

УДК 537.622.4:621.318.122

## ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ InGaAs/GaAs/CoPt

© 2023 г. С. В. Зайцев\*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*E-mail: szaitsev@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

В структуре GaAs/InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1 нм)/CoPt с узким спейсером GaAs толщиной  $d_S = 5$  нм наблюдается ферромагнитное влияние тонкого (~8 нм) слоя CoPt на циркулярную поляризацию фотolumинесценции квантовой ямы InGaAs/GaAs, при этом электролюминесценция поляризована для всех  $d_S = 5–100$  нм. Короткодействующий характер эффекта близости связывается с туннельной связью электронов квантовой ямы с ферромагнитным слоем CoPt.

DOI: 10.31857/S0367676522700399, EDN: AESWOU

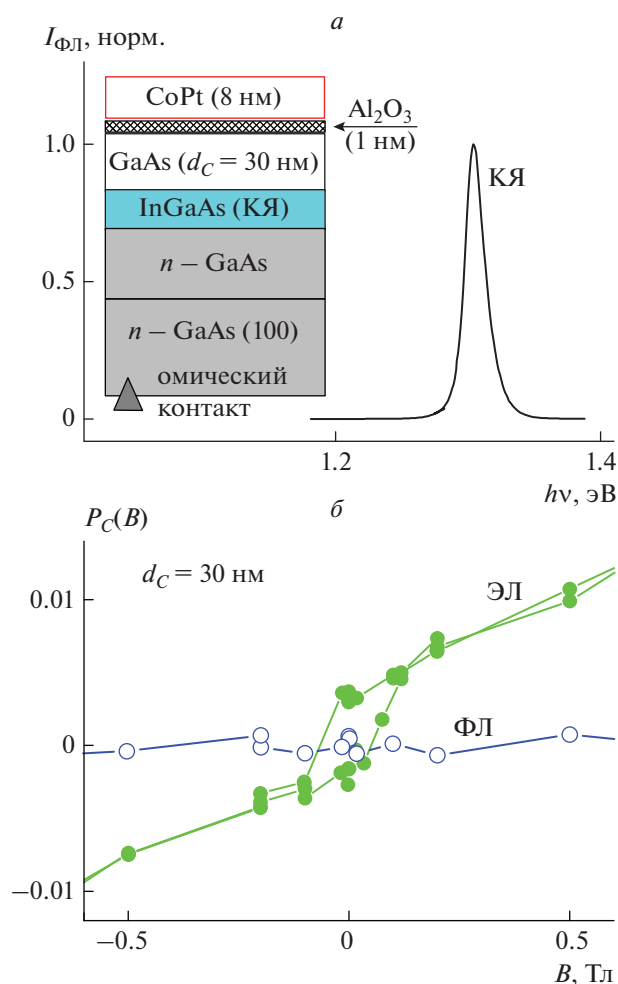
### ВВЕДЕНИЕ

Открытие ферромагнитных (ФМ) полупроводников  $p$ -типа  $In_{1-x}Mn_xAs$  и  $Ga_{1-x}Mn_xAs$  стимулировало исследования интеграции магнетизма в полупроводниковую электронику [1]. Однако в таких полупроводниках происходит полное гашение межзонной люминесценции магнитными ионами или дефектами, с ними связанными [1]. Эти трудности сместили фокус исследований к низкоразмерным гетероструктурам, в которых ФМ слой и квантовая яма (КЯ) разделены туннельно-прозрачным спейсером толщиной  $d_C = 2–10$  нм, и в которых температура Кюри  $T_C$  может достигать ~200 К благодаря сильному перекрытию носителей (дырок) высокой плотности с ФМ слоем [2]. С одной стороны, этот дизайн сохраняет транспортные и оптические свойства КЯ, а с другой – позволяет управлять спиновой поляризацией в КЯ за счет магнитного слоя [3]. Влияние ФМ слоя на поляризацию носителей в КЯ InGaAs/GaAs/ $\delta$ -(Mn) экспериментально наблюдалось как достижение высоких значений циркулярной поляризации  $P_C \sim 10–30\%$  фотolumинесценции из КЯ уже в слабом магнитном поле  $B \sim 0.1$  Тл [4, 5]. Поляризация оптического перехода в этих гетероструктурах с близлежащим ФМ дельта-слоем Mn (спейсер GaAs толщиной  $d_C = 3–10$  нм) была интерпретирована равновесной поляризацией спинов дырок из КЯ в обменном поле ФМ слоя вследствие туннельной связи носителей в КЯ с  $\delta$ -(Mn)-слоем. Ферромагнитное влияние на магнитооптические свойства было обнаружено так-

