

УДК 621.315.592

XVIII симпозиум „Нанопизика и наноэлектроника“,
Нижний Новгород, 10–14 марта 2014 г.

Влияние пространственного расположения δ -слоя Si на оптоэлектронные свойства гетеронаноструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs

© Н.С. Волкова[¶], А.П. Горшков, С.В. Тихов, Н.В. Байдусь*, С.В. Хазанова, В.Е. Дегтярев, Д.О. Филатов*

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

* Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 23 мая 2014 г. Принята к печати 15 июня 2014 г.)

Исследованы спектры фоточувствительности, фотолюминесценции и электролюминесценции диодных гетеронаноструктур InGaAs/GaAs с δ -слоем Si, сформированным на расстоянии 10 нм от квантовой ямы InGaAs. Установлено влияние расположения δ -слоя относительно квантовой ямы на оптоэлектронные свойства структур.

1. Введение

Дельта-легирование полупроводников [1] используется для уменьшения [2] или увеличения высоты потенциального барьера в диодах Шоттки [3], создания магнитных полупроводниковых структур [4] и для поставки свободных носителей в область квантовой ямы (КЯ) в полевых РНЕМТ-транзисторах, работающих при терагерцевых частотах [5–7]. Влияние параметров δ -легирования Si на электрофизические характеристики, важные для работы транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе КЯ InGaAs/GaAs, — подвижность и концентрацию двумерных электронов — подробно исследовано в ряде работ [8–12]. Показано, что очень важным является расположение δ -слоя относительно КЯ. Однако вопросы, связанные с исследованием поперечного транспорта носителей заряда, важные для применений в светоизлучающих и фотоприемных устройствах на основе диодов Шоттки, практически не изучены. В данной работе исследовались оптоэлектронные свойства диодов Шоттки с различным расположением δ -слоя Si относительно КЯ InGaAs/GaAs с целью выяснения влияния дополнительного потенциального барьера, создаваемого δ -слоем, на транспорт дырок в подобных структурах.

2. Методика эксперимента

Гетероструктуры выращивались на проводящих и полуизолирующих подложках GaAs с кристаллографиче-

ской ориентацией (001) методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений при пониженном давлении на установке Aix 200RF. Исследовались структуры с различным взаимным расположением КЯ In_{0.17}Ga_{0.83}As шириной 10 нм и δ -слоя Si в пленке *n*-GaAs толщиной ~ 600 нм. В одном случае δ -слой находился под КЯ, т.е. в буферном слое (структура А), в другом — над КЯ, т.е. в покровном слое (структура В). В обеих структурах расстояние между КЯ и δ -слоем составляло 10 нм, толщина покровного слоя GaAs — 200 нм, поверхностная концентрация электронов в δ -слое, полученная из измерений эффекта Холла, — 10^{12} см⁻². В связи с тем что подобные структуры могут применяться для изготовления как диодов Шоттки, так и полевых транзисторов, в данной работе исследование проводилось на двух типах подложек: *n*⁺-GaAs и *i*-GaAs. В первом случае создавались диодные мезаструктуры с контактом Шоттки, а во втором — обычно используемые для контроля характеристик структур на полуизолирующих подложках *i*-GaAs кольцевые планарные диодные структуры [13]. Подробно методика создания кольцевых контактов описана в [14]. Площадь управляющего электрода в этой структуре $S = 2.46 \cdot 10^{-3}$ см². Величина кольцевого зазора между золотыми управляющим и базовым электродами составляла 80 мкм. Площадь базового электрода была ~ 1 см². Исследовались спектры фототока, фото- и электролюминесценции при температуре $T = 77$ К. При фотоэлектрических исследованиях источником монохроматического излучения служила галогеновая лампа мощностью 100 Вт, излучение пропусклось через решеточный монохроматор МДР-2. При построении фотоэлектрических спектров строилась спектральная зависимость относитель-

