поляризации люминесценции, свидетельствующая о спиновой поляризации неравновесных носителей в КЯ [2]. Важной проблемой при формировании высокоэффективного ССИД является дефектообразование, сопровождающее некоторые технологические этапы его создания. Для изготовления ССИД-структур типа In(Ga)As/GaAs, легированных δ -слоями Mn, в группе эпитаксиальной технологии Научно-исследовательского физико-технического института ННГУ был разработан комбинированный метод газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС/МОСVD) и лазерного осаждения (ЛО/LD). Характерное для ЛО понижение температуры роста с 600 до 400°C позволяет существенно уменьшить диффузионное размытие слоя Mn [3]. Однако недостатком ЛО является высокая энергия частиц осаждаемого вещества, в связи с чем слои, сформированные лазерным осаждением, являются кристаллически-несовершенными и могут вносить дефекты в структуру. Структурные дефекты являются не только центрами спинового рассеяния [4], но и центрами безызлучательной рекомбинации, и, следовательно, не только уменьшают степень циркулярной поляризации, но и приводят к существенному падению интенсивности электролюми-

несцентного излучения. Поэтому в связи с созданием спинтронных устройств важен анализ структурного совершенства активных областей приборов и диагностика оптоэлектронных свойств квантово-размерных гетерослоев.

Целью данной работы являлась диагностика оптоэлектронных и структурных свойств гетероструктур с комбинированным слоем КТ/КЯ In(Ga)As/GaAs и δ -слоем Mn методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и фотоэлектрической спектроскопии.

2. Методика эксперимента

Структуры были изготовлены с помощью двухступенчатого метода эпитаксиального выращивания. На первом этапе на подложках n⁺-GaAs (001) методом ГФЭ МОС при атмосферном давлении водорода и при температуре 600°C выращивались следующие слои: буферный слой GaAs толщиной 0.5 мкм, квантовая яма In_{0.2}Ga_{0.8}As шириной 10 нм, спейсерный слой GaAs толщиной 50 нм. Затем при температуре 500°C выращивались квантовые точки InAs, которые зарастивались тонким спейсерным слоем GaAs толщиной 10 нм. На следующей стадии δ -слой Mn и покровный слой GaAs толщиной 20 нм выращивались при температуре 400°C посредством лазерного распыления мишеней Mn и GaAs, находящихся в холодной зоне реактора ГФЭ МОС. Понижение температуры при лазерном осаждении слоев применялось для уменьшения диффузионного размытия δ -слоя. В структуре без δ -слоя Mn покровный слой GaAs толщиной 30 нм выращивался методом ГФЭ МОС при температуре 500°C.

Структурные исследования осуществлялись при помощи просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F (JEOL) на поперечном срезе. Применялось ускоряющее напряжение 200 кВ. Приготовление структур для исследований проводилось по стандартной технологии Gatan, описанной в [5].

Анализ снимков высокого разрешения проводился методом геометрической фазы. Он основан на определении

[†] E-mail: KatrinaOnli@rambler.ru

искажений кристаллической решетки в исследуемой области относительно недеформированной, принимаемой за эталон. Более подробно метод геометрической фазы описан в [6].

Для диагностики оптоэлектронных свойств структур использовался метод фотоэлектрической спектроскопии. Исследовались спектры фотоэдс на контакте полупроводник/электролит [7]. Фотоэлектрические методы, как было показано в [8], могут успешно применяться для диагностики дефектообразования в квантово-размерных структурах. Это обусловлено тем, что возникновение фотоэлектрического сигнала связано с эмиссией фото-возбужденных носителей из КЯ и КТ, а эффективность этой эмиссии зависит от соотношения рекомбинационного и эмиссионного времен жизни, на которое влияет концентрация дефектов в квантово-размерных структурах [9].

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1, *a* и 2, *a* представлены снимки высокого разрешения исследуемых образцов в области смачивающего слоя (wetting layer) InAs и покровного слоя (cup layer) GaAs. Для выявления искажений кристаллической решетки на границе раздела (спейсерный слой GaAs)/(δ/δ -слой Mn)/(низкотемпературный покровный слой GaAs) проведена цифровая обработка ПЭМ-изображений методом геометрической фазы.

