

Циркулярно-поляризованная электролюминесценция светоизлучающих диодов $\text{InGaAs/GaAs}/(\text{A}^{\text{III}}, \text{Mn})\text{B}^{\text{V}}$ на основе структур с туннельным барьером

© Е.И. Малышева^{+*}†, М.В. Дорохин⁺, М.В. Ведь⁺, А.В. Кудрин⁺, А.В. Здравейцев⁺

⁺ 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 22 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Проведено сравнительное исследование циркулярно-поляризованной электролюминесценции в диодах Зеннера на основе гетероструктур $\text{InGaAs}/n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}/\text{GaMnAs}$ и $\text{InGaAs}/n\text{-GaAs}/n^+\text{-GaAs}/\text{GaMnSb}$. Установлено, что циркулярная поляризация связана со спиновой инжекцией электронов из слоя ферромагнитного полупроводника, а параметры излучения определяются свойствами этого слоя. Показано, что ферромагнитные свойства слоя GaMnSb позволяют получить циркулярно-поляризованное излучение при комнатной температуре.

1. Введение

Структуры на основе ферромагнитных полупроводников находят применение в современной электронике и оптоэлектронике как элементы новых приборов на спин-поляризованных носителях [1]. Особенностью большинства известных видов ферромагнитных полупроводниковых инжекторов является дырочная проводимость, поэтому приборы на их основе функционируют за счет инжекции спин-поляризованных дырок [1]. Небольшое значение длины спиновой диффузии для дырок (~ 80 нм) [2] затрудняет использование такого варианта ферромагнитного инжектора, особенно в светоизлучающих диодах и лазерных структурах с толстыми ограничивающими и волноводными слоями (т.е. с большим пространственным разделением инжектора и активной области) [1]. В работе [3] была предложена конструкция светоизлучающего диода с инжекцией спин-поляризованных носителей, основанная на межзонном туннелировании электронов из валентной зоны GaMnAs в зону GaAs . Конструкция представляла собой диод с туннельным барьером на основе гетероструктуры с квантовой ямой (КЯ) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Возможность межзонного туннелирования связанных спин-поляризованных электронов из слоя ферромагнитного полупроводника (как правило, p -типа проводимости) в валентную зону светоизлучающего диода (n^+ -типа) возникает за счет изгиба зонной диаграммы при контакте с сильно легированной n^+ -областью. Туннелирование в полупроводник, перенос к активной области спин-поляризованных электронов из ферромагнитного слоя и последующая их рекомбинация с дырками, инжектированными со стороны подложки, сопровождаются испусканием циркулярно-поляризованного излучения, степень поляризации которого является мерой эффективности спиновой инжекции. В работе [4] аналогичные [3,5] ди-

оды со спиновой инжекцией электронов были получены на основе гетероструктур $\text{GaMnAs}/\text{GaAs}/\text{InGaAs}$.

Характерным недостатком исследованных в [3,5] и [4] диодов является низкий диапазон рабочих температур, что обусловлено низким значением температуры Кюри GaMnAs (50 К) [4]. В настоящей работе сформированы и исследованы светоизлучающие диоды на основе гетероструктур $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ с туннельным барьером $\text{GaMnSb}/n^+\text{-GaAs}$. Согласно полученным ранее результатам [6], слои GaMnSb на поверхности GaAs обладают ферромагнитными свойствами вплоть до комнатной температуры и могут быть использованы в качестве контактных слоев спиновых светоизлучающих диодов. В рамках представляемого исследования были разработаны светоизлучающие диоды, для которых показана возможность инжекции спин-поляризованных электронов при комнатной температуре.

2. Методика эксперимента

Структуры были сформированы комбинированным методом эпитаксиального выращивания, сочетающим газофазную эпитаксию (ГФЭ) и импульсное лазерное осаждение (ИЛО), выполняемые в одном реакторе [6,7]. На подложках $p\text{-GaAs}$ методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении и температуре 600°C последовательно выращивались: буферный слой $p\text{-GaAs}$, квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}:\text{C}$ (концентрация дырок $p \approx 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, ширина КЯ варьировалась в пределах $d_{\text{QW}} = 13\text{--}30$ нм, содержание In в слое КЯ $x = 0.09\text{--}0.24$), тонкий слой нелегированного GaAs (толщина ~ 6 нм), $n\text{-GaAs}$ (концентрация электронов $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщина ~ 50 нм), $n^+\text{-GaAs}$ ($n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, толщина ~ 20 нм), $n^{++}\text{-GaAs}$ ($n \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$, толщина ~ 20 нм). Затем при температуре 340°C методом импульсного лазерного осаждения Mn и GaB^{V} (B^{V} — элемент V группы) выращивались контактные ферромагнит-

