

07

Влияние ферромагнитного дельта-слоя Mn на излучательные свойства гетероструктур GaAsSb/GaAs и InGaAs/GaAsSb/GaAs

© О.В. Вихрова, М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, Б.Н. Звонков,
А.В. Здоровейщев, Ю.А. Данилов, И.Л. Калентьева

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

Поступило в Редакцию 22 мая 2014 г.

Исследованы излучательные характеристики и циркулярно-поляризованная электролюминесценция светоизлучающих диодов на основе гетероструктур с одиночной (GaAs/GaAsSb/GaAs) или двухслойной (GaAs/InGaAs/GaAsSb/GaAs) квантовой ямой и дельта-слоем Mn в барьере GaAs. Впервые обнаружено и исследовано ферромагнитное воздействие дельта-слоя марганца на спиновую поляризацию носителей в квантовых ямах на основе гетероструктур II рода. Для описания исследованных явлений использована модель обменного взаимодействия ионов Mn в барьере и дырок в квантовой яме.

Эффект близости в гибридных структурах ферромагнетик/полупроводник заключается в воздействии ферромагнитного слоя на спиновую поляризацию носителей в прилегающих слоях полупроводника. Исследование такого воздействия представляет фундаментальный интерес и имеет ряд практических приложений (спиновый светоизлучающий диод и спиновый полевой транзистор) [1–3]. Значительное внимание уделяется гетероструктурам на основе полупроводников A_3B_5 , содержащим дельта-легированные Mn ферромагнитные слои [3–5]. В частности, в [4,5] показано, что введение дельта-слоя Mn вблизи активной области светоизлучающего диода (квантовой ямы InGaAs/GaAs) применяется для создания структур, генерирующих циркулярно-поляризованное электролюминесцентное излучение. Фундаментальным явлением в структурах на основе эффекта близости является взаимодействие ионов Mn в ферромагнитном дельта-слое и носителей в квантовой яме, приводящее к спиновой поляризации последних [3–5]. В данной

работе приводятся результаты исследований гетероструктур с одиночной квантовой ямой GaAsSb/GaAs и с двухслойной квантовой ямой GaAs/InGaAs/GaAsSb, содержащих ферромагнитный дельта-слой Mn в барьере GaAs. Использование наноразмерного слоя GaAsSb позволяет сместить спектр излучения в область больших длин волн, в том числе до практически важной длины волны $1.3 \mu\text{m}$ [4–6]. Кроме того, более глубокий ограничивающий потенциал для дырок в гетеропереходе GaAsSb/GaAs повышает температурную стабильность излучательных свойств.

Структуры для исследований были изготовлены на подложках *n*-GaAs (001) комбинированным методом эпитаксиального выращивания. На первой стадии методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении и температуре 600°C были выращены: буферный слой GaAs толщиной $0.4 \mu\text{m}$, легированный Si до концентрации 10^{17}cm^{-3} , квантовая яма (КЯ) и слой нелегированного GaAs толщиной 4 nm. Были изготовлены образцы 2 типов: с одиночной квантовой ямой GaAs/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (структуры типа А, ширина КЯ составляла 10 nm) либо с двухслойной квантовой ямой (ДКЯ) GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (структуры типа В, толщина слоев 5 и 8 nm соответственно), причем слой In_{0.15}Ga_{0.85}As расположен ближе к поверхности образца [7]. Далее в том же реакторе при температуре 400°C посредством лазерного распыления мишеней Mn и GaAs формировались дельта-легированный Mn слой и покровный слой GaAs. Номинальная концентрация Mn в дельта-легированном слое GaAs составила 0.3 монослоя. Аналогичным образом были изготовлены контрольные образцы, не содержащие дельта-слоя марганца. Ферромагнитные свойства одиночных дельта-слоев Mn в матрице GaAs, сформированных по идентичной технологии, были исследованы ранее [8]. Изготовление светоизлучающих диодов включало в себя формирование металлического (Au) контакта методом электронно-лучевого испарения в вакууме, получение мезоструктур диаметром $500 \mu\text{m}$ с применением фотолитографии и химического травления и создание омического контакта к подложке GaAs искровым вжиганием оловянной фольги. На изготовленных диодах были проведены исследования электролюминесценции (ЭЛ) и циркулярной поляризации ЭЛ в интервале температур от 10 до 77 K с использованием криостата замкнутого цикла. Спектры ЭЛ измерялись в режиме прямого смещения диодов. Магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ исследовались при

