

07.4;08.3

Дальнодействующее магнитное взаимодействие в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ -〈Mn〉

© М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, Е.И. Малышева, А.В. Кудрин, М.В. Ведь, А.В. Здоровейцев

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

Поступило в Редакцию 10 октября 2019 г.

В окончательной редакции 24 октября 2019 г.

Принято к публикации 24 октября 2019 г.

Исследована низкотемпературная циркулярно поляризованная электролюминесценция в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ -〈Mn〉. Установлено, что степень циркулярной поляризации слабо зависит от величины пространственного разнесения активной области и магнитного слоя и сохраняется даже при толщине спейсерного слоя, равной 12 nm. Полученный эффект связывается с дальнодействующим взаимодействием носителей заряда и ионов Mn.

Ключевые слова: разбавленные магнитные полупроводники, циркулярная поляризация, гетероструктуры, обменное взаимодействие.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.02.48952.18069

Спин-зависимые эффекты в полупроводниковых структурах представляют как фундаментальный, так и практический научный интерес — в приборах, использующих спин как основу для выполнения функций радиоэлектронной аппаратуры [1]. В основе большинства спин-зависимых эффектов лежит создание в материале ансамбля спин-поляризованных носителей заряда. Эта задача сохраняет актуальность, так как способ создания спиновой поляризации определяет конфигурацию спинтронного прибора [1,2]. Известными вариантами решения данной задачи являются инжекция спин-поляризованных носителей из ферромагнитного (ФМ) электрода [1,2] и поляризация по спину за счет сильного легирования полупроводника атомами переходных элементов [3]. Альтернативным способом является спиновая поляризация носителей заряда за счет взаимодействия с близкорасположенным ФМ-слоем [4–6]. Преимущество этого способа по сравнению с инжекцией заключается в отсутствии спиновой релаксации, а по сравнению с сильным легированием — в сохранении высокой подвижности носителей, так как магнитные рассеивающие центры удалены от активной области.

Известно несколько систем, обеспечивающих спиновую поляризацию носителей в полупроводнике за счет взаимодействия с ферромагнетиком [4–8]. Изначально считалось [4], что взаимодействие имеет обменную природу. Впоследствии для ряда структур обсуждались и другие механизмы спиновой поляризации [7,8]. В недавней работе [8] было показано, что взаимодействие может быть дальнодействующим с характерной длиной выше 30 nm. Полученный в [8] результат представляется чрезвычайно важным, поскольку разделение носителей заряда и магнитного слоя позволяет минимизировать

влияние последнего на транспортные и оптические характеристики.

Эффект, полученный в [8], наблюдался на гетероструктуре CdTe/(Cd,Mg)Te с близкорасположенным Co-контактом. В настоящей работе показана возможность получения дальнодействующего магнитного взаимодействия в еще одной системе пространственно разделенных носителей заряда и магнитного слоя: в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ -〈Mn〉. Для указанных структур ранее было продемонстрировано наличие спиновой поляризации носителей заряда, локализованных в квантовой яме InGaAs, связанной с взаимодействием с близкорасположенным ферромагнитным слоем δ -〈Mn〉. При должном выборе технологических параметров могут быть сформированы структуры, для которых величина спиновой поляризации (аналогично [8]) слабо зависит от расстояния между областью локализации носителей и ФМ-слоем. Задачей настоящей работы является выбор параметров указанных выше структур (содержание Mn, температура роста), которые обеспечивают сохранение спиновой поляризации при наибольшем возможном пространственном разнесении δ -〈Mn〉 и квантовой ямы InGaAs.

Структуры сформированы на подложках *n*-GaAs комбинированным методом МОС-гидридной эпитаксии (МОС — металлоорганические соединения) и импульсного лазерного осаждения. При температуре 650°C последовательно выращивались буферный слой *n*-GaAs, квантовая яма (КЯ) InGaAs, нелегированный спейсерный слой GaAs (толщиной 2–15 nm). На следующем этапе при 400°C методом импульсного лазерного осаждения формировались δ -слой Mn и покровный слой GaAs. Содержание Mn в δ -слое, рассчитанное по технологическим параметрам, составило $\sim 10^{14}$ cm⁻². Деталь-

но технология исследованных структур описана в [6,7]. Варьируемым параметром в настоящей работе являлась толщина спейсерного слоя GaAs (d_s). На сформированных структурах были исследованы магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации фото- и электролюминесценции (ФЛ и ЭЛ соответственно). Магнитное поле было направлено перпендикулярно поверхности структур. Значение степени поляризации рассчитывалось по формуле

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

где $I_{EL,PL}$ — интенсивности ЭЛ и ФЛ, I_{σ^+} , I_{σ^-} — интенсивности компонент люминесценции, поляризованных по левому и правому кругу соответственно.