На рис. 1, *b* и 2, *b* представлены карты распределений полей упругих деформаций в структурах без δ -слоя Mn и с δ -слоем. На изображениях виден упругонапряженный смачивающий слой InAs, а также сама квантовая точка (QD) InAs (рис. 1, *b*). На карте полей упругих деформаций для структуры с δ -слоем Mn (рис. 2, *b*) видно, что покровный слой GaAs, выращенный низкотемпературным методом ЛЮ, характеризуется наличием локальных флуктуаций межплоскостных расстояний. Покровный слой, полученный методом ГФЭ МОС в структуре без δ -слоя Mn (рис. 1, *b*), отличается значительно более высоким кристаллическим качеством. Анализ ПЭМ-изображений в обеих структурах не выявил в них наличия дислокаций в покровном слое и δ -слое, т.е. такие слои можно считать свободными от линейных дефектов. Наличие структурных неоднородностей в низкотемпературном покровном слое и δ -слое Mn, вероятно, может объясняться высокой концентрацией в них точечных дефектов. Эти точечные дефекты, учитывая сравнительно высокую температуру выращивания слоя 400°C и малую толщину спейсера (10 нм), могут проникать в слой КТ, создавая в них эффективные центры безызлучательной рекомбинации. Подобное проникновение дефектов через слой GaAs толщиной 30 нм наблюдалось ранее при нанесении слоев Pd при комнатной температуре или 100°C [10]. Неоднородность в спейсерном слое GaAs, отделяющем слой КТ от слоя КЯ, представляет собой прорастающий дефект, имеющий своим началом

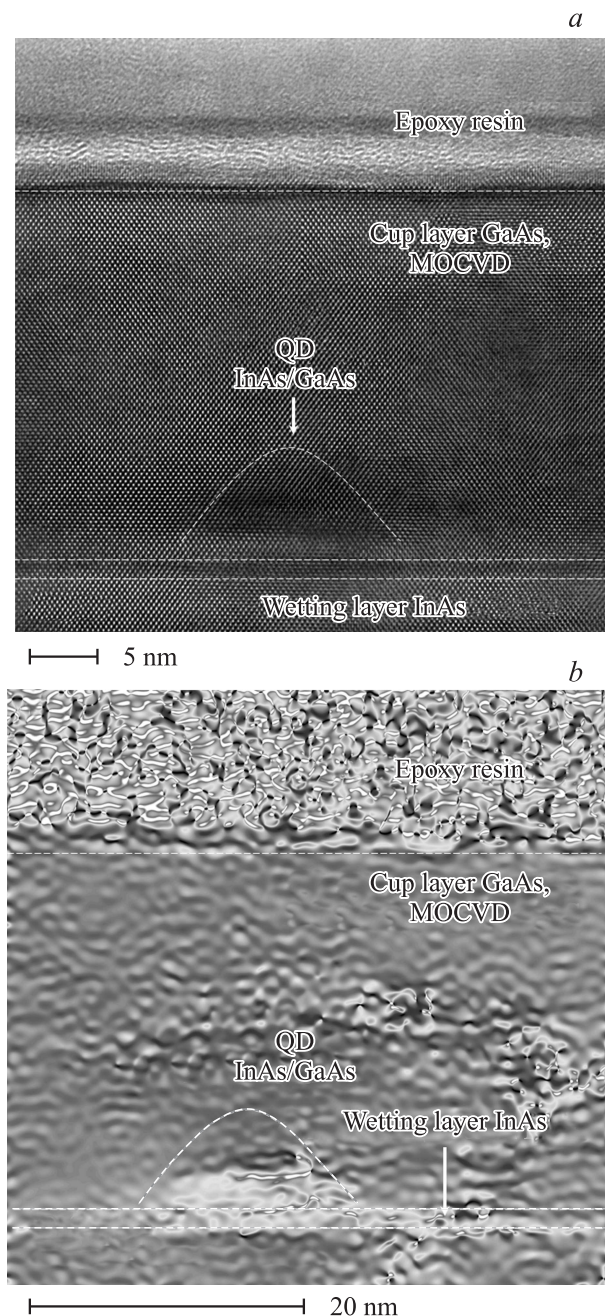


Рис. 1. ПЭМ-снимок поперечного сечения структуры с КТ/КЯ без δ -слоя Mn, включающий области смачивающего слоя InAs и покровного слоя GaAs, полученного ГФЭ МОС (*a*), и карта распределения полей упругих деформаций (*b*).