[¶] E-mail: volkovans88@mail.ru

ной фоточувствительности $S_{ph}(h\nu) = I_{ph}(h\nu)/L(h\nu)$, где $I_{ph}(h\nu)$ — фототок, $L(h\nu)$ — интенсивность освещения в произвольных единицах. Для возбуждения фотолуминесценции использовалось сфокусированное излучение He-Ne-лазера мощностью 30 мВт. При исследовании электролюминесценции на образец подавалось прямое смещение 1.7 В (плотность тока составляла 60 А/см²), возбуждаемое излучение регистрировалось со стороны подложки. Регистрация сигналов осуществлялась по стандартной методике синхронного детектирования.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В спектре фототока структуры А (рис. 1, кривая 1) при энергиях фотонов $h\nu < 1.5$ эВ наблюдалась полоса, связанная с межзонным оптическим поглощением излучения в КЯ. Значение энергии красной границы этой полосы ~ 1.37 эВ хорошо согласуется с результатом расчета расстояния между основными подзонами размерного квантования электронов и тяжелых дырок (1.38 эВ без учета экситонных эффектов). В структуре В фотосигнал в данной спектральной области практически отсутствовал (кривая 2). Такое различие связано с тем, что фотоэлектрические эффекты (фотоэдс или фототок) возникают только при пространственном разделении неравновесных носителей в электрическом поле поверхностного барьера [15], необходимом для создания напряжения и тока во внешней цепи. В случае квантово-размерных структур это разделение может произойти только после эмиссии электронов и дырок из подзон размерного квантования КЯ в матрицу GaAs. Эффективность эмиссии электронно-дырочных пар зависит от соотношения времен жизни носителей по отношению к процессу эмиссии (с временем жизни τ_{em}) и конкурирующему с ней процессу рекомбинации (с эффективным временем жизни τ_r).

На рис. 2, *a, b* изображены профили валентной зоны по координате z в направлении роста слоев и

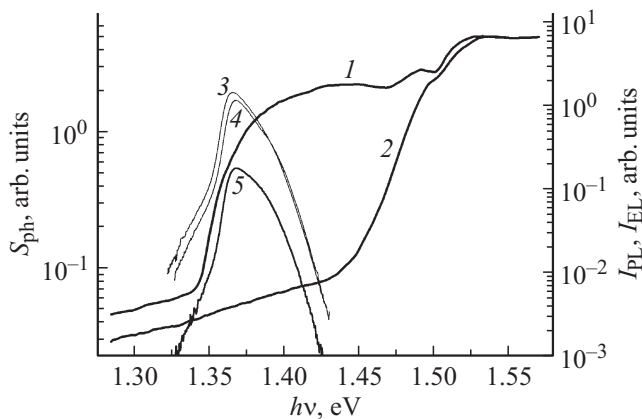


Рис. 1. Спектральные зависимости фоточувствительности S_{ph} (1, 2), интенсивности фотолуминесценции I_{PL} (3, 4) и электролюминесценции I_{EL} (5) при 77 К. 1, 3, 5 — структура А; 2, 4 — структура В.