Для исследований ЭЛ на образцах были сформированы Au-контакты методом электронно-лучевого испарения в вакууме. Методами фотолитографии и химического травления были изготовлены меза-структуры диаметром 500 μm . Контакт к подложке n -GaAs формировался искровым вжиганием Sn-фольги. Таким образом, формировались светоизлучающие диоды аналогично [6] (вставка *a* на рис. 1).

На измеренных спектрах ЭЛ (вставка *b* на рис. 1) виден пик при энергии ~ 1.385 eV, соответствующий основному переходу в КЯ с заданным содержанием Mn. В магнитном поле излучение становится частично циркулярно поляризованным. Зависимость степени поляризации от магнитного поля (рис. 1) подобна магнитопольевой зависимости намагниченности [6,7,9,10]. Насыщение

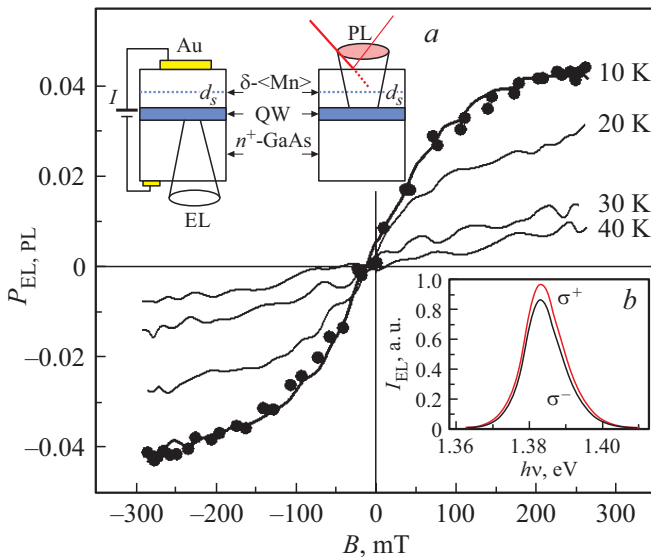


Рис. 1. Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции (линии) и фотолюминесценции (точки), измеренные при различных температурах, для структуры с толщиной спейсерного слоя $d_s = 8$ nm. На вставке *a* показаны схемы структур при исследовании электро- (слева) и фотолюминесценции (справа), на вставке *b* — спектры электролюминесценции той же структуры, записанные в σ^+ - и σ^- -поляризациях при температуре 10 K.

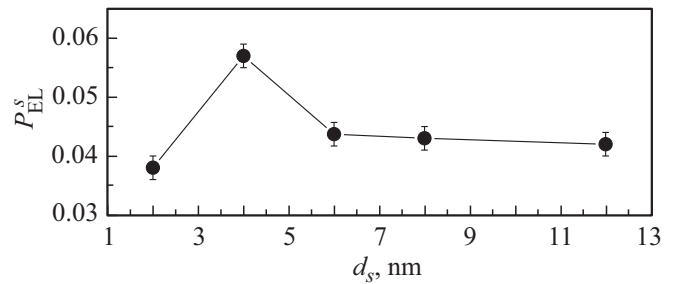


Рис. 2. Зависимость от толщины спейсерного слоя GaAs степени циркулярной поляризации ЭЛ, измеренной в магнитном поле 250 мТ (в области насыщения намагниченности δ - $\langle\text{Mn}\rangle$) при температуре 10 K.

P_{EL} в поле ~ 100 мТ соответствует насыщению намагниченности δ - $\langle\text{Mn}\rangle$ -слоя. Величина поляризации в области насыщения (P_{EL}^s) зависит от параметров структур, что обсуждалось ранее в [9]. Для структур, исследованных в настоящей работе, построена зависимость P_{EL}^s от варьируемого параметра — толщины слоя GaAs, разделяющего КЯ и δ - $\langle\text{Mn}\rangle$ (рис. 2). Видно, что значение P_{EL}^s слабо зависит от толщины спейсерного слоя и является немонотонной функцией этого параметра. Полученный результат не согласуется с моделями поляризации в системах ферромагнетик/полупроводник, основанными на обменном взаимодействии, для которых характерен экспоненциальный спад поляризации при увеличении d_s [4,6]. В то же время для гетероструктур InGaAs/GaAs с δ - $\langle\text{Mn}\rangle$ -слоем возможность сохранения спиновой поляризации в КЯ при толщине спейсерного слоя GaAs до 10 nm уже была ранее показана в [10]. В настоящей работе в отличие от [10] выявлена слабая зависимость $P_{EL}^s(d_s)$, что связывается с различием технологических параметров структур (содержания Mn, толщины покровного слоя).