квантовую яму. Механизм формирования и природа этого структурного дефекта в данный момент обсуждаются.

На рис. 3 представлены спектры фотоэдс на контакте полупроводник-электролит S_{ph} для структур с комбинированным слоем КТ/КЯ, с δ -слоем и без δ -слоя Mn. В обоих спектрах наблюдаются одинаково ярко выраженные окиситонные пики на крае полосы fotocувствительности от КЯ (QW) при энергии 1.2 эВ. Особенно в спектрах при энергиях 0.93 и 1 эВ связаны с

поглощением излучения в основном (E_0) и первом возбужденном (E_1) состояниях КТ. Встраивание δ -слоя Мп приводит к спаду фоточувствительности от КТ. Наиболее сильно фоточувствительность уменьшается в области основного перехода КТ. Это свидетельствует о возрастании скорости рекомбинации в КТ и таким образом подтверждает предположение о проникновении дефектов из покровного слоя и δ -слоя Мп в слой КТ. Уширение пиков фоточувствительности от КТ, вероятно, связано с неоднородностью полей упругих напряжений, вызванных встраиванием δ -слоя Мп.

Отсутствие влияния дефектообразования на фоточувствительность от КЯ объясняется тем, что, во-первых,

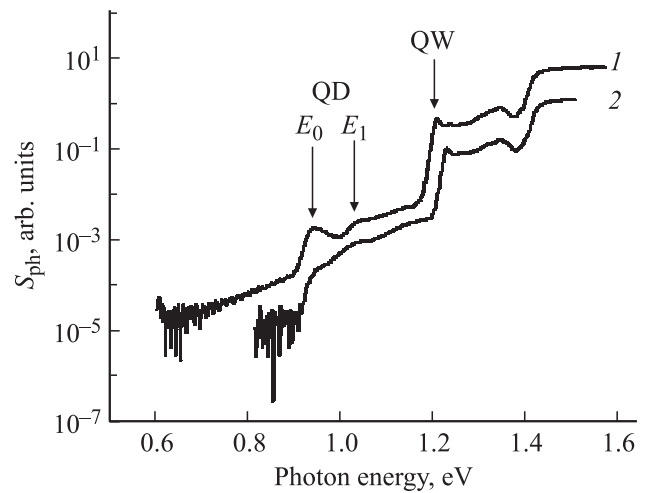


Рис. 3. Спектры фотоэдс контакта полупроводник–электролит при 300 К: 1 — структура с комбинированным слоем КТ/КЯ, 2 — структура с комбинированным слоем КТ/КЯ и δ -слоем Мп.

КЯ находится дальше от δ -слоя Мп, чем слой КТ, и, во-вторых, возможностью задержки распространения дефектов в глубь структуры упругонапряженным смачивающим слоем КТ, а также тем, что высота эмиссионного барьера для электронов в КЯ меньше, чем для КТ.

4. Заключение

Методом анализа геометрической фазы ПЭМ-изображений установлено наличие локальных флуктуаций межплоскостных расстояний в покровном слое и δ -слое Мп, выращенных методом низкотемпературного лазерного осаждения. Установлено, что нанесение низкотемпературного покровного слоя GaAs и встраивание δ -слоя Мп в приповерхностную область структуры с КТ/КЯ приводят к подавлению фоточувствительности от КТ, что объясняется увеличением концентрации дефектов в слое КТ в результате их диффузии из структурно-несовершенного покровного слоя GaAs.

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

Список литературы

- [1] M.V. Dorokhin, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, V.D. Kulakovskii, O.V. Vikhrova, S.V. Zaitsev, B.N. Zvonkov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 245 110 (2008).
- [2] R.C. Myers, A.C. Gossard, D.D. Awschalom. *Phys. Rev B*, **69**, 161 305 (2004).