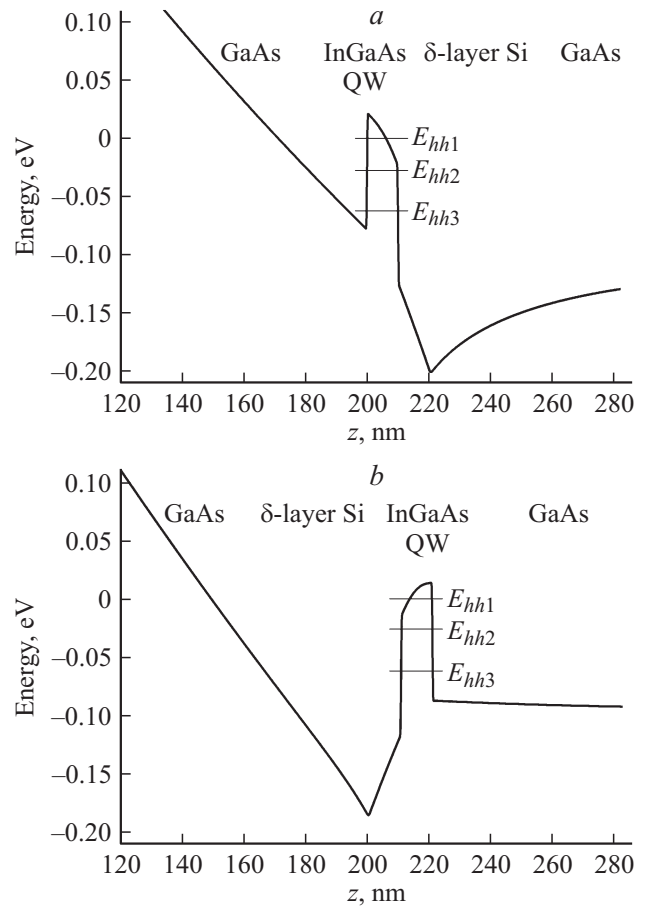


Рис. 2. Энергетическая диаграмма валентной зоны и положения подзон размерного квантования тяжелых дырок в структурах А (*a*) и В (*b*). InGaAs QW — квантовая яма.

уровни размерного квантования тяжелых дырок (E_{hh1} , E_{hh2} , E_{hh3}), полученные из самосогласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона для структур с различным расположением δ -слоя. Видно, что в данных структурах эффективное пространственное разделение электронно-дырочных пар может произойти только при эмиссии дырок в область сильного электрического поля, т.е. по направлению к поверхности (в направлении уменьшения z). Дырки после выброса из КЯ попадают в электрическое поле поверхностного барьера и движутся к поверхности полупроводника (точнее, к границе с металлом), в результате чего создается фототок. Следует заметить, что эмиссия из подзон размерного квантования КЯ в матрицу GaAs — активационный процесс, поэтому в подобных структурах фотоэлектрические явления наиболее эффективно проявляются при достаточно высоких температурах [16]. В структуре А расположение δ -слоя относительно КЯ не препятствует эмиссии дырок к поверхности. Из рис. 2, *b* видно, что в структуре В для дырок возникает дополнительный потенциальный барьер высотой ~ 100 мэВ, расположенный между КЯ и поверхностью, что затрудняет процесс выброса дырок из КЯ в поверхностный слой GaAs. Этим объясняется отсутствие фотосигнала от КЯ в данной структуре,

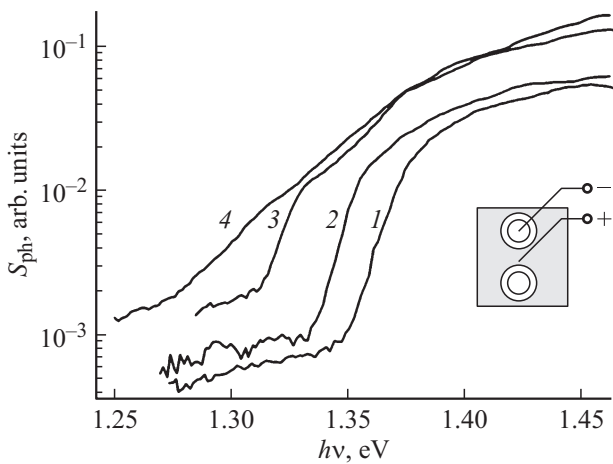


Рис. 3. Влияние обратного смещения V на барьере Шоттки на спектры фототока структуры А при 77 К. V , В: 1 — 0, 2 — (-0.5), 3 — (-1), 4 — (-2). На вставке — схематическое изображение кольцевой диодной структуры.

по крайней мере при температуре измерений 77 К. Вероятность термического выброса дырок в буферный слой хотя и значительно выше, но не приводит к возникновению фотосигнала.

