

13,03

Эпитаксиальное выращивание слоев MnGa/GaAs для диодов со спиновой инжекцией

© М.В. Дорохин¹, Д.А. Павлов², А.И. Бобров², Ю.А. Данилов¹, П.Б. Дёмина¹, Б.Н. Звонков¹,
А.В. Здорovejщев¹, А.В. Кудрин², Н.В. Малехонова², Е.И. Малышева¹

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

(Поступила в Редакцию 21 апреля 2014 г.)

Продемонстрирована возможность эпитаксиального выращивания слоев ферромагнитного галлида марганца Mn_3Ga_5 на поверхности (100) GaAs. Ферромагнитные свойства эпитаксиального Mn_3Ga_5 при комнатной температуре оценивались исходя из измерений аномального эффекта Холла. Сформирована диодная структура на основе контакта $Mn_3Ga_5/GaAs$, проведено измерение низкотемпературной электролюминесценции такого диода. Возможность получения электролюминесценции и высокое кристаллическое совершенство исследованных структур свидетельствуют о перспективах их применения в светоизлучающих диодах со спиновой инжекцией.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 13-02-97140, 13-07-00982, 14-07-31280) и Президента РФ (МК-2708.2013.2).

1. Введение

Исследования в области фундаментальных эффектов спинтроники и технологии приборов на основе спин-поляризованных носителей занимают важное место среди научных достижений последнего десятилетия [1–3]. Развитие физики и технологии спинтроники включает создание и совершенствование диодных структур, работа которых основана на инжекции спин-поляризованных носителей заряда из ферромагнитного (ФМ) слоя в немагнитный полупроводник [1–3]. Одним из требований к структурам ферромагнетик/полупроводник является высокое совершенство границы раздела, обеспечивающее наибольшую эффективность спиновой инжекции [2–4]. В свете этого значительное число исследований посвящено рассмотрению различных вариантов ФМ-инжекторов в качестве контактов к полупроводниковым структурам [1,5]. Перспективными считаются инжекторы на основе соединений MnAs [6] и MnGa [7]. Преимуществами таких инжекторов являются сравнительно высокое значение температуры Кюри (что обеспечивает возможность работы спиновых приборов при комнатной температуре) и совместимость с основным материалом оптоэлектроники — GaAs [6–8].

В настоящей работе приводятся результаты исследований эпитаксиальных структур $Mn_3Ga_5/GaAs$, сформированных комбинированным методом газофазной эпитаксии (ГФЭ) при атмосферном давлении и лазерного распыления мишеней в едином технологическом цикле. Показано высокое кристаллическое совершенство созданных слоев, исследованы электролюминесцентные свойства диодов на их основе.

2. Методика эксперимента

Применяемый в работе комбинированный метод выращивания структур заключается в поочередном применении метода ГФЭ и лазерного распыления в одном ростовом процессе [9]. Буферный слой GaAs, нелегированный GaAs, квантовая яма (КЯ) $In_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.1–0.18$, толщина 10 nm) и 30 nm спейсерный GaAs были последовательно выращены при температуре 600°C на подложке *n*-GaAs (001) методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Затем методом лазерного распыления мишени на основе интерметаллического сплава Mn_3Ga_5 при 300°C в том же реакторе сформирован ФМ-слой толщиной 40 nm. Для изучения магнитотранспортных свойств пленки Mn_3Ga_5 ряд структур был выращен на подложках *i*-GaAs.

На следующем технологическом этапе создания структур на поверхность образцов методом электронно-лучевого испарения в вакууме наносился слой Au для предотвращения окисления Mn_3Ga_5 . Базовый омический контакт к подложке *n*-GaAs формировался искровым вжиганием Sn-фольги. Таким образом была сформирована структура светоизлучающего диода Шоттки, аналогичная исследованной в [10]. Изготовление светоизлучающих диодов завершалось формированием мезоструктур диаметром 500 μm с применением фотолитографии и химического травления. Схематическое изображение структуры представлено на рис. 1.

