

03,05,13

Модификация функциональных характеристик спиновых светоизлучающих диодов InGaAs/GaAs/Al₂O₃/CoPt

© Е.И. Малышева, П.Б. Дёмина, М.В. Ведь[¶], М.В. Дорохин, А.В. Здоровейцев, А.В. Кудрин, Н.В. Байдусь, В.Н. Трушин

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

Поступила в Редакцию 22 ноября 2023 г.
В окончательной редакции 13 декабря 2023 г.
Принята к публикации 14 декабря 2023 г.

Сформированы и исследованы спиновые светоизлучающие диоды на основе гетероструктур InGaAs/GaAs и ферромагнитных контактов, представляющих собой сплав CoPt_x, где состав варьировался в пределах ($1 \leq x \leq 2.5$). Показано, что варьирование состава ферромагнитного контакта обеспечивает управление видом магнитопольевой зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения. Исследования показали, что управление осуществляется за счет модуляции магнитных характеристик пленок при варьировании состава. Полученный результат показывает возможность контроля с помощью магнитного поля переключения намагниченности контактов спинового светоизлучающего диода, что представляется полезным с практической точки зрения.

Ключевые слова: магнитные тонкие пленки, спиновая инжекция, спиновые светодиоды, полупроводники A^{III}B^V.

DOI: 10.61011/FTT.2024.02.57241.261

1. Введение

Спиновые светоизлучающие диоды (ССИД) на основе полупроводниковых гетероструктур A^{III}B^V с ферромагнитным (ФМ) металлическим инжектором — это один из базовых элементов спинтроники, в котором реализуются такие спин-зависимые явления, как электрическая инжекция спин-поляризованных носителей из намагниченного ФМ электрода в полупроводниковую структуру, спиновая релаксация носителей при переносе в полупроводниковом материале [1–3], спиновая прецессия в магнитном поле неоднородно-намагниченного контакта [4,5], а также излучательная рекомбинация с испусканием частично циркулярно-поляризованного света. К настоящему моменту базовые функции спинового светоизлучающего диода были реализованы при комнатной температуре в целой серии работ [4–8]. Дальнейшее развитие связывается с поиском путей практического применения ССИД, их интеграции в существующие или новые интегральные оптоэлектронные схемы [9]. Одной из задач, решаемых в рамках этой цели, является поиск путей управления такими важными функциональными характеристиками ССИД как остаточная поляризация (поляризация в нулевом магнитном поле за счет остаточной намагниченности инжектора) и магнитное поле переключения (из состояния с циркулярной поляризацией по правому кругу в состояние с циркулярной поляризацией по левому кругу и обратно). Управление этими характеристиками достигается за счет модуляции свойств ферромагнитного инжектора. Наиболее распро-

страненные виды инжекторов на основе сплавов CoFeB имеют фиксированный состав и обладают малым количеством степеней свободы [8,10]. В отличие от них, в инжекторах на основе сплавов CoPt_x, рассмотренных в работах [4,5,11], состав x может варьироваться в широких пределах, при этом варьируются и указанные выше параметры петли гистерезиса.

В настоящей работе рассмотрены спиновые светоизлучающие диоды с инжектором на основе сплавов CoPt_x, где состав варьировался в пределах ($1 \leq x \leq 2.5$). Показано, что варьирование состава ферромагнитного контакта обеспечивает управление видом магнитопольевой зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения, при этом наибольшее значение степени циркулярной поляризации (полученное в максимальном магнитном поле) не претерпевает значительных изменений. Полученный результат представляется важным с точки зрения построения ССИД с управляемыми параметрами рабочих магнитных полей.

2. Методы формирования и исследования образцов

Полупроводниковая часть светоизлучающих диодов, представляющая собой гетероструктуру с квантовой ямой In_{0.18}Ga_{0.82}As/GaAs, была выращена методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений при атмосферном давлении водорода на подложках *n*-GaAs. Расстояние от квантовой ямы до поверхности

