

06

## **Спиновые светоизлучающие диоды на основе гетероструктур с квантовой ямой GaAs/InGaAs/GaAs и ферромагнитным инжектирующим слоем GaMnSb**

© М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, А.В. Здоровейщев,  
Ю.А. Данилов

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
E-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 6 марта 2012 г.

Сформирована и исследована диодная структура с квантовой ямой InGaAs/GaAs, содержащая ферромагнитный слой GaMnSb в качестве полупроводника *p*-типа проводимости. Получена циркулярная поляризация электролюминесценции указанных структур, значение степени поляризации (0.012 в магнитном поле 0.37 Т) практически не меняется в диапазоне температур 10–50 К. Циркулярная поляризация обусловлена инжекцией в GaAs спин-поляризованных дырок из ферромагнитного слоя GaMnSb.

Создание и исследование спиновых светоизлучающих диодов (ССИД) с управляемыми магнитным полем параметрами излучения является актуальной задачей современной оптоэлектроники и спинтроники [1–3]. Ключевым элементом ССИД является слой ферромагнитного инжектора, который обеспечивает инжекцию ориентированных по спину носителей заряда в активную область светодиодной структуры. Рекомбинация ориентированных по спину носителей в активной области сопровождается испусканием циркулярно-поляризованного излучения, знак и степень поляризации которого управляются внешним магнитным полем [1–4]. К ферромагнитным инжекторам ССИД предъявляется ряд требований: обеспечение высокой интенсивности электролюминесценции (ЭЛ), совместимость с полупроводниковой структурой ССИД (например, минимизация дефектов на границе раздела), высокое значение

температуры Кюри. Последние достижения в области ССИД связаны с применением эпитаксиальных ферромагнитных слоев, нанесенных на поверхность гетероструктур на основе GaAs [5–7]. Можно отметить работы по исследованию ССИД с контактом GaMnAs [5], MnAs [6], MnSb [7]. Высокое качество эпитаксиальных слоев позволяет получить эффективную электролюминесценцию и спиновую инжекцию.

В данной работе исследована циркулярная поляризация электролюминесценции диодов на основе гетероструктур с квантовой ямой InGaAs/GaAs, содержащих слой ферромагнитного полупроводника GaMnSb. Структуры выращены с применением комбинированной методики газофазной эпитаксии и лазерного распыления твердотельных мишеней [8]. Указанный материал, на наш взгляд, имеет значительные перспективы применения. Согласно ранее полученным результатам, преимуществами контактов GaMnSb являются возможность эпитаксиального выращивания на поверхности GaAs, а также наличие ферромагнитных свойств при комнатной температуре [9].

Структуры для исследований были изготовлены с помощью двухступенчатого метода эпитаксиального выращивания. Буферный слой GaAs толщиной  $0.5 \mu\text{m}$ , легированный Si до концентрации  $n \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 3-nm слой нелегированного GaAs, квантовая яма (КЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (ширина  $d_{QW} = 10 \text{ nm}$ , содержание In,  $x \approx 0.14\text{--}0.16$ ) и 20–30-nm спейсерный слой GaAs были последовательно выращены при температуре  $600^\circ\text{C}$  на подложке  $n\text{-GaAs}$  (001) методом газофазной эпитаксии из металл-органических соединений и арсина (ГФЭ МОС) при атмосферном давлении водорода. На следующей стадии методом лазерного распыления мишеней Mn и GaSb при температуре  $400^\circ\text{C}$  были выращены слой GaMnSb и 6-nm нелегированный слой GaSb для предотвращения окисления ферромагнитного полупроводника. Снижение температуры выращивания необходимо для минимизации диффузии Mn из легированного слоя. Содержание Mn оценивалось по соотношению времен распыления компонентов

$$Y_{\text{Mn}} = t_{\text{Mn}} / (t_{\text{Mn}} + t_{\text{GaSb}}). \quad (1)$$

Толщина слоя  $\text{Ga}_{1-y}\text{Mn}_y\text{Sb}$  ( $d$ ) составила 10 и 30 nm, номинальное содержание Mn 0.1–0.5. Дополнительные детали технологии изготовления структур описаны в [8]. Технологические параметры исследованных структур приведены в таблице. Ферромагнитные свойства аналогичных

Технологические параметры исследованных структур

Образец	$d_{\text{GaMnSb}}$ , nm	$Y_{\text{Mn}}$	Толщина спейсерного слоя, nm
A	10	0.1	30
B	30	0.2	20
C	30	0.5	30