Различия в спектрах фоточувствительности структур А и В подтверждаются результатами теоретического расчета эмиссионного времени жизни дырок τ_{em}^{hh} . Для расчета τ_{em}^{hh} применялась теория, развитая в [17]. При $T = 77$ К в структуре А $\tau_{em}^{hh} = 3 \cdot 10^{-10}$ с оказывается меньше рекомбинационного времени жизни, $\tau_r \sim 10^{-9}$ с [18]. Таким образом, большинство фотовозбужденных дырок до рекомбинации успевает выйти из КЯ по направлению к поверхности. В структуре В эмиссия происходит на несколько порядков медленнее рекомбинации ($\tau_{em}^{hh} = 4 \cdot 10^{-2}$ с), чем и объясняется отсутствие фототока в этой структуре.

Спектральные зависимости фотолуминесценции в структурах А и В практически не различаются (рис. 1, кривые 3, 4), т.е. интенсивность фотолуминесценции от положения δ -слоя не зависит. В то же время электролюминесценция прямосмещенного диода Шоттки сильно зависит от положения δ -слоя относительно КЯ: наличие δ -слоя в покровном слое между поверхностью и КЯ (структура В) приводит к полному исчезновению сигнала электролюминесценции. Различия в поведении фото- и электролюминесценции связаны с разным пространственным распределением неосновных носителей при оптическом и электрическом возбуждении. В случае оптического возбуждения генерация дырок происходит практически равномерно с обеих сторон КЯ. В случае электролюминесценции дырки инжектируются из металлического контакта (подробно механизм возникновения электролюминесценции в прямосмещенном диоде Шоттки описан в [19]). В структуре В донорный δ -слой кремния, расположенный между контактом Шоттки и КЯ, создает потенциальную яму для электронов и потенциальный барьер для дырок. Дополнительный потен-

циальный барьер 100 мВ (что много больше тепловой энергии при 77 К) препятствует транспорту дырок к КЯ и увеличивает вероятность рекомбинации с электронами δ -слоя. Если δ -слой находится в буферном слое (структура А), дырки достигают КЯ, релаксируют в нижние подзоны и излучательно рекомбинируют с электронами.

Увеличение обратного смещения до 2 В на диодной структуре А при измерении спектров фоточувствительности приводит к заметному красному смещению низкоэнергетического края полосы от КЯ (рис. 3). Это смещение значительно больше обычно наблюдаемого для одиночных симметричных КЯ эффекта Штарка [20,21]. В несимметричных КЯ, кроме индуцированного дипольного момента, также присутствует и постоянный дипольный момент, направление и величина которого определяются профилем зон проводимости и валентной в КЯ и ее окрестности. Наличие сформированной δ -слоем Si потенциальной ямы для электронов приводит к смещению электронной волновой функции по направлению к δ -слою. Следовательно, в структуре А у экситонов в КЯ появляется постоянный дипольный момент, направленный к поверхности. Этот дипольный момент приводит к дополнительному красному штарковскому сдвигу, поскольку его направление совпадает с направлением электрического поля поверхностного барьера.

4. Заключение

Установлено, что встраивание δ -слоя Si между КЯ InGaAs/GaAs и поверхностью структуры приводит к подавлению фоточувствительности и электролюминесценции от КЯ. Такой результат объясняется тем, что дополнительный кулоновский барьер δ -слоя эффективно препятствует эмиссии и транспорту дырок. В структурах с δ -слоем Si, расположенным за КЯ в буферном слое, сильное штарковское смещение обусловлено перераспределением электронной плотности между КЯ и δ -слоем, приводящим к появлению у экситона постоянного дипольного момента.

Авторы выражают благодарность А.А. Бирюкову за выращивание структур для исследования.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (задание № 3.640.2014/К).

