

07

## Циркулярно поляризованная электролюминесценция при комнатной температуре в гетероструктурах на основе разбавленного магнитного полупроводника GaAs:Fe

© М.В. Ведь, М.В. Дорохин, В.П. Лесников, А.В. Кудрин, П.Б. Дёмина, А.В. Здоровейщев, Ю.А. Данилов

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия  
E-mail: mikhail28ved@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 9 июля 2021 г.

Принято к публикации 13 июля 2021 г.

Показана возможность использования разбавленного магнитного полупроводника GaAs:Fe в качестве ферромагнитного инжектора в спиновом светоизлучающем диоде на основе гетероструктуры с квантовой ямой GaAs/InGaAs. Показано, что в таком приборе возможно наблюдение частично циркулярно поляризованной электролюминесценции при комнатной температуре.

**Ключевые слова:** спиновые светоизлучающие диоды, разбавленные магнитные полупроводники, полупроводники  $A^3B^5$ , спиновая инжекция.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51613.18836

Светоизлучающие диоды с управляемой магнитным полем циркулярной поляризацией электролюминесценции (спиновые светоизлучающие диоды) считаются перспективными элементами современной оптоэлектроники ввиду возможности кодирования оптического излучения посредством его поляризации. Принципы построения таких источников активно разрабатывались начиная с 2000-х годов [1–3]. Основные достижения связаны с получением гетероструктур ферромагнитный металл/полупроводник, в которых многослойные структуры на основе ферромагнитных металлов используются для инжекции спин-поляризованных носителей в полупроводниковую структуру [4]. При этом особенности контакта ферромагнитный металл/полупроводник накладывают строгие ограничения на конструкцию спиновых светоизлучающих диодов (СИД) [1,2,5]. Гораздо большую функциональную гибкость имеют спиновые СИД на основе разбавленных магнитных полупроводников (РМП) [5]. Это материалы, в которых за счет введения магнитных примесей ( $3d$ -переходных металлов) сочетаются магнитные и полупроводниковые свойства [3]. Основное преимущество таких материалов — совместимость с функционирующими в настоящее время полупроводниковыми технологиями [5]. С другой стороны, основным недостатком большинства разбавленных магнитных полупроводников, существенно ограничивающим их применение в настоящее время, является низкая температура Кюри. Наиболее изученным РМП на данный момент является GaAs:Mn. Указанный материал обладает ферромагнитными свойствами до 200 К, а это означает, что рабочая температура устройств спинтроники на его основе также будет ниже 200 К [6]. Исходя из этого задача повышения температуры Кюри разбавленных магнитных полупроводников является

одной из самых актуальных в технологии спиновых светоизлучающих диодов. В последние несколько лет активно проводятся исследования, в которых материалы  $A^3B^5$  легируются атомами Fe для получения РМП типа  $A^3B^5$ :Fe. Так, в работе [7] методом молекулярно-лучевой эпитаксии были получены тонкие слои разбавленного магнитного полупроводника InSb:Fe с содержанием Fe, равным 16%; было показано, что температура Кюри такого материала превышает 300 К. В работе [8] были впервые получены ферромагнитные слои GaAs:Fe с содержанием Fe, равным 20%, температура Кюри в которых также превышает 300 К.

В настоящей работе сообщается о создании и исследовании излучающих свойств спинового светодиода, в котором ферромагнитный слой GaAs:Fe был встроен в структуру в качестве инжектора спин-поляризованных носителей, продемонстрирована эмиссия циркулярно поляризованной электролюминесценции (ЭЛ) в структуре GaAs:Fe/MgO/GaAs.

Изготовление исследуемого образца проводилось в несколько этапов. На первом этапе полупроводниковая часть структуры формировалась методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений в потоке водорода при атмосферном давлении и температуре 600°C. На подложке  $p$ -GaAs были последовательно выращены следующие слои: буферный слой  $p$ -GaAs, слой квантовой ямы  $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ , спейсерный слой  $i$ -GaAs (толщина 120 nm). В середине спейсерного слоя  $i$ -GaAs расположен  $\delta$ -легируемый слой Si. Ранее в работе [9] было показано, что при формировании гетероструктур вида  $A^3B^5$ :Fe/GaAs методом импульсного лазерного осаждения свойства гетерограницы сильно влияют на ЭЛ, а нанесение защитного слоя диэлектрика MgO между GaAs и  $A^3B^5$ :Fe способствует улучшению качества