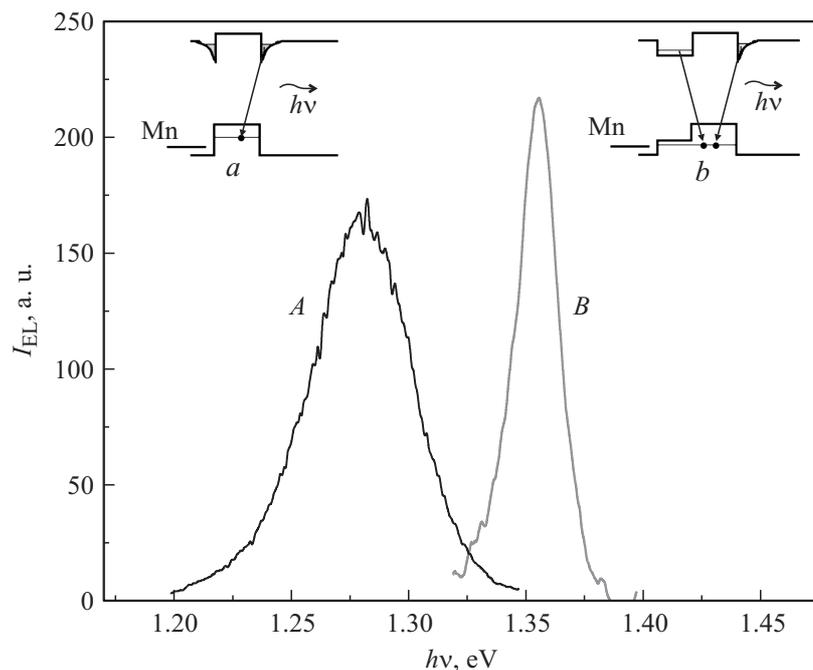


Рис. 1. Спектры электролюминесценции исследованных структур с квантовой ямой GaAs/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (спектр A) и двухслойной квантовой ямой GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (спектр B), измеренные при температуре 10 K и токе диода 10 mA. На вставках a и b изображены соответствующие зонные диаграммы структур.

помещении образцов в магнитное поле электромагнита, направленное перпендикулярно поверхности структуры (геометрия Фарадея). Величина магнитного поля варьировалась от 0 до ± 3500 Oe. Значение степени циркулярной поляризации электролюминесценции оценивалось по формуле

$$P_{EL} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-), \quad (1)$$

где I_+ (I_-) — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией, полученные путем интегрирования части спектра излучения, отвечающей пику, связанному с переходами в КЯ. Фотолюминесцентные свой-

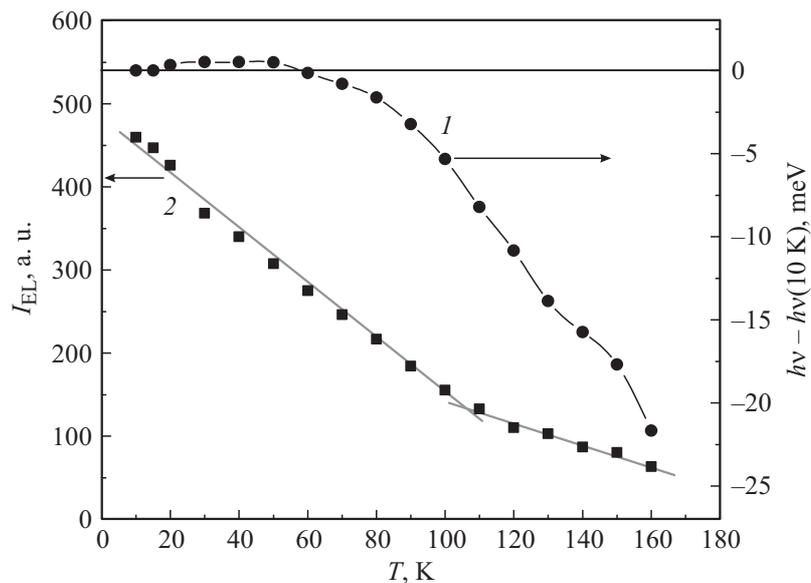


Рис. 2. Температурные зависимости интегральной интенсивности электролюминесценции (кривая 2) и относительного смещения пика электролюминесценции (кривая 1), измеренные для структуры с квантовой ямой GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs при токе диода 10 мА.

ства структур исследовались в зависимости от мощности накачки (P_W) твердотельного лазера с диодной накачкой (532 nm) при 10 K.

На рис. 1 показаны спектры ЭЛ диодов с активной областью, содержащей КЯ GaAs/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (A) и ДКЯ GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (B). Спектры содержат пики при энергиях 1.28 eV (A) и 1.36 eV (B), соответствующие излучательным переходам в квантовом-размерном слое. В обоих случаях исследование зависимости фотолуминесцентных характеристик от мощности оптической накачки выявило характерное для непрямых переходов смещение в область больших энергий, величина которого пропорциональна $P_W^{1/3}$ [9].