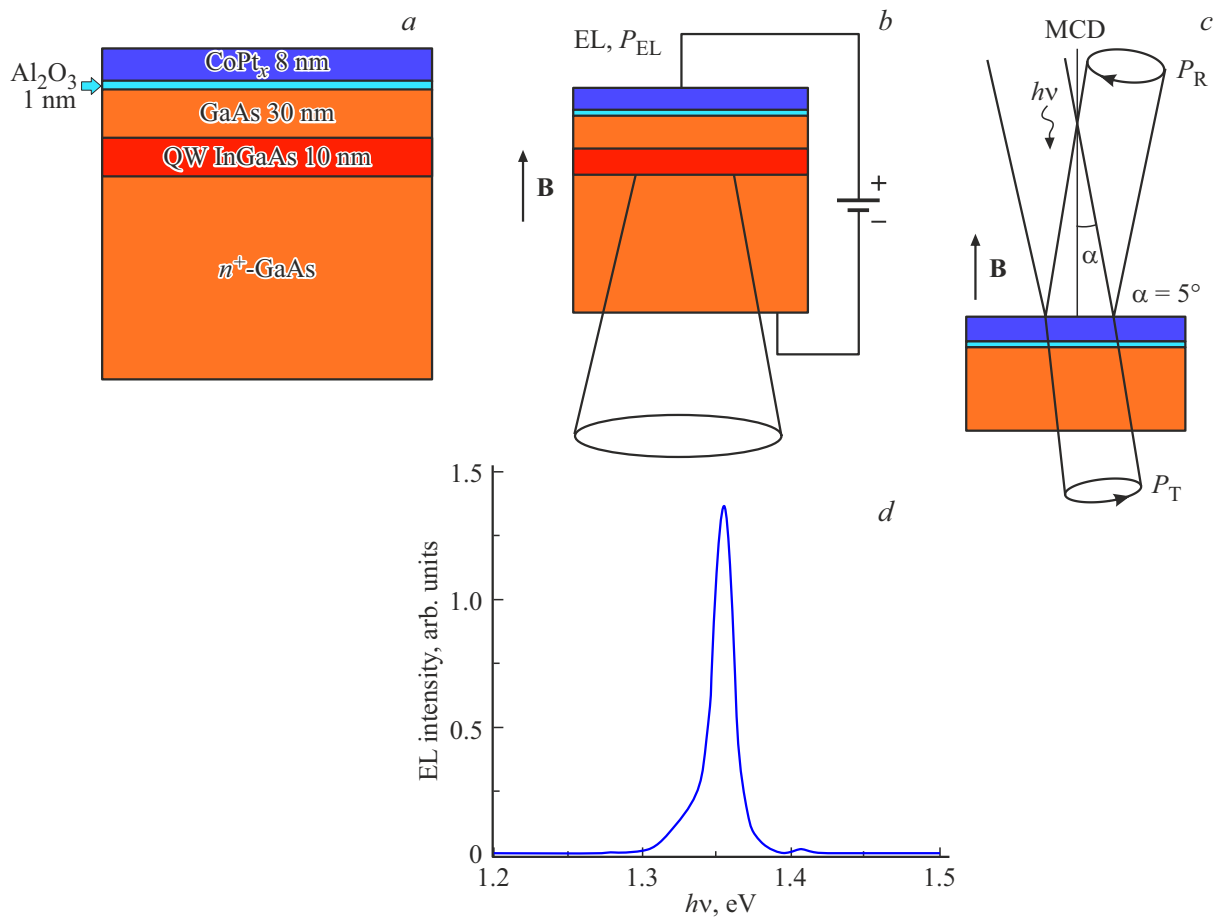


Рис. 1. (a) Схема образца для исследований; (b) геометрия измерений степени циркулярной поляризации электролюминесценции; (c) геометрия измерений степени циркулярной поляризации света, прошедшего через слой CoPt_x (P_T) и света, отраженного от поверхности при близком к нормальному падении (P_R); (d) спектр электролюминесценции спинового светодиода, измеренный при температуре 10 K и токе 10 mA (плотность тока 50 mA/mm^2).

структуры (толщина покровного слоя) составило 30 nm. После окончания эпитаксиального роста на поверхность структур методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме в едином технологическом процессе осаждались тонкий 1 nm слой диэлектрика — Al_2O_3 , и металлическая пленка на основе сплава CoPt_x . Таким образом, формировался контакт Шоттки на основе системы ферромагнитный металл/туннельно-тонкий диэлектрик/полупроводник. Формирование металлического контакта осуществлялось путем поочередного нанесения слоев Co и Pt с варьируемой толщиной в количестве 10 периодов. Технологически контакт представлял собой многослойную структуру $[\text{Co}(a)/\text{Pt}(b)]_{10}$, где a и b — толщины каждого слоя в nm. Состав слоя задавался путем установки технологических значений толщины $x = b/a$, контроль толщин осуществлялся с применением кварцевого датчика толщины, встроенного в технологическое оборудование. Температура нанесения слоев составила 200°C , общая толщина пленки составила $(a + b) \cdot 10 \text{ nm}$. Для исследований магнитооптических эффектов на сформированных пленках в качестве

полупроводниковой части использовали полированную поверхность подложки полупроводящего GaAs. Схема образцов для исследования представлена на рис. 1, a. Всего было сформировано четыре образца, с разным составом: образец 1 ($a = 2, b = 5$); образец 2 ($a = 3, b = 5$); образец 3 ($a = 4, b = 5$) и образец 4 ($a = 4, b = 4$). Состав подбирался в соответствии с ранее полученными результатами, показавшими наличие в пленках с таким составом перпендикулярной магнитной анизотропии [12], что является необходимым условием для получения циркулярно-поляризованной электролюминесценции [1].