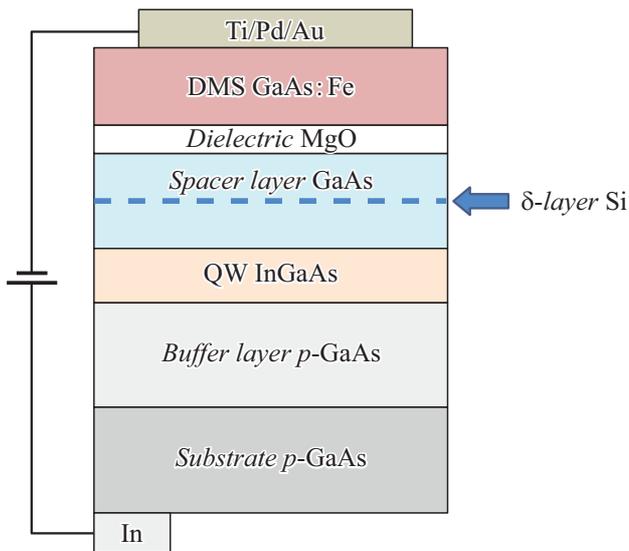


Рис. 1. Схема исследуемого образца.

границы раздела. С учетом этого в данном исследовании на сформированную гетероструктуру также был нанесен защитный слой MgO толщиной 1 nm методом электронно-лучевого испарения. На следующем этапе методом импульсного лазерного осаждения наносился слой GaAs:Fe толщиной 40 nm с содержанием железа 20% при температуре 200°C. Толщина слоев задавалась временем ростового процесса с учетом известной скорости распыления. Скорость распыления для слоев вида GaAs:Fe была определена ранее в работе [8]. Концентрация Fe также задавалась технологическим параметром отношения времен распыления мишеней GaAs и Fe ( $Y_{Fe} = t_{Fe} / (t_{Fe} + t_{GaAs})$ , где  $t_{Fe}$  и  $t_{GaAs}$  — времена распыления соответствующих мишеней [8]). В исследованных структурах концентрация Fe составила 20 at.%.

Следует отметить, что технологические параметры формирования слоев РМП GaAs:Fe, исследованных в настоящей работе, аналогичны технологическим параметрам слоев, сформированных в [8]. В завершение, к структуре формировались омические контакты и с помощью фотолитографии и химического травления создавались меза-структуры диаметром 500 μm. Схема сформированного образца представлена на рис. 1.

Для исследования электролюминесценции и вольт-амперных характеристик на исследуемый образец подавалось прямое смещение (отрицательный потенциал прикладывался к верхнему контакту по отношению к подложке), а излучение регистрировалось со стороны подложки. Когда структура вводится в магнитное поле, направленное перпендикулярно поверхности, излучение становится частично циркулярно поляризованным. Для исследования зависимости циркулярной поляризации от магнитного поля использовалась стандартная схема [3], при этом степень циркулярной поляризации ЭЛ расчи-

тывалась по формуле

$$P_{EL} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $P_{EL}$  — степень циркулярной поляризации ЭЛ,  $I_1$  и  $I_2$  — относительные интенсивности ЭЛ, измеренные для света с левой и правой циркулярной поляризацией соответственно. Измерения вольт-амперных характеристик и степени циркулярной поляризации осуществлялись в криостате замкнутого цикла Janis CCS-300S/202, позволяющем проводить измерения в диапазоне температур 10–300 K.

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики исследуемого образца при различных температурах. Видно, что ВАХ имеют выпрямляющий характер. Ввиду того что для GaAs:Fe характерна электронная проводимость [8], в гетероструктуре, показанной на рис. 1, формируется  $n-p$ -переход. В результате во всем температурном диапазоне зарегистрирован экспоненциальный рост тока диода при полярности напряжения, соответствующего прямому смещению (отрицательный потенциал на GaAs:Fe). В случае обратного смещения ток диода мал и слабо растет с увеличением обратного напряжения. На вставке к рис. 2 приведен спектр ЭЛ исследуемого образца, измеренный при прямом смещении диода и токе диода, равном 10 mA. В спектре наблюдается один доминирующий пик при  $\sim 1.31$  eV, соответствующий основному переходу в квантовой яме  $In_{0.2}Ga_{0.8}As$ .