Для структуры B с целью более точной интерпретации пика в области 1.36 eV были проведены измерения температурных зависимостей интенсивности ЭЛ и энергии перехода (рис. 2). Зависимость энергии

перехода от температуры (рис. 2, кривая 1) является немонотонной и имеет максимум при 35–50 К. Подобное поведение также характерно для непрямых переходов в структурах, содержащих квантово-размерные слои GaAsSb [6,7]. Температурная зависимость интегральной интенсивности ЭЛ (рис. 2, кривая 2) также имеет особенность — точку перегиба вблизи 100 К, которая может быть обусловлена влиянием на люминесценцию прямых межзонных переходов в GaAsSb при повышении температуры измерений в соответствии с данными работы [10]. Таким образом, пик в области 1.36 eV, показанный на рис. 1, может быть отнесен к переходам с участием дырок, локализованных в слое GaAs_{0.8}Sb_{0.2}.

При введении диодов в магнитное поле (при температуре 10 К) ЭЛ-излучение становится циркулярно-поляризованным. Зависимость степени циркулярной поляризации (рассчитанной по формуле (1)) от величины магнитного поля (H) показана на рис. 3. Для структуры *A* с ростом величины магнитного поля значение P_{EL} увеличивается и в поле ~ 1000 Oe выходит на насыщение. Величина P_{EL} в насыщении не превышает 0.001. Для структуры *B* зависимость $P_{EL}(H)$ подобна кривой *A*, но с обратным знаком. Наибольшее значение степени поляризации по абсолютной величине составило 0.015. Вид магнитопольевой зависимости P_{EL} , подобный показанным на рис. 3 (структуры *A* и *B*), характерен для намагниченности (и магнитных характеристик) ферромагнитного дельта-слоя Mn [8]. Отметим, что для контрольных структур в тех же условиях эксперимента, значение P_{EL} было равно нулю с точностью до погрешности измерений.

Полученные результаты могут быть описаны с точки зрения механизма обменного взаимодействия ионов Mn и дырок в квантовой яме, рассмотренного ранее [4,5]. Такое обменное взаимодействие приводит к спиновой поляризации дырок в КЯ. Рекомбинация носителей в соответствии со схемами, показанными на вставке рис. 1, сопровождается циркулярно-поляризованным излучением. По-видимому, выводы о влиянии дельта-слоя Mn на поляризацию носителей в КЯ InGaAs/GaAs, сделанные в работах [5,11], могут быть применены и в случае квантово-размерных структур, содержащих слои GaAsSb. Сравнительно низкое значение P_{EL} (по отношению к структурам с КЯ InGaAs/GaAs [5,11]), вероятно, обусловлено более значительным несовпадением примесной зоны в тонком слое GaAs, легированном Mn, и положением уровня дырок в квантовой яме GaAs_{0.8}Sb_{0.2} (вставка рис. 1). Указанное предполо-

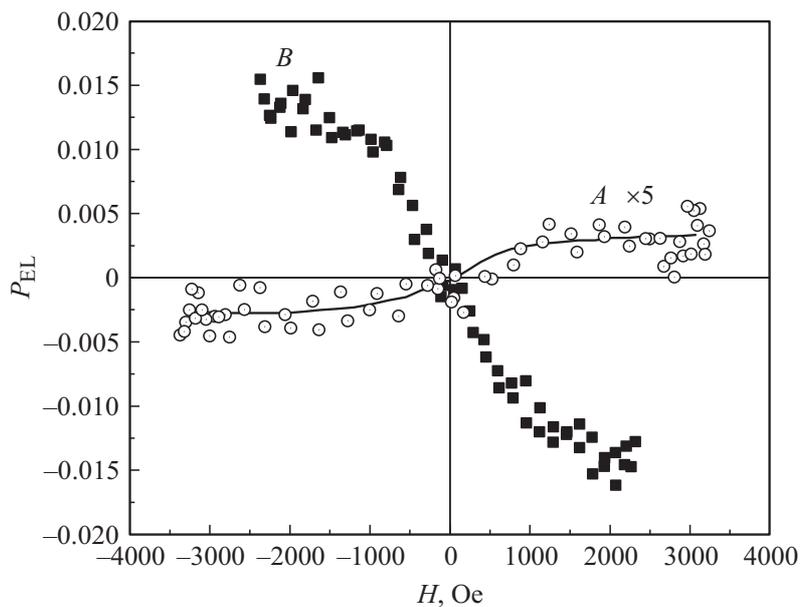


Рис. 3. Зависимости степени циркулярной поляризации от магнитного поля структур с квантовой ямой GaAs/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (кривая A) и двухслойной квантовой ямой GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs (кривая B), измеренные при температуре 10 К и токе диода 10 мА. Значения степени поляризации для структуры A умножены на 5.