Список литературы

- [1] E.F. Schubert, J.B. Stark, В. Ullrich, J.E. Cunningham. Appl. Phys. Lett., **52**, 1508 (1988).
- [2] А.В. Мурель, А.В. Новиков, В.И. Шашкин, Д.В. Юрасов. ФТП, **46**, 1384 (2012).
- [3] С.В. Тихов, И.А. Карпович, В.Г. Тестов. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, № 1, 31 (2013).
- [4] А.М. Nazmul, Т. Amemiya, Y. Shuto, S. Sugahara, M. Tanaka. Phys. Rev. Lett., **95**, 017 201 (2005).

- [5] H.-S. Yoon, J.-H. Lee, B.-S. Park, Ch.-E. Yun, Ch.-S. Park. *J. Korean Phys. Soc.*, **33**, 741 (1998).
- [6] H.-C. Chiu, C.-S. Cheng, C.-C. Wei. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, 1432 (2006).
- [7] И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, В.Г. Мокеров, С.С. Широков, Р.М. Имамов, И.А. Субботин. *ФТП*, **42**, 1102 (2008).
- [8] H.M. Shieh, W.C. Hsu, C.L. Wu. *Appl. Phys. Lett.*, **63** (4), 509 (1993).
- [9] X. Cao, Y. Zeng, M. Kong, L. Pan, B. Wang, Zh. Zhu. *Sol. St. Electron.*, **45**, 751 (2001).
- [10] Zh. Huang, R. Yu, Ch. Jiang, T. Lin, Zh. Zhang, J. Chu. *Phys. Rev. B*, **65**, 205 312 (2002).
- [11] Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзева. *ФТП*, **45**, 666 (2011).
- [12] V.V. Vainberg, A.S. Pylypchuk, N.V. Baidus, B.N. Zvonkov. *Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron.*, **16** (2), 152 (2013).
- [13] В.В. Русаков, Г.Н. Травлосев. *Микроэлектроника*, **8** (2), 177 (1979).
- [14] С.В. Тихов, Н.В. Байдусь, А.А. Бирюков, С.В. Хазанова. *ФТП*, **46**, 1532 (2012).
- [15] И.А. Карпович, Д.О. Филатов. *ФТП*, **30**, 1745 (1996).
- [16] Н.С. Волкова, А.П. Горшков, И.А. Карпович. *Вестн. Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. Сер. физ.*, **2** (1), 34 (2012).
- [17] J. Nelson, M. Paxman, K.W.J. Barnham, J.S. Roberts, C. Button. *IEEE J. Quant. Electron.*, **29** (6), 1460 (1993).
- [18] В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Л.В. Гавриленко, З.Ф. Красильник, Д.И. Курицын, Д.И. Крыжков, С.В. Морозов. *ФТП*, **46**, 940 (2012).
- [19] N.V. Baidus, M.I. Vasilevskiy, S.V. Khasanova, B.N. Zvonkov, H.P. van der Meulen, J.M. Calleja, L. Vina. *EPL*, **98**, 27 012 (2012).
- [20] D.A.B. Miller, D.S. Chemla, T.C. Damen, A.C. Gossard, W. Wiegmann, T.H. Wood, C.A. Burrus. *Phys. Rev. B*, **32**, 1043 (1985).
- [21] А.П. Горшков, И.А. Карпович, А.В. Кудрин. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 5, 25 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of Si δ -doped layer position on optoelectronic properties of heteronanostructures with InGaAs/GaAs quantum well

N.S. Volkova, A.P. Gorshkov, S.V. Tikhov, N.V. Baidus, S.V. Khazanova, V.E. Degtyarev, D.O. Filatov**

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

*Physico-Technical Research Institute of
Lobachevsky State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Photosensitivity, photoluminescence, and electroluminescence spectra of InGaAs/GaAs diode heteronanostructures with Si δ -doped layer formed at a distance of 10 nm from the quantum well InGaAs were investigated. The influence of Si δ -doped layer position relative to the quantum well on optoelectronic properties of structures was determined.