же в гибридных структурах на основе полупроводников II–VI системы. Структуры имели КЯ CdTe/CdMgTe и тонкую ФМ пленку Co толщиной 4–10 нм, напыленную на поверхность структуры, отделенную от КЯ широким спейсером CdMgTe толщиной  $d_C = 30$  нм и более [6, 7]. Константы обменного взаимодействия с ФМ слоем как свободных электронов ( $s$ - $d$  обмен), так и свободных зонных дырок в КЯ ( $p$ - $d$  обмен) оказались неизмеримо малы, в то время как обменное взаимодействие дырки, связанной на акцепторе в КЯ, оказалось заметным ~50–100 мкэВ [7]. В этих работах была предложена модель непрямого дальнегодействующего обменного взаимодействия носителей заряда и ФМ слоя Co посредством эллиптически поляризованных фононов. В последние годы активно развивается еще один подход к созданию сложных гибридных светоизлучающих (диодных) наноструктур на основе III–V системы с КЯ InGaAs/GaAs и тонкой поверхностной ФМ пленкой CoPt (~10 нм) [8, 9]. Поэтому исследование механизмов и закономерностей спиновой поляризации в ФМ наноструктурах является важным направлением в современной спинтронике.

В настоящей работе изучено влияние тонкого (~8 нм) ферромагнитного слоя CoPt на поляризацию излучения квантовой ямы InGaAs/GaAs в диодных гетероструктурах InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1 нм)/CoPt со спейсером GaAs толщиной  $d_C = 5, 30$  и 100 нм между активной областью и ФМ инжектором – слоем CoPt. В слабом магнитном поле (<0.1 Тл) во всех структурах наблюдается ги-

## УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА



**Рис. 1.** Спектр ФЛ для структуры InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoPt с шириной спейсера GaAs  $d_C = 30$  нм при фотовозбуждении лазером  $\lambda_L = 845$  нм со стороны подложки и  $T = 2$  К (а). Зависимости  $P_C(B)$  оптического перехода КЯ для ЭЛ и ФЛ в геометрии Фарадея в структуре с  $d_C = 30$  нм (б). На вставке – схема структуры.

стерезис циркулярной поляризации электролюминесценции, обусловленный инжекцией спин-поляризованных носителей из ФМ электрода CoPt в квантовую яму. В то же время для фотолюминесценции гистерезис наблюдается только в структуре с самым узким спейсером  $d_C = 5$  нм, при этом величина поляризации значительно слабее, чем в случае электролюминесценции. Предполагается, что короткодействующий характер наблюдаемого ферромагнитного влияния на спиновую поляризацию носителей в КЯ обусловлен туннельной связью КЯ и слоя CoPt, т.е. перекрытием волновых функций электронов из КЯ с магнитным слоем CoPt.

Светоизлучающие структуры InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoPt были выращены на подложках *n*-GaAs (100) методом газовой эпитаксии и представляли собой эпитаксиальные слои с квантовыми ямами GaAs/In<sub>*x*</sub>Ga<sub>1-*x*</sub>As ( $x = 0.22$ ), где толщина КЯ (слой InGaAs) составляла 10 нм [8]. Общая схема структуры приведена на вставке к рис. 1а. Квантовые ямы заравнивались покровным слоем GaAs (спейсером), толщина которого  $d_C$  варьировалась в пределах  $d_C = 5$ –100 нм. На поверхность спейсера GaAs методом электронно-лучевого послойного осаждения наносились тонкий слой диэлектрика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (толщина 1 нм) и контакт Шоттки на основе сплава Co<sub>45</sub>Pt<sub>55</sub>. Для формирования сплава Co<sub>45</sub>Pt<sub>55</sub> поочередно наносились слои Pt толщиной 0.5 нм и слои Co толщиной 0.3 нм, температура нанесения варьировалась в пределах 200–400°C, общая толщина пленки составляла  $\approx 8$  нм. Ферромагнетизм контактного слоя Co<sub>45</sub>Pt<sub>55</sub> исследовался ранее и был подтвержден данными измерения намагниченности этих пленок [8]. Туннельно-тонкий слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> служил диффузионным барьером для атомов Co, а также выполнял функцию повышения поверхностного сопротивления, что является необходимым условием для спиновой инжекции [8]. К обратной стороне структур формировался базовый омический контакт путем искрового вжигания Sn фольги (для *n*-GaAs). Процесс формирования светоизлучающих диодов завершался травлением мез диаметром 500 мкм.