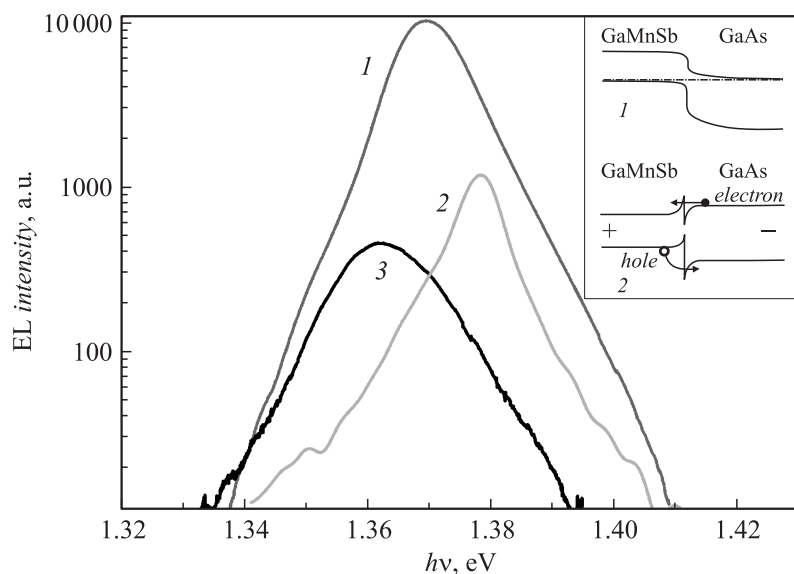
слоев GaMnSb, выращенных на подложках *i*-GaAs, были детально изучены в [9]. Слои GaSb, легированные марганцем, имели *p*-тип проводимости ( $p \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ).

Для формирования диодов на поверхность образцов наносился Au-контакт методом термического испарения в вакууме. Базовый омический контакт к подложке GaAs формировался искровым вжиганием Sn-фольги. Таким образом формировалась диодная структура, в которой областью *p*-типа являлся тонкий слой GaMnSb. Изготовление светоизлучающих диодов завершалось формированием меза-структур диаметром  $500 \mu\text{m}$  с применением фотолитографии и химического травления. На диодах были проведены исследования ЭЛ и циркулярной поляризации ЭЛ в интервале температур 10–120 К. Магнитопольные зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ исследовались при помещении образцов в магнитное поле электромагнита. Величина магнитного поля варьировалась в диапазоне 0–0.37 Т. Значение степени поляризации оценивалось по формуле:

$$P_{\text{EL}} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-), \quad (2)$$

где  $I_+$  ( $I_-$ ) — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путем интегрирования полосы соответствующей части спектра излучения. Спектры ЭЛ измерены при прямом смещении диодов (на GaMnSb подавался положительный относительно базы потенциал). Также были проведены контрольные исследования циркулярной поляризации фотолюминесценции (ФЛ) структур. Фотолюминесцентное излучение возбуждалось при облучении He–Ne-лазером поверхности образцов, не покрытых Au-контактом; слой GaMnSb в указанном выше диапазоне толщин является полупрозрачным для лазерного излучения.

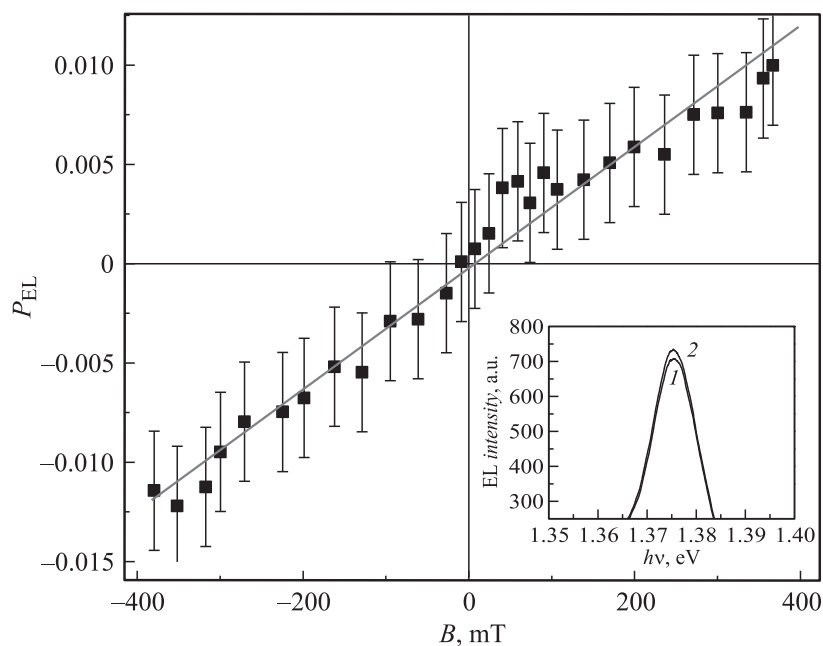
Спектры ЭЛ диодов А–С с различными параметрами GaMnSb, измеренные при температуре 77 К, показаны на рис. 1. На спектрах каж-