В работе представлены результаты исследований кристаллической структуры приповерхностных областей образца с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100F с энергодисперсионным детектором

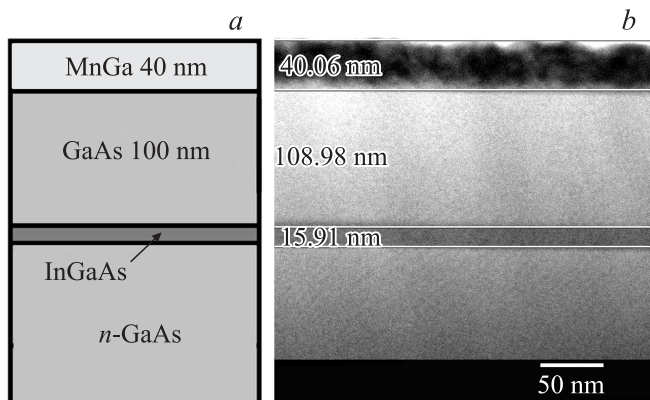


Рис. 1. Схематическое (*a*) и электронно-микроскопическое (*b*) изображения поперечного сечения структуры. Линиями выделены области гетерограниц.

X-Мах. Снимки высокого разрешения обрабатывались в программе Digital Micrograph. Для изучения ферромагнитных свойств слоев Mn_3Ga_5 были проведены измерения аномального эффекта Холла на контрольных структурах (температура измерений составила 300 К). На сформированных диодах при температурах 77 и 300 К исследованы вольт-амперные характеристики и электролюминесценция при прямом смещении. Прямое смещение соответствует положительному потенциалу на контакте Au/Mn_3Ga_5 по отношению к потенциалу подложки. Возбуждаемое в образце электролюминесцентное излучение регистрировалось со стороны GaAs-подложки, прозрачной для диапазона длин волн излучения диода.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 1 показаны схематический вид исследованной структуры (*a*) и электронно-микроскопическое изображение ее поперечного сечения (*b*). Контрастные полосы на части *b* соответствуют слоям Mn_3Ga_5 и КЯ InGaAs, толщины слоев совпадают с номинальными значениями. На рис. 2 показано изображение высокого разрешения для поперечного сечения структуры в области контакта Mn_3Ga_5 и приповерхностного слоя GaAs. Можно отметить высокое кристаллическое совершенство покровного слоя, характерное для структур, сформированных методом ГФЭ [9]. Слой Mn_3Ga_5 также имеет упорядоченную структуру, кристаллографическая ориентация которой связана с ориентацией слоя GaAs в направлении (110). Анализ дифракции от слоя, отнесенного к Mn_3Ga_5 [11–13], показал, что ему может быть поставлена в соответствие структура с тетрагональной элементарной ячейкой, рассчитанная в [12] для материала с составом $Mn_{101.5}Ga_{162.5}$, близким по пропорции к составу мишени. Отметим, что кристаллическая решетка слоя Mn_3Ga_5 когерентно сопрягается с решеткой GaAs в плоскости эпитаксиального роста (001) послед-

ней. Микроскопические данные могут быть дополнены электронограммами поверхностных слоев, показанными на рис. 3, *a, b*. Электронограммы были получены в геометрии электронного пучка, направленного перпендикулярно плоскости структуры (в направлении [001]).

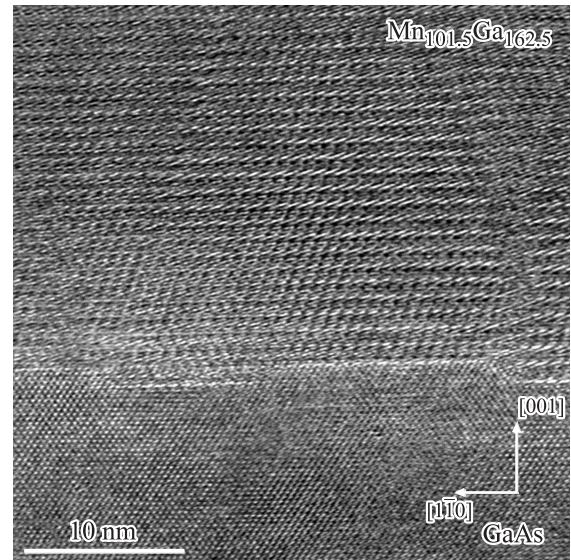


Рис. 2. Изображение высокого разрешения поперечного среза исследуемой структуры в области контакта $Mn_3Ga_5/GaAs$.