† E-mail: malysheva@phys.unn.ru

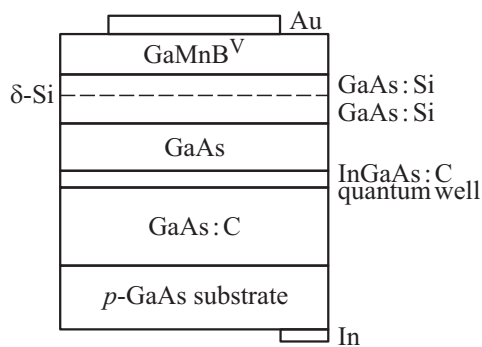


Рис. 1. Схема структур для исследований с инжектором в виде GaMnAs (структура А) или GaMnSb (структура В).

ные слои GaMnB^V и 6 нм GaB^V (рис. 1). Структуры различались типом полупроводникового контактного слоя. В структурах А на поверхности формировался слой GaMnAs (~ 40 нм), зарощенный слоем GaAs (B^V = As). В структурах В формировался слой GaMnSb (~ 10 нм), зарощенный слоем GaSb (B^V = Sb). Содержание Mn оценивалось по формуле

$$Y_{\text{Mn}} = t_{\text{Mn}} / (t_{\text{Mn}} + t_{\text{GaB}^{\text{V}}}), \quad (1)$$

где t_{Mn} ($t_{\text{GaB}^{\text{V}}}$) — время распыления Mn (материала GaB^V). Для исследованных образцов $Y_{\text{Mn}} = 0.1$. Уменьшение температуры выращивания необходимо для предотвращения диффузии атомов Mn в активные области структуры [7]. Осаждение слоя GaB^V проводилось с целью предотвращения окисления ферромагнитного полупроводника при переносе между технологическими установками. Также была исследована контрольная структура, выращенная методом ГФЭ по аналогии со структурой А, но не содержащая ферромагнитного слоя.

Для формирования диодной структуры на поверхность образцов наносился омический Au-контакт методом электронно-лучевого испарения в вакууме, для создания базового омического контакта использовалось искровое вжигание In-фольги. На последнем этапе формирования диодов методами фотолитографии и химического травления изготавливались мезаструктуры диаметром 500 мкм.

На сформированных диодах были проведены исследования вольт-амперных характеристик $I(U)$ и электролюминесценции (ЭЛ) при смещении диодов в туннельном режиме: на Au-контакт подавался отрицательный относительно базы потенциал. Исследования степени циркулярной поляризации ЭЛ в магнитном поле, приложенном перпендикулярно поверхности образца, проведены в интервале температур $T = 10\text{--}300$ К. Степень циркулярной поляризации ЭЛ P оценивалась по формуле

$$P = (J_1 - J_2) / (J_1 + J_2), \quad (2)$$

где J_1 , J_2 — относительные интенсивности люминесценции, измеренные для света, поляризованного по левому (J_1) и по правому (J_2) кругу.

3. Результаты исследований

Исследованные структуры представляют собой два p – n -перехода, включенных навстречу друг другу. При прямом смещении диодов первый (от подложки) p – n -переход смещается в прямом направлении, а второй (содержащий туннельный слой) — в обратном направлении. В результате изгиба зон в обратно смещенном p – n -переходе с сильно легированной n -областью протекает туннельный ток электронов из валентной зоны ферромагнитного полупроводника в зону проводимости n^{++} -GaAs. Вольт-амперные характеристики диодов представлены на рис. 2. Высокое значение прямого тока I по сравнению с обратным подтверждает туннельный механизм инжекции. Отметим на порядок большие значения прямого и обратного тока для структур В по сравнению со структурами А. Вероятной причиной различия является меньшее значение высоты барьера на гетерогранице GaMnSb/ n^{++} -GaAs вследствие особенности формирования зонной диаграммы [2].