**Рис. 1.** Спектры электролюминесценции светоизлучающих диодов на основе структур: 1 — А ( $Y_{\text{Mn}} = 0.1$ ,  $d = 10$  nm), 2 — В ( $Y_{\text{Mn}} = 0.2$ ,  $d = 30$  nm), 3 — С ( $Y_{\text{Mn}} = 0.5$ ,  $d = 30$  nm), измеренные при температуре 77 К и токе диода 70 мА. На вставках изображены зонные диаграммы контакта  $p$ -GaSb/ $n$ -GaAs: 1 — в отсутствие электрического смещения, 2 — при прямом смещении.

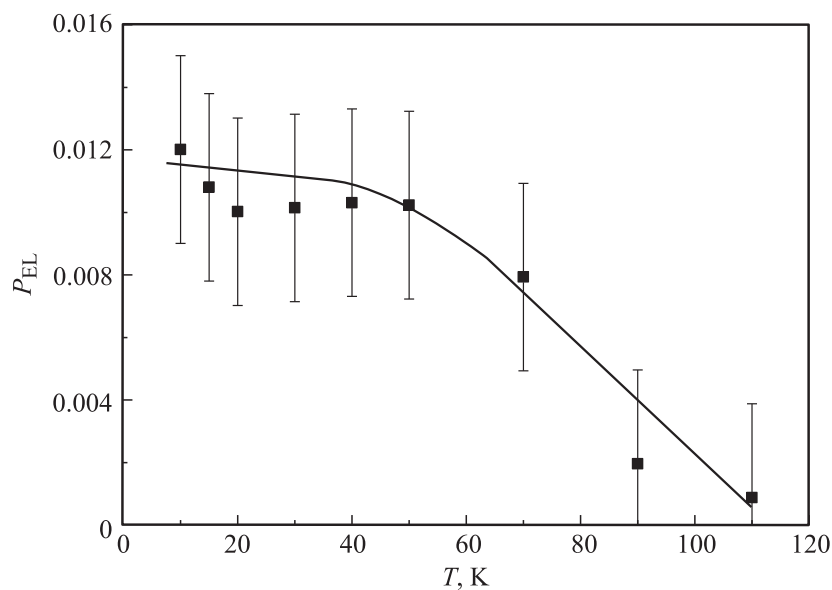
дого диода наблюдается линия при энергии 1.37–1.39 eV, обусловленная излучательными переходами  $eI-hhI$  в InGaAs квантовой яме. Разброс энергий перехода для разных структур обусловлен варьированием содержания In в квантовой яме. Наибольшая интенсивность электролюминесценции характерна для структуры с минимальной толщиной слоя GaMnSb ( $d = 10$  nm) и содержанием Mn ( $Y_{\text{Mn}} = 0.1$ ). Увеличение толщины ферромагнитного слоя до 30 nm, так же как и увеличение содержания Mn в нем до 0.5, приводят к существенному снижению интенсивности электролюминесценции при одинаковых значениях тока диода.

При введении диода А в магнитное поле электролюминесцентное излучение становится частично циркулярно-поляризованным, т. е. ин-



**Рис. 2.** Зависимость степени циркулярной поляризации на основе структуры с  $Y_{Mn} = 0.1$ ,  $d = 10$  nm от величины магнитного поля, измеренная при температуре 10 K и токе диода 30 mA. На вставке изображены спектры электролюминесценции диода, измеренные в  $\sigma^-$  (1) и  $\sigma^+$  (2) поляризациях.