На полученных структурах были исследованы магнитные зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции (ЭЛ) и фотолюминесценции (ФЛ). Магнитное поле было направлено перпендикулярно поверхности структур (геометрия Фарадея). Для возбуждения электролюминесцентного излучения на образцы подавалось прямое электрическое смещение, а сама ЭЛ регистрировалась со стороны подложки, что позволяет избежать дополнительной поляризации света при прохождении через ферромагнитный электрод (магнитный круговой дихроизм). ФЛ возбуждалась диодным лазером (длина волны  $\lambda_L = 845$  нм) также со стороны подложки и регистрировалась в геометрии Фарадея (магнитное поле направлено перпендикулярно к поверхности образцов) с помощью ССД-камеры на монохроматоре со спектральным разрешением лучше 0.1 мэВ. Циркулярно-поляризованные ЭЛ и ФЛ исследовались стандартным образом с использованием линейного поляризатора и четвертьволновой пластинки. Степень циркулярной поляризации определялась параметром  $P_C(B) = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$ , где  $I_+$  ( $I_-$ ) – интенсивности компонент с правой (левой) поляризацией,

полученные путем интегрирования части спектра, соответствующей оптическому переходу в КЯ.

Измерения циркулярной поляризации люминесценции были выполнены в двух диапазонах магнитных полей: в слабом поле (до 0.3 Тл), обеспечивающем намагничивание слоя CoPt и в сильном поле (до 5 Тл), оказывающем существенное влияние на процессы спиновой инжекции и спинового транспорта. Исследования в малых магнитных полях до 300 мТл проводились при температуре  $T \approx 10$  К в криостате замкнутого цикла. Исследования в магнитных полях до 5 Тл проводились при температуре  $T \approx 2$  К в криостате со сверхпроводящим соленоидом в жидком гелии под откачкой.

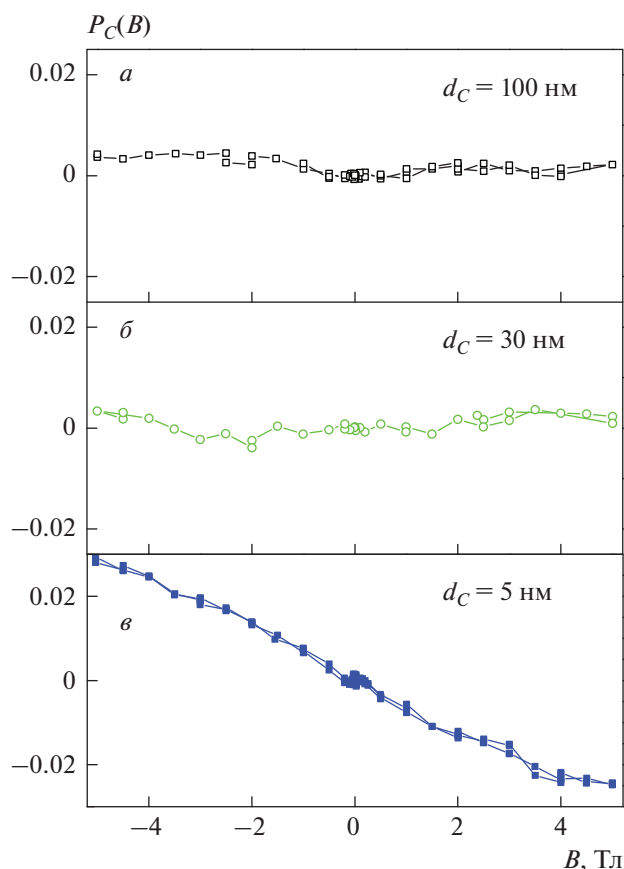
### ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1а показана низкоэнергетическая часть спектра ФЛ (ниже межзонных переходов в барьере GaAs) при низкой температуре  $T = 2$  К для структуры с шириной спейсера  $d_c = 30$  нм. Линия КЯ спектра ФЛ с энергией  $h\nu \sim 1.3$  эВ отвечает излучательной рекомбинации фотовозбужденных дырок, релаксировавших в КЯ, и электронов, находящихся в КЯ в силу легирования подложки  $n$ -GaAs. Полуширина линий ФЛ более 10 мэВ, что свидетельствует о высокой степени беспорядка в КЯ, присущей структурам, выращенным методом газофазной эпитаксии. Во внешнем магнитном поле изучаемые диоды InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoPt в режиме электролюминесценции излучают частично поляризованный свет [8, 9]. Типичный вид магнитопольевых зависимостей степени циркулярной поляризации  $P_C(B)$  для ЭЛ показан на рис. 1б на примере структуры со спейсером GaAs толщиной  $d_c = 30$  нм. Представленная зависимость для  $P_C(B)$  описывают замкнутую петлю гистерезиса с коэрцитивной силой  $B_C \approx 0.1$  Тл и подобна магнитопольевой зависимости намагниченности тонкого поверхностного ФМ слоя CoPt [8]. В режиме прямого смещения, когда на слой CoPt подается положительный относительно базы потенциал, для выращенных на подложке  $n$ -GaAs структур через туннельно-тонкий барьер Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\approx 1$  нм) в спейсерный слой GaAs инжектируются спин-поляризованные дырки [9, 10]. Под действием приложенного электрического поля инжектированные дырки дрейфуют в КЯ, где они излучательно рекомбинируют с резидентными электронами. Сравнение поведения  $P_C(B)$  с контрольными немагнитными структурами позволяет связать наблюдаемые в эксперименте особенности с инжекцией спин-поляризованных дырок именно из ФМ слоя CoPt. Отметим, что приведенная на рис. 1б зависимость  $P_C(B)$  для ФЛ в этой же структуре, в которой от-