Рассмотрим возможные механизмы полученного эффекта. Из литературы известен ряд моделей, объясняющих природу циркулярно поляризованной люминесценции в структурах, подобных исследованным. К ним относятся: 1) поляризация в результате спиновой инжекции [2]; 2) взаимодействие носителей в квантовой яме с ФМ-слоем [5–10]; 3) магнитный циркулярный дихроизм (МЦД), который заключается в поляризации света при его отражении от ФМ-слоя или прохождении через ФМ-слой [11].

Вклад спиновой инжекции в циркулярную поляризацию можно оценить путем сопоставления значений степени поляризации для фото- и электролюминесценции. Циркулярная поляризация фотолюминесценции не может быть обусловлена спиновой инжекцией [2]. Как видно из рис. 1, $P_{EL} = P_{PL}$ во всем диапазоне магнитных полей. Это согласуется и с предыдущими исследованиями подобных структур [6,9,10]. Таким образом, первый механизм может быть исключен из рассмотрения.

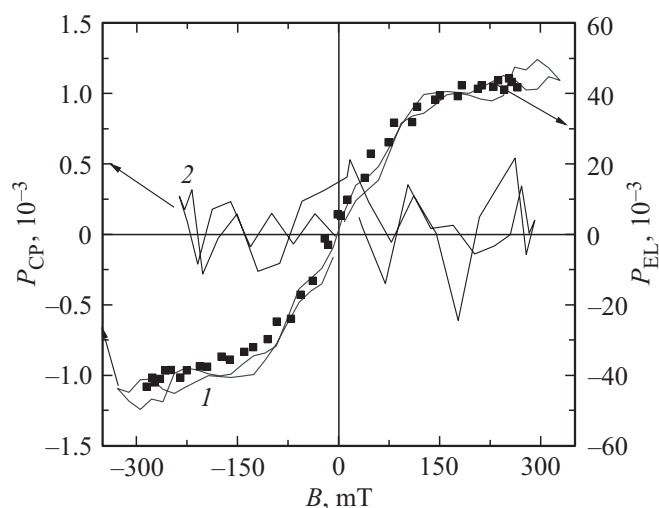


Рис. 3. Магнитополевые зависимости степени циркулярной поляризации неполяризованного света, отраженного от лицевой поверхности намагниченной структуры (линии), и степени циркулярной поляризации ЭЛ той же структуры (точки). Длина волны отраженного неполяризованного света составила 800 (1) и 900 nm (2). Температура измерений 10 К.

Вклад МЦД в поляризацию может вноситься в геометрии измерений ЭЛ за счет отражения излучения квантовой ямы от δ -(Mn) и прохождения через δ -(Mn) света, отраженного от верхней грани структуры (вставка *a* на рис. 1). Для учета спин-зависимого отражения были выполнены измерения степени циркулярной поляризации, возникающей у неполяризованного света после его отражения от намагниченной структуры, содержащей δ -(Mn)-слой (рис. 3). Значение степени поляризации отраженного исходно неполяризованного света (P_{CP}) сильно зависит от длины волны, но даже наибольшее значение эффекта (на длине волны 800 nm) не превышает $P_{CP} = 0.001$. Для длины волны, соответствующей излучению исследуемой структуры (900 nm), полученное значение ниже погрешности измерений. Поляризация в результате прохождения света через δ -(Mn)-слой не превышает величины 0.005 [7]. Таким образом, даже при суммировании двух эффектов величина поляризации за счет МЦД значительно ниже, чем наблюдаемое в эксперименте значение, что позволяет пренебречь эффектом МЦД при анализе циркулярно поляризованного излучения.