тенсивность компоненты, поляризованной по левому кругу, превышает интенсивность компоненты, поляризованной по правому кругу (вставка к рис. 2). Степень поляризации, рассчитанная по формуле (2), линейно увеличивается с увеличением магнитного поля, достигая максимального значения 0.012 в магнитном поле 0.37 T (рис. 2). При изменении направления магнитного поля на противоположное степень поляризации меняет знак (рис. 2). Степень циркулярной поляризации фотолюминесценции исследованного диода равна нулю в тех же условиях эксперимента. Отметим также, что в случае структур с более высоким содержанием Mn или с большей толщиной слоя GaMnSb (B, C) цирку-



**Рис. 3.** Зависимость степени циркулярной поляризации диода на основе структуры с  $Y_{Mn} = 0.1$ ,  $d = 10$  nm от температуры измерений. Величина магнитного поля 0.37 T.

лярная поляризация электролюминесценции не была зарегистрирована в исследованном диапазоне магнитных полей.

Диапазон температур, в котором наблюдалась циркулярная поляризация ЭЛ излучения, составил 10–110 K (рис. 3). При температуре измерений более 50 K значение степени циркулярной поляризации уменьшается, что может быть связано с приближением к значению температуры Кюри ферромагнитного слоя.

Перейдем к обсуждению полученных экспериментальных результатов. В [9] методом рентгеновской дифракции было показано, что в гетероструктурах GaMnSb/GaAs при содержании Mn ( $Y_{Mn} < 0.3$ ) кристалличность слоя GaMnSb не нарушается. Можно предполагать, что, несмотря на большое рассогласование решеток ( $\sim 7\%$ ), на поверхности указанных структур формируется эпитаксиальный слой GaMnSb. Особенностью зонной диаграммы гетероструктуры GaSb/GaAs является

наличие потенциального барьера для обоих типов носителей заряда [10]. Электронный и дырочный токи могут протекать в результате надбарьерной эмиссии, аналогично протеканию тока в диодах Шоттки [11]. Кроме того, при большой плотности тока возможно снижение потенциального барьера за счет изгиба зон в приповерхностной области при протекании тока электронов (вставка 2 к рис. 1) [10].

Отдельную задачу представляет собой описание механизмов дырочного тока, ответственных за явление ЭЛ. В рамках данного сообщения детальное описание механизмов представляется затруднительным, поскольку требует дополнительных исследований. Можно предполагать, что эффективная инжекция дырок в GaAs связана с уменьшением эффективной высоты потенциального барьера (вставка 2 к рис. 1). Снижение высоты потенциального барьера для дырок возможно также за счет диффузии марганца в область GaAs и формирования тонкого слоя *p*-GaAs. Отметим возможность рекомбинации электронов с дырками на границе GaAs/GaMnSb аналогично [11,12]. В силу наличия дефектов на границе раздела [13] и в слое GaMnSb (поскольку последний выращен при низкой температуре) можно сделать предположение о преимущественно безызлучательном характере рекомбинации на границе раздела. По-видимому, вероятность безызлучательной рекомбинации растёт с увеличением концентрации примесных атомов Mn, а также с увеличением толщины ферромагнитного слоя за счет его частичной релаксации и образования дислокаций несоответствия на границе раздела GaMnSb/GaAs.

Наличие циркулярной поляризации ЭЛ вкупе с нулевым значением степени циркулярной поляризации при контрольных измерениях ФЛ той же диодной структуры является однозначным свидетельством инжекции спин-поляризованных дырок из ферромагнитного слоя в активную область СИД [3]. Низкое значение степени поляризации, по-видимому, обусловлено используемой геометрией эксперимента. В СИД на основе гетероструктур с квантовой ямой используется геометрия, в которой магнитное поле направлено перпендикулярно поверхности [14,15], а указанное направление перпендикулярно оси легкого намагничивания ферромагнитного слоя. Для намагничивания слоя требуются магнитные поля величиной порядка 2–3 Т. Так, аналог исследованных нами структур изучался в [16]. В этой работе намагниченность насыщения ферромагнитного слоя MnAs достигалась в поле 2 Т. В диапазоне магнитных полей 0–0.4 Т степень циркулярной поляризации линейно зависела от

магнитной индукции и не превышала 0.004. Указанное значение ниже полученного в настоящем эксперименте, что подтверждает наличие спиновой инжекции из GaMnSb в GaAs. Отсутствие циркулярной поляризации в диодах с более высоким содержанием Mn и большей толщиной GaMnSb слоя предположительно обусловлено рассеянием спин-поляризованных дырок на дефектах границы раздела. Дефекты, вызывающие спиновое рассеяние на границе раздела, являются также центрами безызлучательной рекомбинации.