В режиме прямого смещения наблюдается электролюминесценция исследованных диодов, спектры ЭЛ показаны на рис. 3. В спектрах наблюдались пики при энергиях 1.28 эВ (структура А) и 1.41 эВ (структура В), соответствующие энергии основного перехода в квантовой яме $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$. Положения пиков ЭЛ различались в зависимости от содержания In x в КЯ. При введении диодов в магнитное поле ЭЛ излучение становится частично циркулярно-поляризованным, т. е. интенсивность левополяризованной компоненты излучения превышает интенсивность компоненты, поляризованной по правому кругу. Зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ, рассчитанные по формуле (2), от магнитного поля H показаны на рис. 4, 5. Для обеих структур получена нелинейная зависимость $P(H)$ с точкой перегиба в магнитном поле 150–200 мТл (рис. 4, 5). Магнитолевая зависимость степени поляризации в обоих случаях

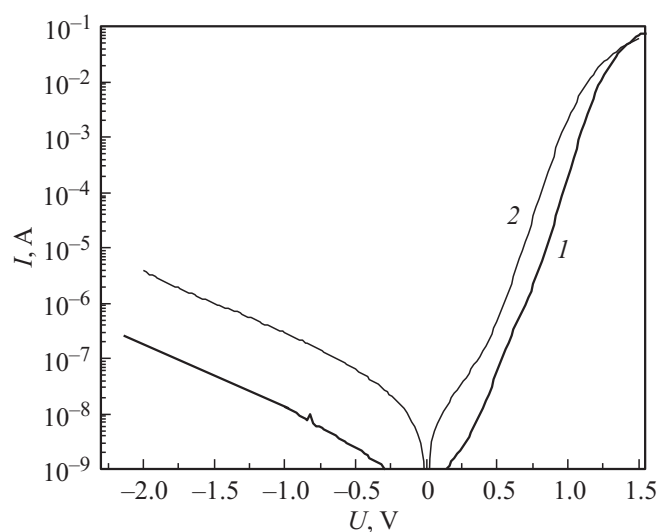


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов при температуре 300 К: 1 — структура А, 2 — структура В.

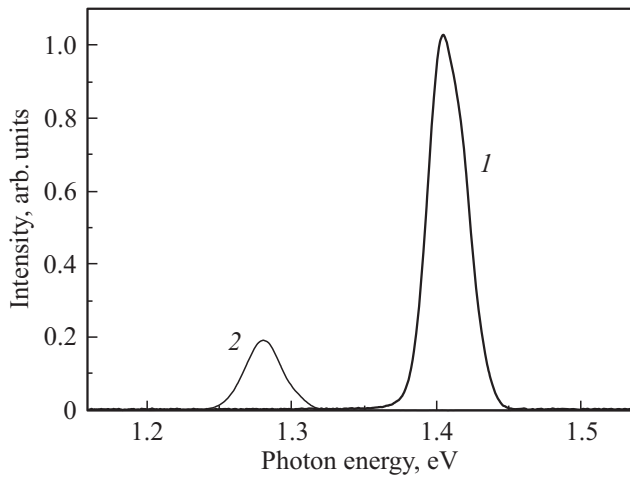


Рис. 3. Спектры электролюминесценции диодов при температуре 77 К и токе диода 5 мА: 1 — структура А, 2 — структура В.

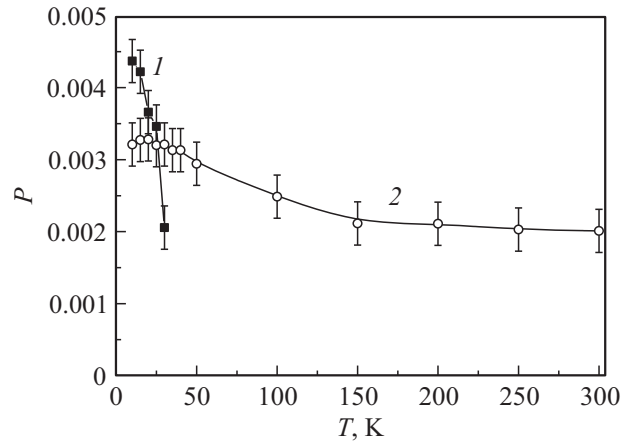


Рис. 6. Температурные зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ структур А и В при токе диода 5 мА и величине магнитного поля 2000 Э.

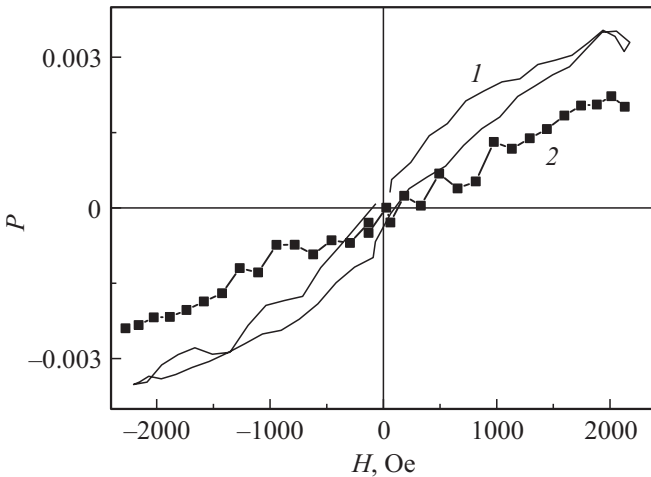


Рис. 4. Зависимости степени циркулярной поляризации от магнитного поля структуры А при токе диода 5 мА и температурах 10 (1), 30 К (2).