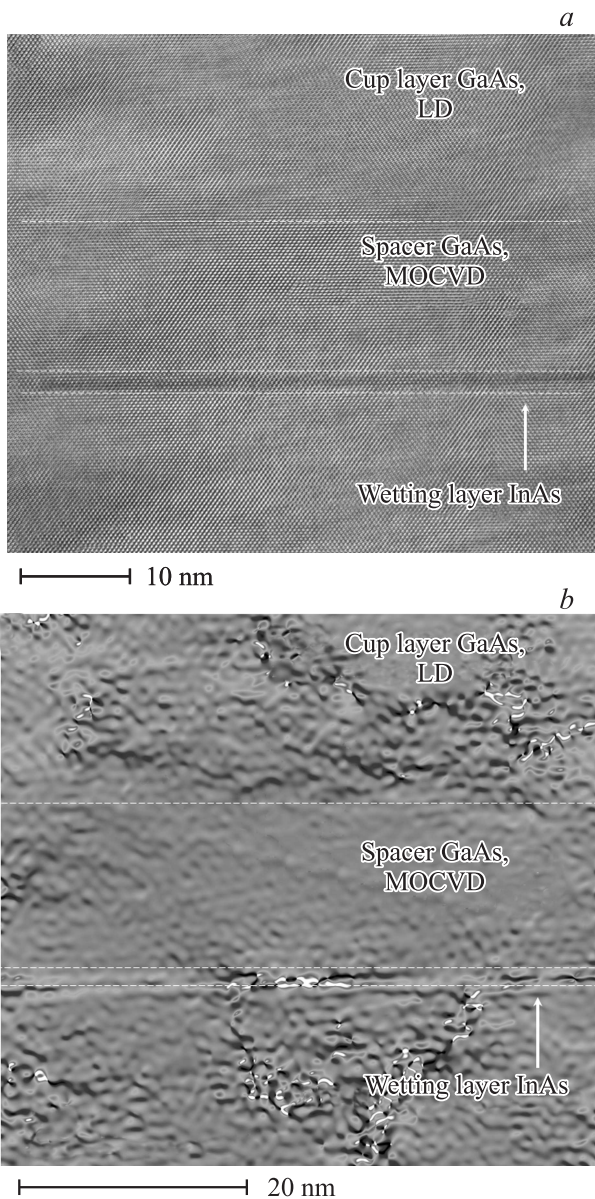


Рис. 2. ПЭМ-снимок поперечного сечения структуры с КТ/КЯ и δ -слоем Мп, включающий области смачивающего слоя InAs и покровного слоя GaAs, полученного методом ЛО (a), и карта распределения полей упругих деформаций (b).

- [3] Ю.В. Васильева, Ю.А. Данилов, Ант.А. Ершов, Б.Н. Звонков, Е.А. Ускова, А.Б. Давыдов, Б.А. Аронзон, С.В. Гуденко, В.В. Рыльков, А.Б. Грановский, Е.А. Ганьшина, Н.С. Перов, А.Н. Виноградов. *ФТП*, **39** (1), 87 (2005).
- [4] М.В. Дорохин, С.В. Зайцев, А.С. Бричкин, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, В.Д. Кулаковский, М.М. Прокофьева, А.Е. Шолина. *ФТТ*, **52** (11), 2147 (2010).
- [5] *User's Guide: Precision Ion Polishing System* (Gatan inc., 11.1998).
- [6] M.J. Hytch, M. Gandais. *Phil. Mag. A*, **72**, 619 (1995).
- [7] I.A. Karpovich, S.B. Levichev, S.V. Morozov, B.N. Zvonkov, D.O. Filatov, A.P. Gorshkov, A.Yu. Ermakov. *Nanotechnology*, **13**, 445 (2002).
- [8] И.А. Карпович, А.В. Аншон, Н.В. Байдусь и др. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **58**, 213 (1994).
- [9] Н.С. Волкова, А.П. Горшков, И.А. Карпович. *Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского*, **2** (1), 34 (2012).
- [10] И.А. Карпович, С.В. Тихов, Е.Л. Шоболов, И.А. Андрущенко. *ФТП*, **40** (3), 319 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of heterostructures with a combined layer quantum dots/quantum well In(Ga)As/GaAs and Mn δ -layer

E.D. Pavlova, A.P. Gorshkov, A.I. Bobrov, N.V. Malehxonova, B.N. Zvonkov

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

Abstract Using the methods of high-resolution transmission electron microscopy and photoelectric spectroscopy, the influence of Mn δ -layer embedding and cap layer GaAs growing techniques in structures with quantum dots and wells In(Ga)As/GaAs on their structural and optoelectronic characteristics have been investigated. It was shown that in the structure with Mn δ -layer, the low-temperature cap layer GaAs is structurally nonuniform and can cause decrease of photosensitivity of the quantum dots.