Из температурной зависимости  $P_{EL}$  (рис. 3) видно, что циркулярная поляризация сохраняется вплоть до температуры 110 К. Снижение степени циркулярной поляризации при температуре выше 50 К может быть обусловлено как приближением к точке Кюри ферромагнитного слоя GaMnSb со сравнительно низким содержанием Mn ( $Y_{Mn} = 0.1$  для структуры А), так и увеличением спинового рассеяния при повышенных температурах [17]. Отметим, что на подобных структурах, но с большим содержанием Mn ( $Y_{Mn} = 0.5$ ) и большей толщиной слоя GaMnSb ( $d = 30$  nm) ферромагнитные свойства вплоть до 300 К были зарегистрированы путем измерения аномального эффекта Холла [9]. Однако в случае спиновых светоизлучающих диодов повышение содержания Mn сопровождается снижением степени циркулярной поляризации ЭЛ до нуля. Для повышения рабочей температуры спинового диода требуется оптимизация его структуры.

Таким образом, были изготовлены и исследованы диодные структуры с квантовой ямой InGaAs/GaAs, содержащие ферромагнитный инжектор GaMnSb. Показана возможность получения циркулярно-поляризованной ЭЛ диодов, помещенных в магнитное поле. Значение степени циркулярной поляризации ЭЛ излучения составило 0.012 в магнитном поле 0.37 Т. Циркулярная поляризация электролюминесценции обусловлена инжекцией спин-поляризованных носителей из ферромагнитного контактного слоя GaMnSb.

Авторы выражают признательность Б.Н. Звонкову за изготовление образцов для исследований.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (10-02-00739, 11-02-00645), ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы, гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых Российских ученых (№ 16.120.11.5359-МК).



## Список литературы

- [1] *Žutić I, Fabian J, Das Sarma S.* // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. P. 323–410.
- [2] *Concepts on Spin Electronics* / Ed. by S. Maekawa. New York: Oxford University Press, 2006. 398 p.
- [3] *Schmidt G.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R107–R122.
- [4] *Holub M., Bhattacharya P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R179–R203.
- [5] *Young D.K., Gupta J.A., Johnston-Halperin E., Epstein R., Kato Y., Awschalom D.D.* // Semicond. Sci. Tech. 2002. V. 17. P. 275–284.
- [6] *Ramsteiner M., Hao H.Y., Kawaharazuka A., Zhu H.J., Kastner M., Hey R., Daweritz L., Grahn H.T., Ploog K.H.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 081304R.
- [7] *Young D.K., Johnston-Halperin E., Awschalom D.D., Ohno Y., Ohno H.* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 1598–1600.
- [8] *Звонков Б.Н., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Демидов Е.С., Дёмина П.Б., Дорохин М.В., Дроздов Ю.Н., Подольский В.В., Сапожников М.В.* // Опт. журнал. 2008. Т. 75. Р. 6. С. 56–61.
- [9] *Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Кудрин А.В., Вихрова О.В., Планкина С.М., Дунаев В.С., Нежданов А.В., Дроздов Ю.Н., Сапожников М.В.* // Изв. РАН. Сер. Физ. 2012. Т. 76. В. 2. С. 199–201.
- [10] *Lin S.-Y., Tseng C.-C., Lin W.-H., Mai S.-C., Wu S.-Y., Chen S.-H., Chyi J.-I.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 123503.
- [11] Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки (физика, технология, применение) / В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевский. М.: Сов. радио, 1974. 248 с.
- [12] *Hsieh H.-W., Yena S.-T.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 103515.
- [13] *Wang Y., Ruterana P., Desplanque L., El Kazzi S., Wallart X.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 023509.
- [14] *Fiederlöh R., Grabs P., Ossau W., Schmidt G., Molenkamp L.W.* // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. N 13. P. 2160–2163.
- [15] *Yu Z.G., Lau W.H., Flatte M.E.* // Preprint Cond. Mat. 2003. N 0308220.
- [16] *Ramsteiner M., Hao H.Y., Kawaharazuka A.* et al. // Phys. Rev. B. 2011. V. 109. P. 023509.
- [17] Оптическая ориентация / Под ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1989. 408 с.