Таким образом, единственным известным механизмом, обуславливающим наблюдаемую в эксперименте поляризацию, является взаимодействие δ -(Mn)-слоя с носителями заряда. В литературе обсуждалось два базовых механизма взаимодействия: динамическая поляризация, связанная со спин-зависимым уходом электронов из квантовой ямы InGaAs [7], и поляризация, обусловленная обменным взаимодействием между ионами Mn и дырками в квантовой яме [6,10,11]. Для каждого из указанных механизмов были представлены экспери-

ментальные подтверждения. В первом случае отметим результаты исследований временной зависимости P_{PL} при введении структур в магнитное поле. Взаимодействие дырок с ионами Mn обсуждалось в работе [12], где была рассмотрена ориентация спинов Mn фотовозбужденными спин-поляризованными дырками. Отметим также работу [13], в которой на аналогичных структурах наблюдалась инверсия знака циркулярной поляризации, что затруднительно объяснить в рамках динамической модели. Вероятно, вклад каждого из рассмотренных механизмов в циркулярную поляризацию зависит от параметров структур; сильная зависимость свойств от технологических параметров показана нами ранее [10].

Экспериментальные результаты, обсуждаемые в настоящей работе, можно сопоставить с данными [8], где рассматривалась модель обменного взаимодействия. В [8] аналогичным образом показана слабая зависимость спиновой поляризации от расстояния между ферромагнитным слоем и областью полупроводника, в которой локализованы носители заряда. Мы предполагаем, что эффект, полученный в настоящей работе (рис. 2), аналогичен эффекту [8] и также может быть объяснен с точки зрения модели непрямого обменного взаимодействия посредством оптических фононов, имеющих эллиптическую поляризацию после прохождения через ФМ-слой. Отметим, что толщина области δ -(Mn)-легирования с учетом диффузионного размытия составляет около 5 nm [6,11], что совпадает с толщиной магнитного слоя (Co), исследованного в [8].

Таким образом, в работе показано дальнедействующее магнитное взаимодействие в гетероструктурах InGaAs/GaAs/ δ -(Mn). Данный эффект обуславливает спиновую поляризацию носителей в квантовой яме InGaAs и наблюдается при пространственном разнесении активной области магнитного слоя на величину до 12 nm. Слабая зависимость степени поляризации от расстояния d_s позволяет предположить, что характерная длина взаимодействия значительно превышает 12 nm.

Благодарности

Авторы выражают признательность Б.Н. Звонкову (НИФТИ ННГУ) за формирование образцов для исследований.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-1708.2019.2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Lu J.W., Chen E., Kabir M., Stan M.R., Wolf S.A. // *Int. Mater. Rev.* 2016. V. 61. P. 456–472.
- [2] Holub M., Bhattacharya P. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. R179–R203.
- [3] Буравлёв А.Д., Неведомский В.Н., Убийвовк Е.В., Сапега В.Ф., Хребтов А.И., Самсоненко Ю.Б., Цырлин Г.Э., Устинов В.М. // *ФТП.* 2013. Т. 47. В. 8. С. 1033–1036.
- [4] Захарченя Б.П., Корнев В.Л. // *УФН.* 2005. Т. 175. № 6. С. 629–635.
- [5] Myers R.C., Gossard A.C., Awschalom D.D. // *Phys. Rev. B.* 2004. V. 69. P. 161305(R).
- [6] 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. В. 10. С. 730–735.
- [7] 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 (1–7).
- [8] Korenev V.L., Salewski M., Akimov I.A., Sapega V.F., Langer L., Kalitukha I.V., Debus J., Dzhioev R.I., Yakovlev D.R., Muller D., Schroder C., Hovel H., Karczewski G., Wiater M., Wojtowicz T., Kusrayev Yu.G., Bayer M. // *Nature Phys.* 2016. V. 12. P. 85–91.
- [9] Рыков А.В., Дорохин М.В., Мальшиева Е.И., Демина П.Б., Вихрова О.В., Здоровейцев А.В. // *ФТП.* 2017. Т. 50. В. 1. С. 3–8.
- [10] 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. 245110.
- [11] Дорохин М.В., Демина П.Б., Буданов А.В., Власов Ю.Н., Котов Г.И., Здоровейцев А.В., Трушин В.Н., Звонков Б.Н. // *Письма в ЖТФ.* 2019. Т. 45. В. 5. С. 52–55.
- [12] Moraes F.C.D., Ullah S., Balanta M.A.G., Iikawa F., Danilov Y.A., Dorokhin M.V., Vikhrova O.V., Zvonkov B.N., Hernandez F.G.G. // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 7294.
- [13] Dorokhin M.V., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Gonzalez Balanta M.A., Brasil M.J.S.P., Iikawa F., Mendes U.C., Brum J.A., Demina P.B., Malysheva E.I., Zdoroveyshev A.V., Kudrin A.V. // *Appl. Phys. Lett.* 2015. V. 107. P. 042406.