сутствуют какие-либо особенности вблизи  $B = 0$ , свидетельствует об отсутствии ферромагнитного влияния этого слоя на спиновую поляризацию фотовозбужденных в КЯ дырок или резидентных электронов. Дело в том, что линейно-поляризованный лазер  $\lambda_L = 845$  нм с энергией  $E_L = 1.47$  эВ, что меньше ширины запрещенной зоны в барьере GaAs  $E_g \approx 1.51$  эВ, создает в КЯ неполяризованные электронно-дырочные пары. Отметим, что вследствие используемого подбарьерного фотовозбуждения носителей именно в КЯ, они не могут поляризоваться на границе между спейсером GaAs и поверхностным ФМ слоем CoPt вследствие отражения, что исключает из рассмотрения этот эффективный механизм поляризации. Вблизи  $B = 0$  ( $< 0.1$  Тл), когда наведенная магнитным полем поляризация  $P_C(B)$  несущественна, единственным источником спиновой поляризации носителей в КЯ может быть только их обменное взаимодействие с поверхностным ФМ слоем CoPt [1], что для этой структуры со спейсером  $d_c = 30$  нм не реализуется.

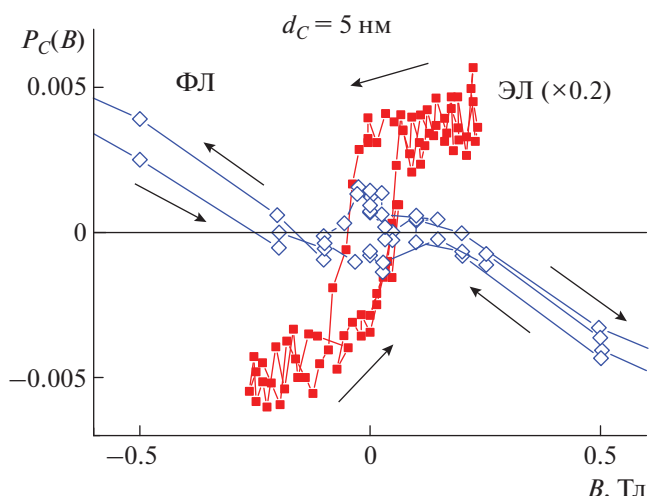
Зависимости  $P_C(B)$  для ФЛ во всех структурах приведены на рис. 2. Видно, что в отличие от структур с более широким спейсером GaAs  $d_c = 30$  нм и  $d_c = 100$  нм, для которых  $P_C(B) \approx 0$  во всем диапазоне полей  $B = \pm 5$  Тл, в структуре с самым узким спейсером  $d_c = 5$  нм наблюдается более сложное поведение для ФЛ (рис. 2в). Во-первых, в ней зависимость  $P_C(B)$  имеет отрицательный, приблизительно линейный наклон. Во-вторых, при  $B \sim 0$  также наблюдается петля гистерезиса, что наглядно видно в увеличенном масштабе на рис. 3. Для сравнения на рис. 3 также показана зависимость  $P_C(B)$  для ЭЛ. Видно, что величина поляризации ФЛ значительно, на порядок слабее, чем в случае ЭЛ. Как следствие, петля гистерезиса для случая ФЛ выражена менее резко и четко (рис. 3). Коэрцитивная сила в этой структуре  $B_C \approx 0.1$  Тл, как и в структуре с  $d_c = 30$  нм, что отражает гистерезис поверхностного ФМ слоя CoPt. В отличие от случая ЭЛ, для которого величина  $P_C(B)$  отражает спиновую поляризацию дырок, инжектированных из слоя CoPt, ненулевая поляризация ФЛ отражает конечную спиновую поляризацию носителей в КЯ, резидентных или фотовозбужденных.