На рис. 3 показано, что величина степени циркулярной поляризации  $P_{EL}$  для исследуемого образца с инжектором GaAs:Fe нелинейно зависит от магнитного поля. Отметим, что при температурах 10, 50 и 75 K на зависимости  $P_{EL}(B)$  присутствует петля гистерезиса (рис. 3). Величина коэрцитивного поля при температуре 10 K составляет 56 mT, при температуре 50 K — 38 mT, при 75 K — 5 mT. При увеличении темпера-

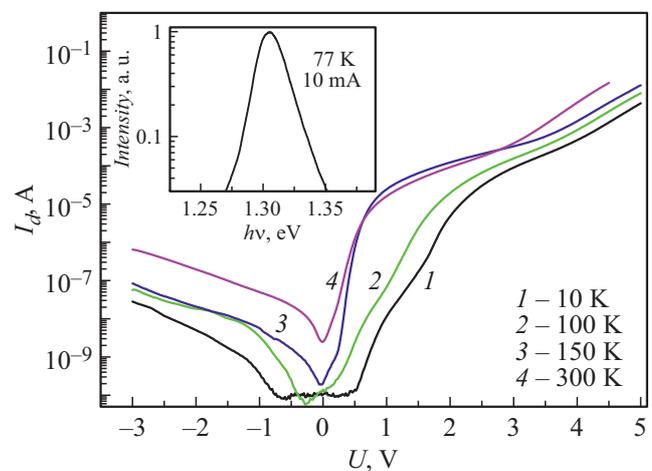
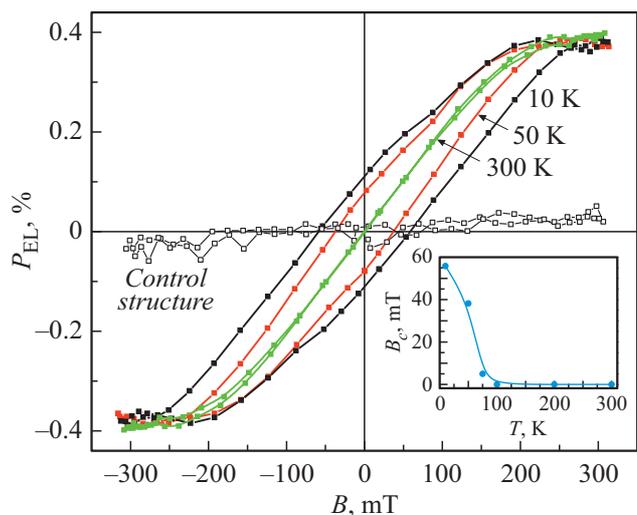


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики исследуемого образца при различных температурах. На вставке показан спектр электролюминесценции.



**Рис. 3.** Магнитооптические зависимости  $P_{EL}$  исследуемого образца при различных температурах, а также контрольной структуры (без инжектора GaAs:Fe) при температуре 10 К. На вставке показана зависимость величины коэрцитивного поля от температуры.

туры выше 75 К петля гистерезиса полностью пропадает. Максимальная величина степени циркулярной поляризации, обусловленная насыщением намагниченности, составила  $\sim 0.4\%$ . Это значение слабо зависит от температуры измерений в диапазоне 10–300 К. Такой вид магнитооптической зависимости степени циркулярной поляризации, вероятно, связан с магнитными свойствами GaAs:Fe и обусловлен инжекцией спин-поляризованных электронов из ферромагнитного инжектора GaAs:Fe. Возможный вклад магнитного циркулярного дихроизма в зарегистрированное значение степени циркулярной поляризации по нашим оценкам составляет не более 0.05%. Оценки выполнены на основании работы [8], в которой было получено именно такое значение магнитного циркулярного дихроизма для энергии кванта  $\sim 1.31$  эВ, соответствующей энергии излучения СИД.