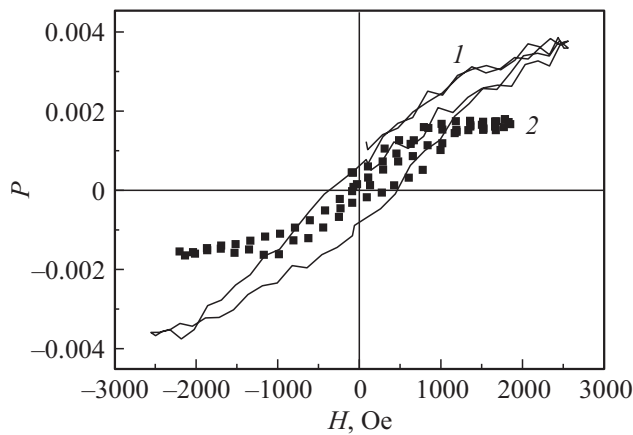


Рис. 5. Зависимости степени циркулярной поляризации от магнитного поля структуры В при токе диода 5 мА и температурах 10 (1), 30 К (2).

описывает замкнутую петлю гистерезиса (рис. 4, 5, кривые 1). Вид кривых, показанных на рис. 4, 5 характерен для магнитопольевых зависимостей намагниченности ферромагнитных слоев GaMnAs с осью легкого намагничивания, лежащей перпендикулярно плоскости слоя [8]. Точка замыкания петли гистерезиса соответствует насыщению намагниченности [8]. Значения степени циркулярной поляризации электролюминесценции для контрольной структуры не превышают ошибки измерений во всем диапазоне магнитных полей [9].

Температурные зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ для структур А и В показаны на рис. 6. В структурах А значение P быстро уменьшается с ростом T и при температурах > 30 К становится сравнимым с погрешностью измерений. При температуре 30 К вид зависимости $P(H)$ изменяется: в исследованном диапазоне магнитных полей отсутствует насыщение, а сама зависимость может быть описана линейной функцией (рис. 4). Для структур В характерна более слабая температурная зависимость степени поляризации, однако с ростом температуры значение P также монотонно уменьшается, достигая значения 0.002 при температуре 300 К (рис. 5). Вид зависимости $P(H)$ во всем диапазоне температур остается нелинейным, что свидетельствует о сохранении ферромагнитных свойств слоя GaMnSb.

4. Обсуждение результатов

Сопоставление полученных результатов с контрольными экспериментами позволяет сделать вывод, что циркулярная поляризация ЭЛ обусловлена спиновой инжекцией носителей из слоя GaMnB^V [10] и излучательной рекомбинацией в активной области. В использованном режиме электрического смещения из слоя GaMnB^V инжектируются спин-поляризованные электроны. Вид кривой $P(H)$ в диодах со спиновой инжекцией определяется магнитопольевой зависимостью намагниченности ферромагнитного инжектора. Наличие петли гистерезиса на

кривой $P(H)$ свидетельствует о существовании компоненты оси легкого намагничивания, направленной перпендикулярно плоскости слоя GaMnSb или GaMnAs [8]. Сравнительно низкое значение степени циркулярной поляризации, вероятно, обусловлено низкой эффективностью спиновой инжекции через гетерограницу с низким кристаллическим качеством [11–13], а также рассеянием по спине инжектированных носителей на примесных центрах сильно легированной области n^{++} -GaAs [1]. Для повышения степени поляризации необходима оптимизация параметров структур, включающая формирование более совершенной гетерограницы, и подбор уровня легирования туннельного барьера аналогично [3].