Таким образом, сравнение магнитопольевых зависимостей  $P_C(B)$  в трех исследованных структурах свидетельствует о существенном взаимодействии носителей в КЯ с ФМ слоем CoPt только в случае узкого спейсера  $d_c = 5$  нм. Предполагается, что короткодействующий характер наблюдаемого ферромагнитного влияния поверхностного слоя CoPt на спиновую поляризацию фотовозбужденных или резидентных носителей в КЯ обусловлен туннельной связью КЯ и слоя CoPt, т.е. перекрытием их волновых функций с магнитным слоем



**Рис. 2.** Зависимости  $P_C(B)$  для ФЛ оптического перехода в КЯ в геометрии Фарадея в структурах InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CoPt с  $d_C = 100$  нм (а),  $d_C = 30$  нм (б) и  $d_C = 5$  нм (в) при фотовозбуждении лазером  $\lambda_L = 845$  нм ( $E_L = 1.47$  эВ) со стороны подложки и  $T = 2$  К.

CoPt. Для сравнения с литературой отметим, что ферромагнитное влияние поверхностного слоя магнитного металла на спиновую поляризацию носителей в КЯ было найдено в структурах Co/CdMgTe/CdTe [6] и Fe/CdMgTe/CdTe [11]. Что интересно и важно для сопоставления с исследуемыми структурами InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1 нм)/CoPt, в структурах с КЯ CdMgTe/CdTe тонкий (~10 нм) поверхностный ФМ слой Fe или Co наносился непосредственно на спейсер CdMgTe без разделительного слоя на границе раздела (типа Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), что приводило к их перемещению и/или химическому взаимодействию и образованию промежуточного ФМ слоя [6, 11]. Этот промежуточный ФМ слой имеет магнитные характеристики, отличные от свойств поверхностной пленки ФМ металла и показывает дальнедействующий характер, предположительно фонный [6, 11], что свидетельствует о многообразии возможных механизмов ФМ связи в гибридных полупроводниковых структурах. От-



**Рис. 3.** Зависимости  $P_C(B)$  для ЭЛ (закрытые символы) и ФЛ (открытые символы) оптического перехода КЯ в структуре с узким спейсером  $d_C = 5$  нм. Стрелками отмечено направление развертки магнитного поля,  $T = 2$  К.