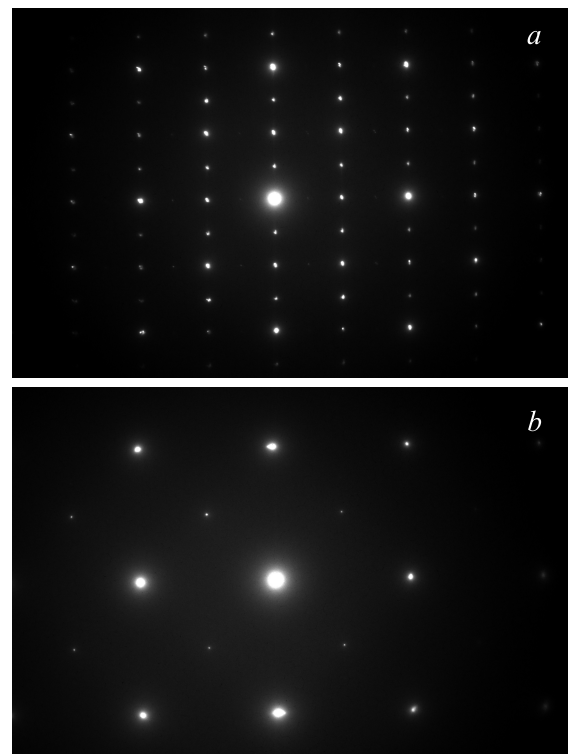


Рис. 3. Электронограммы слоя Mn_3Ga_5 , эпитаксиально выращенного на подложке GaAs(001). *a* — дифракция от Mn_3Ga_5 в ориентации (011), электронный пучок параллелен направлению [100] GaAs (plane-view); *b* — электронограмма от GaAs в ориентации [100] (plane-view).

На дифракционной картине верхнего слоя Mn_3Ga_5 (рис. 3, *a*) видны точечные рефлексы. Сравнение с табличными данными, приведенными в [12], показывает, что рефлексы соответствуют слою $\text{Mn}_{101.5}\text{Ga}_{162.5}$ с ростовым направлением [001]. После удаления Mn_3Ga_5 (рис. 3, *b*) на дифракционной картине сохраняются рефлексы, которые идентифицируются как точечные рефлексы от GaAs в направлении [001]. Расположение этих рефлексов коррелирует с рефлексами исходной картины (рис. 3, *a*), что является свидетельством эпитаксиального роста Mn_3Ga_5 на GaAs.

На рис. 4 показана магнитополевая зависимость сопротивления Холла, полученная для контрольной структуры (слой Mn_3Ga_5 , сформированный на подложке *i*-GaAs) при температуре измерений 300 К. На рисунке наблюдается нелинейная зависимость сопротивления Холла от магнитного поля с петлей гистерезиса, которая, согласно [14], обусловлена ферромагнитным упорядочением слоя Mn_3Ga_5 в магнитном поле. Послед-

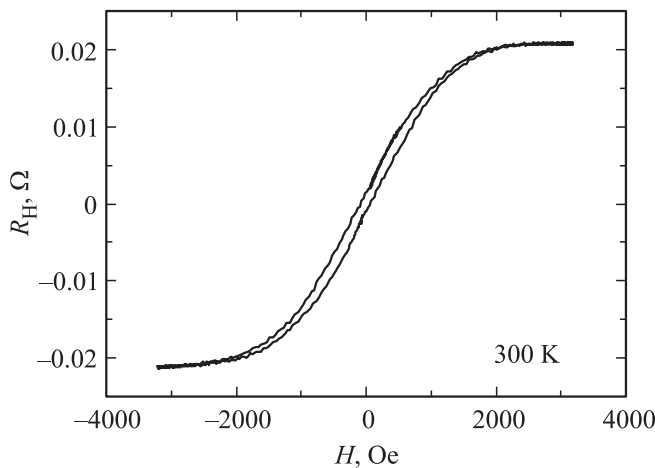


Рис. 4. Зависимость сопротивления Холла от магнитного поля для слоя $\text{Mn}_3\text{Ga}_5/i$ -GaAs, измеренная при 300 К.

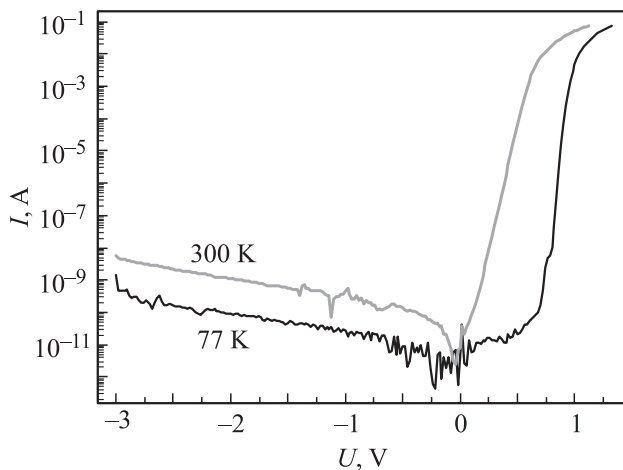


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики исследованного диода, измеренные при температурах 77 и 300 К.