жение согласуется с представленными в работе [11] зависимостями степени циркулярной поляризации от энергии перехода в КЯ InGaAs/GaAs. В структурах с ДКЯ GaAs/In_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs_{0.8}Sb_{0.2}/GaAs введение слоя In_{0.15}Ga_{0.85}As привело к повышению энергии излучения (рис. 1, пик B) и увеличению P_{EL} более чем в 10 раз. Кроме того, наблюдалось изменение знака циркулярной поляризации с положительного на отрицательный, что требует дополнительного исследования и обсуждения. По нашему мнению, вероятной причиной смены знака поляризации является изменение вида обменного взаимодействия ионов Mn и дырок в КЯ с антиферромагнитного на ферромагнитное. Подобный эффект исследовался авторами [12] для структур GaMnAs/GaAs/GaMnAs.

Необходимо отметить существование альтернативной модели, описывающей циркулярно-поляризованную эмиссию в структурах, подобных исследованным. Согласно [13], циркулярно-поляризованная люминесценция в КЯ InGaAs обусловлена спиновой поляризацией электронов, появляющейся в результате спин-зависимой безызлучательной рекомбинации электронов с участием состояний, образованных примесными центрами Mn в запрещенной зоне GaAs. Привлечение модели обменного взаимодействия дырок и ионов Mn для объяснения результатов данной работы связано с наблюдаемой сменой знака циркулярной поляризации, что затруднительно объяснить в рамках модели спин-зависимой безызлучательной рекомбинации электронов. Для более точной интерпретации представленных результатов необходимо проведение измерений люминесценции с разрешением по времени аналогично [13].

Таким образом, в работе впервые показано ферромагнитное воздействие дельта-слоя Mn на спиновую поляризацию носителей в одиночной КЯ на основе гетероструктур II рода GaAs/GaAsSb/GaAs, проявляющееся в наличии циркулярно-поляризованного излучения. Введение слоя InGaAs между дельта-слоем Mn и наноразмерным слоем GaAsSb (двухслойная КЯ GaAs/InGaAs/GaAsSb/GaAs) позволило существенно повысить степень циркулярной поляризации ЭЛ. Для объяснения полученных результатов использована модель обменного взаимодействия ионов Mn в дельта-слое и дырок в КЯ.

Работа выполнялась в рамках реализации государственного задания (№ 8.1054.2014/К) Минобрнауки России, а также при финансовой поддержке РФФИ (13-07-00982а, 13-02-97140-рег_Поволжье) и гранта президента РФ (МК-2708.2013.2).

Список литературы

- [1] Holub M., Bhattacharya P. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. R179.
- [2] Захарченя Б.П., Корнев В.Л. // УФН. 2005. Т. 175. С. 629.
- [3] Nazmul A.M., Atefya T., Shuto Y., Sugahara S., Tanaka M. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. P. 017 201.
- [4] Зайцев С.В., Дорохин М.В., Бричкин А.С., Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Звонков Б.Н., Кулаковский В.Д. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. С. 730.
- [5] Dorokhin M.V., Danilov Yu.A., Demina P.B., Kulakovskii V.D., Vikhrova O.V., Zaitsev S.V., Zvonkov B.N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 245 110.

- [6] Lourenso S.A., Dias I.F.L., Duarte J.L., Laureto E., Aquino V.M., Harmand J.C. //Brazilian J. Physics. 2007. V. 37. P. 1212.
- [7] Morozov S.V., Kryzhkov D.I., Yablonsky A.N., Aleshkin V.Ya., Krasilnik Z.F., Zvonkov B.N., Vikhrova O.V. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. P. 021 108.
- [8] Вихрова О.В., Данилов Ю.А., Дорохин М.В., Звонков Б.Н., Калентьева И.Л., Кудрин А.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 14. С. 8.
- [9] Ledentsov N.N., Bohrer J., Beer M., Heinrichsdorff F., Grundmann M., Bimberg D., Ivanov S.V., Meltser B.Ya., Shaposhnikov S.V., Yassievich I.N., Faleev N.N., Kor'ev P.S., Alferov Zh.I. // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 14 058.
- [10] Звонков Б.Н., Некоркин С.М., Вихрова О.В., Дикарева Н.В. // ФТП. 2013. Т. 47. С. 1231.
- [11] Прокофьева М.М., Дорохин М.В., Данилов Ю.А., Малышева Е.И., Кудрин А.В., Калентьева И.Л., Вихрова О.В., Звонков Б.Н. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2012. Т. 76. С. 255.
- [12] Chung S., Lee S., Chung J.-H., Yoo T., Lee H., Kirby B., Liu X., Furdyna J.K. // Phys. Rev. B. 2010. V. 82. P. 054 420.
- [13] Korenev V.L., Akimov I.A., Zaitsev S.V., Sapega V.F., Langer L., Yakovlev D.R., Danilov Yu.A., Bayer M. / Nature Commun. 2012. V. 3. P. 959.