метим, что для установления таких механизмов связи требуются детальные многосторонние исследования (см., например работу [7]), и для систем Co- и Fe/CdMgTe/CdTe находятся в стадии разработки. В настоящее время в этих гибридных структурах на основе полупроводников II–VI системы установлено одновременное наличие двух разных типов взаимодействия носителей в КЯ с ФМ слоем (Co или Fe), которые имеют короткодействующий и дальнедействующий характеры, соответственно [6, 7, 11]. Короткодействующее взаимодействие авторы приписывают стандартному обменному механизму через тонкий барьерный слой, туннельно-прозрачный для волновых функций электронов, тогда как дальнедействующее взаимодействие относят к непрямоугольному взаимодействию носителей в КЯ с ФМ слоем посредством эллиптически поляризованных фононов [6, 11]. Для изучаемых в настоящей работе структур InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1 нм)/CoPt такие исследования также продолжаются [8–10]. Предполагается, что обнаруженный в настоящей работе короткодействующий характер влияния ФМ слоя CoPt на поляризацию излучения КЯ также обусловлен туннельной связью носителей в КЯ и ферромагнитного слоя CoPt, аналогично работам [6, 11]. Как показывают расчеты для сходных ФМ гетероструктур InGaAs/GaAs/ $\delta$ -(Mn), перекрытие волновых функций не только электронов, но и дырок с близлежащим ФМ дельта-слоем Mn (спейсер  $d_C = 3$ –10 нм) существенно зависит от конкретных параметров структуры и может быть значительным [12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано магнитополевое поведение циркулярной поляризации фотолюминесценции квантовой ямы InGaAs/GaAs в гибридных структурах GaAs/InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1 нм)/CoPt для широкого диапазона толщин спейсера GaAs  $d_C = 5, 30$  и  $100$  нм. Установлено, что влияние тонкого поверхностного ферромагнитного слоя CoPt ( $\sim 8$  нм) на циркулярную поляризацию излучения квантовой ямы InGaAs/GaAs наблюдается только в структуре с узким спейсером GaAs  $d_S = 5$  нм, при этом инжекция спин-поляризованных носителей из ФМ слоя наблюдается в электролюминесценции при всех значениях  $d_S = 5-100$  нм. Предполагается, что короткодействующий характер наблюдаемого ферромагнитного влияния слоя CoPt на поляризацию фотолюминесценции обусловлен спиновой поляризацией носителей вследствие туннельной связи квантовой ямы и поверхностного слоя CoPt. Полученные результаты могут быть интересны с практической точки зрения как демонстрация возможности управления циркулярной поляризацией излучения квантовой ямы в гибридных структурах.

Автор благодарит М.В. Дорохина и Б.Н. Звонкова за предоставленные образцы.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИФТТ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dietl T., Ohno H. // Rev. Mod. Phys. 2014. V. 86. P. 187.

2. Nazmul A.M., Atefmiya T., Shuto Y. et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. Art. No. 017201.
3. Захарченя Б.П., Коренев В.Л. // УФН. 2005. Т. 175. С. 629; Zakharchenya B.P., Korenev V.L. // Phys. Usp. 2005. V. 48. P. 603.
4. Myers R.C., Gossard A.C., Awschalom D.D. // Phys. Rev. B. 2004. V. 69. Art. No. 161305(R).
5. Зайцев С.В., Дорохин М.В., Бричкин А.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. С. 730; Zaitsev S.V., Dorokhin M.V., Brichkin A.S. et al. // JETP Lett. 2010. V. 90. P. 658.
6. Korenev V.L., Salewski M., Akimov I.A. et al. // Nature Phys. 2016. V. 12. No. 1. P. 85.
7. Akimov I.A., Salewski M., Kalitukha I.V. et al. // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. Art. No. 184412.
8. Здоровейцев А.В., Дорохин М.В., Демина П.Б. и др. // ФТП. 2015. Т. 49. № 12. С. 1649; Zdoroveyshchev A.V., Dorokhin M.V., Demina P.B. et al. // Semiconductors. 2015. V. 49. No. 12. P. 1601.
9. Дорохин М.В., Ведь М.В., Демина П.Б. и др. // ФТТ. 2017. Т. 59. № 11. С. 2135; Dorokhin M.V., Ved' M.V., Demina P.B. et al. // Phys. Sol. State. 2017. V. 59. No. 11. P. 2155.
10. Дорохин М.В., Демина П.Б., Здоровейцев А.В. и др. // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 5. С. 724; Dorokhin M.V., Demina P.B., Zdoroveyshchev A.V. et al. // Tech. Phys. 2022. V. 92. No. 5. P. 613.
11. Kalitukha I.V., Ken O.S., Korenev V.L. et al. // Nano Lett. 2021. V. 21. No. 6. P. 2370.
12. Зайцев С.В. // ФНТ. 2012. Т. 38. № 5. С. 513; Zaitsev S.V. // Low Temp. Phys. 2012. V. 38. No. 5. P. 399.

**Proximity effect in ferromagnetic structures InGaAs/GaAs/CoPt**

S. V. Zaitsev\*

Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

\*e-mail: szaitsev@issp.ac.ru

Ferromagnetic influence of a thin ( $\sim 8$  nm) surface CoPt layer on the circular polarization of the InGaAs/GaAs quantum well photoluminescence is observed in structure GaAs/InGaAs/GaAs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1 nm)/CoPt with narrow GaAs spacer  $d_S = 5$  nm, while electroluminescence is polarized in the whole range of  $d_S = 5-100$  nm. It is suggested that the short-range proximity effect is determined by overlap of electrons wave functions with the nearby ferromagnetic CoPt film.