Температурная зависимость степени циркулярной поляризации определяется ферромагнитными свойствами инжектора, кроме того температурной зависимостью времени спиновой релаксации электронов [1]. Для структур А быстрое уменьшение степени поляризации обусловлено приближением к точке Кюри ферромагнитного GaMnAs, по оценкам температура Кюри составляет 30 К. Это согласуется с линейным характером зависимости $P(H)$ для структуры А, измеренной при 30 К (рис. 4, кривая 2). Для GaMnSb-инжектора температура Кюри, по-видимому, превышает значение 300 К, что подтверждается нелинейным характером зависимости $P(H)$ для структуры В при температуре 300 К (рис. 5). Отсутствие петли гистерезиса в пределах погрешности измерений при 300 К связано с температурной зависимостью ферромагнитных свойств слоя GaMnSb (коэрцитивного поля, остаточной намагниченности). Снижение степени циркулярной поляризации ЭЛ для структур В в диапазоне температур 40–300 К предположительно связано с процессами спиновой релаксации электронов при переносе к активной области.

5. Заключение

Таким образом, в работе проведено сравнительное исследование диодов Зенера на основе гетероструктур InGaAs/ n -GaAs/ n^+ -GaAs/GaMnAs и InGaAs/ n -GaAs/ n^+ -GaAs/GaMnSb. Показано, что конструктивное решение структур позволяет получить сопоставимые интенсивности электролюминесценции и степени циркулярной поляризации ЭЛ для диодов с контактом GaMnAs или GaMnSb. Несколько более высокое значение P для структуры с контактом GaMnAs может быть обусловлено меньшей спиновой релаксацией за счет формирования более совершенной границы раздела [11,12]. Отметим, что ферромагнетизм слоя GaMnSb при 300 К позволяет получить циркулярно-поляризованную люминесценцию диодов на основе GaMnSb при комнатной температуре.

Авторы выражают глубокую признательность Б.Н. Звонкову за выращивание структур для исследований.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания (проекты № 8.1054.2014/К и 3.285.2014/К)

Министерства образования и науки России и при поддержке РФФИ (грант № 15-02-07824_а, РФФИ 14-07-31280 мол_а).

Список литературы

- [1] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, R179 (2007).
- [2] М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, А.В. Здоровейцев, Ю.А. Данилов, А.В. Кудрин. *ФТП*, **46** (12), 1554 (2012).
- [3] P. Van Dorpe, Z. Liu, W. Van Roy, V.F. Motsnyi, M. Sawicki, G. Borghs, J. De Boeck. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3495 (2004).
- [4] E. Johnston-Halperin, D. Lofgreen, R.K. Kawakami, D.K. Young, L. Coldren, A.C. Gossard, D.D. Awschalom. *Phys. Rev. B*, **65**, 041 306 (2002).
- [5] D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, R. Epstein, Y. Kato, D.D. Awschalom. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 275 (2002).
- [6] Ю.А. Данилов, Б.Н. Звонков, А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, С.М. Планкина, В.С. Дунаев, А.В. Нежданов, Ю.Н. Дроздов, М.В. Сапожников. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **76**, 199 (2012).
- [7] 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).
- [8] Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, Ю.Н. Дроздов, А.В. Кудрин, М.В. Сапожников. *ФТТ*, **52** (11), 2124 (2010).
- [9] М.В. Дорохин, Е.И. Малышева, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейцев, Ю.А. Данилов, Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.Ю. Зубков. *ЖТФ*, **84** (12), 102 (2014).
- [10] G. Schmidt. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **38**, R107 (2005).
- [11] P. Barate, S. Liang, T.T. Zhangetal. *Appl. Phys. Lett.*, **105**, 012 404 (2014).
- [12] А.И. Бобров, Е.Д. Павлова, А.В. Кудрин, Н.В. Малехонова. *ФТП*, **47** (12), 1613 (2013).
- [13] J. Li, I. Appelbaum. *Phys. Rev. B*, **84**, 165 318 (2011).

Редактор Л.В. Шаронова

Circularly-polarized electroluminescence of light-emitting diodes InGaAs/GaAs (A^{III} , Mn) B^V on the base of structures with a tunnel barrier

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

* Physico-Technical Research Institute of Nizhny Novgorod

State University named after N.I. Lobachevsky, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The comparative investigation of circularly-polarized electroluminescence in Zener diodes based on InGaAs/ n -GaAs/ n^+ -GaAs/GaMnAs and InGaAs/ n -GaAs/ n^+ -GaAs/GaMnSb was carried out. It was established that the circularly polarized electroluminescence is associated with the spin injection of electrons from a ferromagnetic semiconductor layer. The luminescence parameters are defined by the properties of these layers. It was shown that the room temperature ferromagnetic properties of the GaMnSb layer allow us to obtain circularly-polarized emission at room temperature from InGaAs/ n -GaAs/ n^+ -GaAs/GaMnSb heterostructures.