

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/Al₂O₃(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/ δ -(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 δ -(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/Al₂O₃(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

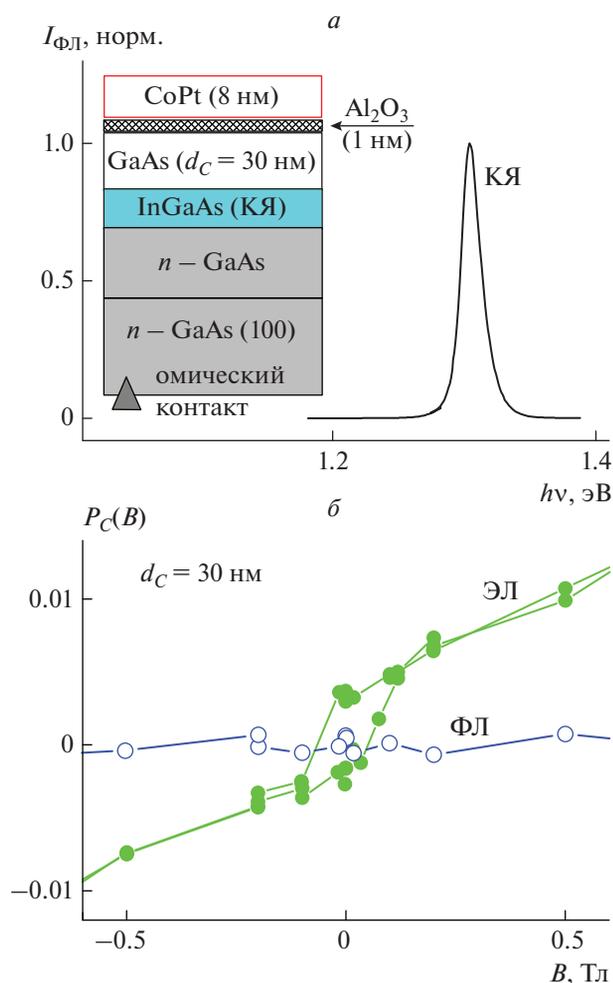


Рис. 1. Спектр ФЛ для структуры InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt с шириной спейсера GaAs $d_C = 30$ нм при фотовозбуждении лазером $\lambda_L = 845$ нм со стороны подложки и $T = 2$ К (а). Зависимости $P_C(B)$ оптического перехода КЯ для ЭЛ и ФЛ в геометрии Фарадея в структуре с $d_C = 30$ нм (б). На вставке – схема структуры.

стерезис циркулярной поляризации электролюминесценции, обусловленный инжекцией спинполяризованных 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/Al₂O₃/CoPt были выращены на подложках *n*-GaAs (100) методом газовой эпитаксии и представляли собой эпитаксиальные слои с квантовыми ямами GaAs/In_{*x*}Ga_{1-*x*}As ($x = 0.22$), где толщина КЯ (слой InGaAs) составляла 10 нм [8]. Общая схема структуры приведена на вставке к рис. 1а. Квантовые ямы зарастивались 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 Al₂O₃ (толщина 1 нм) и контакт Шоттки на основе сплава Co₄₅Pt₅₅. Для формирования сплава Co₄₅Pt₅₅ 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 ≈ 8 нм. Ферромагнетизм контактного слоя Co₄₅Pt₅₅ исследовался ранее и был подтвержден данными измерения намагниченности этих пленок [8]. Туннельно-тонкий слой Al₂O₃ 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/Al₂O₃/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 Al₂O₃ (≈ 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

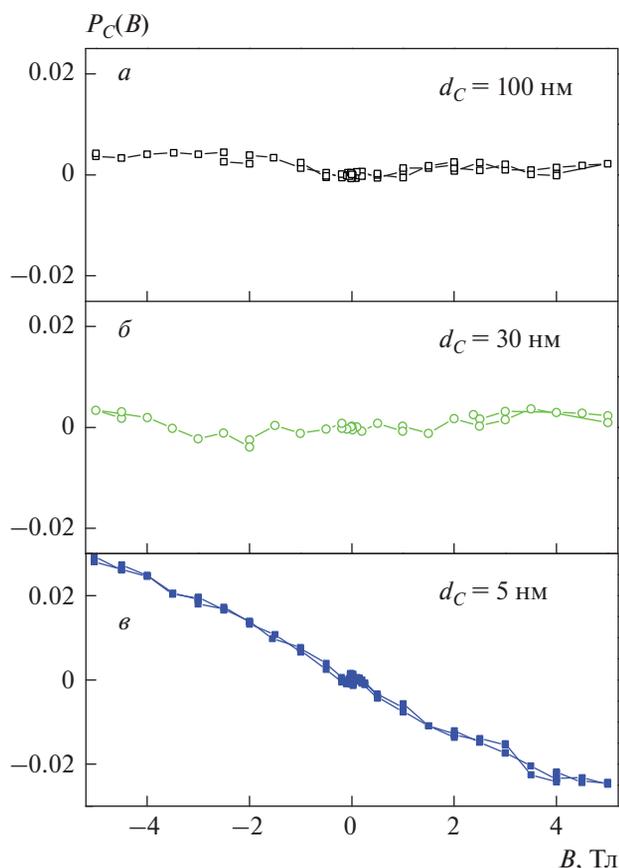


Рис. 2. Зависимости $P_C(B)$ для ФЛ оптического перехода в КЯ в геометрии Фарадея в структурах InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt с $d_C = 100$ нм (а), $d_C = 30$ нм (б) и $d_C = 5$ нм (в) при фотовозбуждении лазером $\lambda_L = 845$ нм ($E_L = 1.47$ эВ) со стороны подложки и $T = 2$ К.

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/Al₂O₃ (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 Al₂O₃), 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-

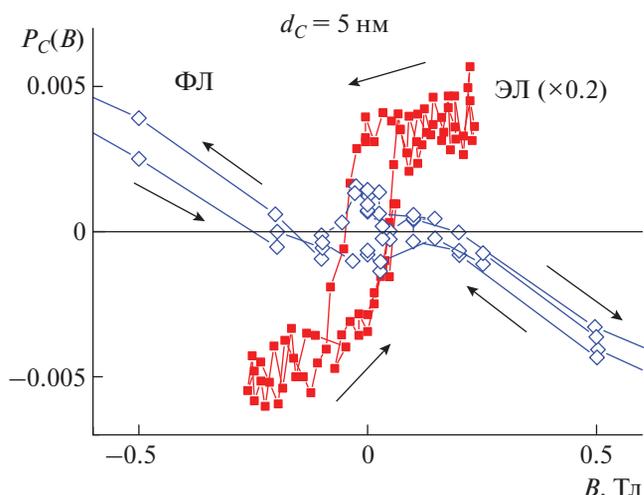


Рис. 3. Зависимости $P_C(B)$ для ЭЛ (закрытые символы) и ФЛ (открытые символы) оптического перехода КЯ в структуре с узким спейсером $d_C = 5$ нм. Стрелками отмечено направление развертки магнитного поля, $T = 2$ К.

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/Al₂O₃(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/ δ -(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/Al₂O₃(1 нм)/CoPt для широкого диапазона толщин спейсера GaAs $d_C = 5, 30$ и 100 нм. Установлено, что влияние тонкого поверхностного ферромагнитного слоя CoPt (~ 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., Atemiya 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 (~ 8 nm) surface CoPt layer on the circular polarization of the InGaAs/GaAs quantum well photoluminescence is observed in structure GaAs/InGaAs/GaAs/Al₂O₃ (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.