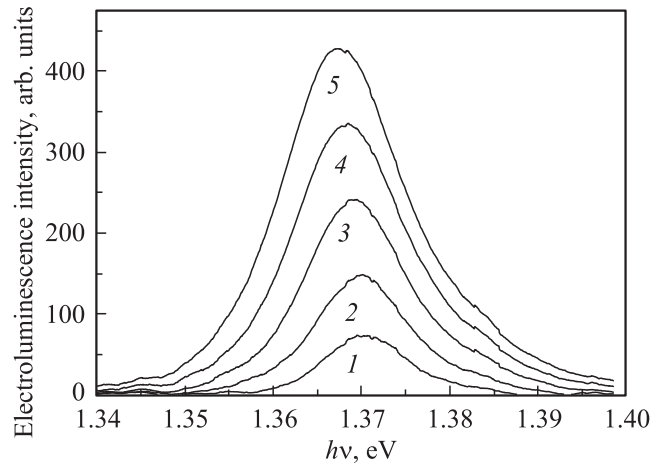


Рис. 6. Спектры электролюминесценции исследованного диода, измеренные при температуре 77 К и токе диода 20 (1), 30 (2), 50 (3), 100 (4), 200 мА (5).

нее согласуется с данными о ферромагнетизме галлида марганца с близким составом [15].

На диодных мезаструктурах была получена выпрямляющая вольт-амперная характеристика с экспоненциальным ростом прямого тока при увеличении напряжения (рис. 5). Отметим сравнительно низкие значения обратного тока диода (при -3 В), составившие 10^{-8} А при температуре 300 К (соответствует плотности тока $\sim 5 \cdot 10^{-6}$ А/см²). При понижении температуры измерений до 77 К величина обратных токов уменьшается на порядок. По графику вольт-амперной характеристики в соответствии с методикой [16] было оценено значение высоты потенциального барьера контакта $\text{Mn}_3\text{Ga}_5/\text{GaAs}$, составившее 0.91 eV.

В режиме прямого смещения светоизлучающего диода зарегистрировано электролюминесцентное излучение, спектр которого представлен на рис. 6. В спектре наблюдается пик при энергии $h\nu \sim 1.37$ eV, соответствующий излучательным электрон-дырочным переходам в КЯ с заданным составом ($x \approx 0.16$, толщина 10 нм). Интенсивность электролюминесценции монотонно возрастает с увеличением тока диода. Диапазон токов, при которых наблюдалось электролюминесцентное излучение, составил 20–200 мА, что несколько выше диапазона рабочих токов диода Шоттки с ферромагнитным контактом Co/GaAs [17]. В приведенном режиме электролюминесценции дырки инжектируются в активную область диода из ферромагнитного контакта, а электроны инжектируются из подложки *n*-GaAs.

4. Обсуждение результатов

Считается, что эпитаксиальное выращивание слоев MnGa на поверхности GaAs затруднительно в силу несогласования решеток [6–8]. Относительные успехи достигнуты лишь с применением технологии молекулярно-лучевой эпитаксии при выращивании тонких плен-

нок $MnGa$. Тем не менее возможность эпитаксиального роста галлида марганца с составом, близким к Mn_3Ga_5 , была показана ранее в работе [12] для ферромагнитных кластеров в матрице $GaMnSb/GaAs$. Принцип эпитаксии слоя галлида марганца в соответствии с [12] заключается в согласовании элементарной ячейки Mn_3Ga_5 с кратным количеством периодов полупроводника $GaAs$ [12]. В результате значительно лучше по сравнению с другими составами $MnGa$ выполняются условия эпитаксиального выращивания, что и позволяет формировать эпитаксиальные слои $Mn_3Ga_5/GaAs$ методом ГФЭ.