Также были проведены измерения магнитооптической зависимости степени циркулярной поляризации для контрольной структуры (вместо ферромагнитного инжектора GaAs:Fe наносился Al-контакт непосредственно на спейсерный слой GaAs). Из рис. 3 видно, что для контрольной структуры  $P_{EL}$  является линейной функцией магнитного поля (светлые квадраты), а максимальная величина степени циркулярной поляризации не превышает 0.04%. С увеличением температуры интенсивность ЭЛ для исследуемого образца монотонно уменьшается, а величина степени циркулярной поляризации от температуры не зависит. Кроме того, во всем диапазоне температур выход на насыщение магнитооптической зависимости поляризации наблюдался при одинаковых значениях магнитных полей порядка  $\pm 200$  мТ. На основании полученных результатов мы предполагаем, что температура Кюри для ферромагнитного инжектора

GaAs:Fe превышает 300 К. Данный вывод хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в работе [8] для GaAs:Fe с аналогичными параметрами. Отсутствие петли гистерезиса на зависимости  $P_{EL}(B)$  при температурах выше 75 К мы связываем с особенностями магнитной анизотропии сформированных пленок. Для слоев GaAs:Fe, полученных на подложках *i*-GaAs, была выявлена перпендикулярная магнитная анизотропия, связанная с присутствием в слоях колончатой структуры областей с повышенной концентрацией Fe [8]. Поликристаллическая структура слоя РМП наблюдалась в СИД с инжектором InSb:Fe/MgO [10]. В данном исследовании слой GaAs:Fe также наносился на слой MgO, что должно было привести к формированию поликристаллической структуры слоя GaAs:Fe (аналогично данной работе [10]). Как следствие, образования вертикальных Fe-обогащенных колонок, вероятно, не происходит, и магнитная анизотропия слоя РМП определяется анизотропией формы; следовательно, ось легкого намагничивания ориентирована преимущественно в плоскости слоя.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 18-79-10088).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] S.H. Liang, T.T. Zhang, P. Barate, J. Frougier, M. Vidal, P. Renucci, B. Xu, H. Jaffres, J.-M. George, X. Devaux, M. Hehn, X. Marie, S. Mangin, H.X. Yang, A. Hallal, M. Chshiev, T. Amand, H.F. Liu, D.P. Liu, X.F. Han, Z.G. Wang, Y. Lu, *Phys. Rev. B*, **90** (8), 085310 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.085310
- [2] R. Wang, X. Jiang, R.M. Shelby, R.M. Macfarlane, S.S.P. Parkin, S.R. Bank, J.S. Harris, *Appl. Phys. Lett.*, **86** (5), 052901 (2005). DOI: 10.1063/1.1787896
- [3] M. Holub, P. Bhattacharya, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40** (11), R179 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/11/R01
- [4] N. Gerhardt, S. Hövel, C. Brenner, M. Hofmann, *J. Appl. Phys.*, **99** (7), 073907 (2006). DOI: 10.1063/1.2186376
- [5] D.K. Young, J.A. Gupta, E. Johnston-Halperin, R. Epstein, Y. Kato, D.D. Awschalom, *Semicond. Sci. Technol.*, **17** (4), 275 (2002). DOI: 10.1088/0268-1242/17/4/301
- [6] L. Chen, X. Yang, F. Yang, J. Zhao, J. Misuraca, P. Xiong, S.V. Molnár, *Nano Lett.*, **11** (7), 2584 (2011). DOI: 10.1021/nl201187m
- [7] N.T. Tu, P.N. Hai, L.D. Anh, M. Tanaka, *Appl. Phys. Express*, **11** (6), 063005 (2018). DOI: 10.7567/APEX.11.063005
- [8] A.V. Kudrin, V.P. Lesnikov, Yu.A. Danilov, M.V. Dorokhin, O.V. Vikhrova, P.B. Demina, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, V.E. Milin, Yu.M. Kuznetsov, R.N. Kriukov, A.A. Konakov, N.Yu. Tabachkova, *Semicond. Sci. Technol.*, **35** (12), 125032 (2020). DOI: 10.1088/1361-6641/abbd5c

- [9] M.V. Ved, M.V. Dorokhin, V.P. Lesnikov, A.V. Zdoroveyshchev, Yu.A. Danilov, P.B. Demina, A.V. Kudrin, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1410**, 012053 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1410/1/012053
- [10] М.В. Ведь, М.В. Дорохин, В.П. Лесников, А.В. Кудрин, П.Б. Дёмина, А.В. Здравейщев, Д.А. Павлов, Ю.В. Усов, В.Е. Милин, Ю.А. Данилов, *Письма в ЖТФ*, **46** (14), 17 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.14.49660.18313 [M.V. Ved, M.V. Dorokhin, V.P. Lesnikov, A.V. Kudrin, P.B. Demina, A.V. Zdoroveyshchev, D.A. Pavlov, Yu.V. Usov, V.E. Milin, Yu.A. Danilov, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (7), 691 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020070299].