Электрические свойства сформированного диода подобны свойствам диодов Шоттки, рассмотренных ранее в [17]. Особенностью полуметаллического материала контакта Mn_3Ga_5 является его дырочная проводимость, что, вероятно, повышает потенциальный барьер по сравнению с диодами, рассмотренными в [17]. Последнее может являться причиной сравнительно низкого значения обратных токов диода (рис. 5). В гетероструктурах на основе Mn -содержащих соединений возможна диффузия Mn в активные области светоизлучающего диода [18]. Это также приводит к повышению потенциального барьера в диоде Шоттки в том случае, если акцепторная примесь Mn компенсирует доноры в приповерхностной области полупроводника.

5. Заключение

Таким образом, были сформированы и исследованы эпитаксиальные слои Mn_3Ga_5 на поверхности (100) $GaAs$. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют об ориентированном росте ферромагнитного соединения на поверхности полупроводника. Эпитаксия материала именно такого состава при выращивании методом ГФЭ продемонстрирована впервые. Кристаллическое совершенство слоев, ферромагнитные свойства и зарегистрированная электролюминесценция светодиодов на их основе делают исследованные гетероструктуры перспективными для создания структур с инжекцией спин-поляризованных носителей заряда. Отметим, что схемы с инжекцией спин-поляризованных дырок в структурах на основе $GaAs$ успешно применялись ранее в [19]; следовательно, использование инжекции дырок не является фундаментальным препятствием для создания спинового светоизлучающего диода. Также отметим, что ферромагнитные инжекторы с дырочной проводимостью могут быть использованы для инжекции спин-поляризованных электронов в структурах с туннельным барьером [20].

Список литературы

[1] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D* **40**, R179 (2007).
[2] J. Sinova, I. Zutic. *Nature Mater.* **11**, 368 (2012).
[3] А.А. Фраерман, В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, А.В. Панин. *УФН* **182**, 12, 1345 (2012).

[4] X. Jiang, R. Wang, R.M. Shelby, R.M. Macfarlane, S.R. Bank, J.S. Harris, S.S.P. Parkin. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 056 601 (2006).
[5] G. Schmidt. *J. Phys. D* **38**, R107 (2005).
[6] J. Kwon, R.E. Goacher, E.D. Fraser, L. Schweidenback, A.H. Russ, J.B. Hatch, A. Petrou, J.A. Gardella, Jr., H. Luo. *J. Low Temp. Phys.* **169**, 5–6, 377 (2012).
[7] C. Adelmann, J.L. Hilton, B.D. Schultz, S. McKernan, C.J. Palmström, X. Lou, H.-S. Chiang, P.A. Crowell. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 112 511 (2006).
[8] D.K. Satapathy, B. Jenichen, K.H. Ploog, W. Braun. *J. Appl. Phys.* **110**, 02 350 (2011).
[9] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Е.С. Демидов, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, В.В. Подольский, М.В. Сапожников. *Опт. журн.* **75**, 6, 56 (2008).
[10] N.V. Baidus, M.I. Vasilevskiy, M.J.M. Gomes, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov, V.D. Kulakovskii, A.S. Brichkin, A.V. Chernenko, S.V. Zaitsev. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 181 118 (2006).
[11] M. Bostrom, S. Hovmoller. *J. Solid State Chem.* **153**, 398 (2000).
[12] А.И. Бобров, Е.Д. Павлова, А.В. Кудрин, Н.В. Малехонова. *ФТП* **47**, 12, 1613 (2012).
[13] O. Gourdon, G.J. Miller. *J. Solid State Chem.* **173**, 137 (2003).
[14] N. Nagaosa, J. Sinova, S. Onoda, A.H. MacDonald, N.P. Ong. *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1539 (2010).
[15] J.S. Wu, K.H. Kuo. *Met. Mater. Transact. A* **28**, 729 (1997).
[16] Э.Х. Родерик. *Контакты металл-полупроводник. Радио и связь*, М. (1982). 209 с.
[17] Е.А. Ускова, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, П.Б. Демина, Е.И. Малышева, Е.А. Питиримова, Ф.З. Гильмутдинов. *Поверхность* **2**, 89 (2006).
[18] R.E. Goacher, S. Hegde, H. Luo, J.A. Gardella. *J. Appl. Phys.* **106**, 4, 044 302 (2009).
[19] D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, R. Epstein, Y. Kato, D.D. Awschalom. *Semicond. Sci. Technol.* **17**, 275 (2002).
[20] M. Kohda, Y. Ohno, F. Matsukura, H. Ohno. *Physica E* **32**, 438 (2006).