В работе выполнены исследования фазового состава сформированных пленок, а также измерения магнитооптических зависимостей степени циркулярной поляризации электролюминесценции сформированных спиновых светоизлучающих диодов. Исследования фазового состава и кристаллической структуры сформированных пленок проводили методом рентгеновской дифракции при помощи рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Discover. Кристаллическая структура подложек GaAs, на которых

формировалась многослойная металлическая пленка, соответствует монокристаллу и в данной работе не рассматривается. Фазовый анализ пленок выполнен с помощью встроенного программного обеспечения аппарата (DIFFRAC.EVA), использующего базу данных PDF-2. Измерения магнитопольевых зависимостей поляризационных характеристик выполнены в диапазоне магнитных полей 0–2000 Ое при температуре 10 К. Для возбуждения электролюминесцентного излучения на образцы подавалось прямое электрическое смещение, электролюминесценция регистрировалась со стороны подложки. Спектр электролюминесценции представлен на рис. 1, *d*. На спектре зарегистрирован пик с энергией 1.35 эВ, соответствующей основному переходу в квантовой яме с заданным содержанием In. При введении светодиода в магнитное поле, направленное перпендикулярно поверхности, его излучение становится частично циркулярно-поляризованным за счет спин-поляризованной инжекции носителей из ферромагнитного CoPt контакта в квантовую яму. В работе выполнены измерения магнитопольевых зависимостей степени циркулярной поляризации электролюминесцентного излучения (P_{EL}).

Для анализа механизмов поляризации электролюминесценции, а также для исследования магнитных свойств сформированных пленок были выполнены измерения циркулярной поляризации при пропускании и отражении неполяризованного света от пленки CoPt (схема опыта представлена на рис. 1, *c*). Для измерений использовались контрольные структуры, сформированные на подложках *i*-GaAs. В ходе измерений образцы облучались неполяризованным светом с длиной волны, соответствующей основному переходу в квантовой яме InGaAs. Регистрировалась магнитопольевая зависимость степени циркулярной поляризации излучения, прошедшего через полупрозрачную пленку CoPt_x и прозрачную для использованной длины волны подложку GaAs (P_T), а также степень циркулярной поляризации P_R компоненты излучения, отраженной от слоя CoPt_x при близком к нормальному падении света (рис. 1, *c*).

Значения степени циркулярной поляризации для всех геометрий рассчитывались по формуле

$$P_{EL(T,R)} = \frac{I(\sigma^+) - I(\sigma^-)}{I(\sigma^+) + I(\sigma^-)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $P_{EL(T,R)}$ — степень циркулярной поляризации ЭЛ, прошедшего или отраженного излучения в процентах, $I(\sigma^+)$ и $I(\sigma^-)$ — интенсивность σ^+ и σ^- поляризованного излучения. Для расчета P_T и P_R измерялась относительная интенсивность монохроматизированного излучения галогеновой лампы. Для расчета P_{EL} использовалась интенсивность излучения диода, в этом случае интенсивности получены интегрированием участка спектра, соответствующего основному переходу в InGaAs квантовой яме.

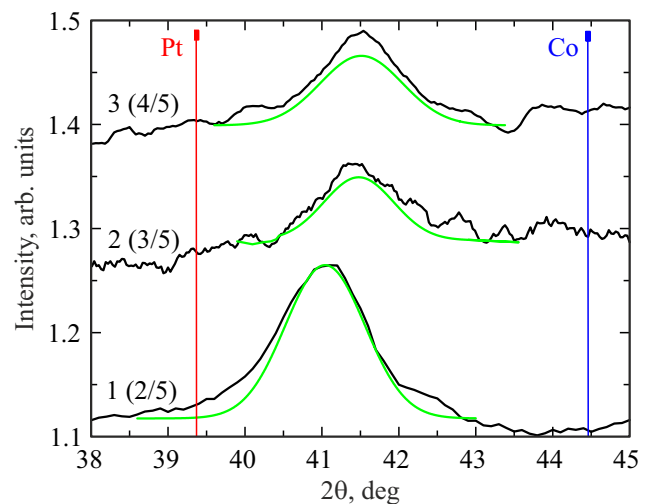


Рис. 2. Спектры рентгеновской дифракции, измеренные в области, соответствующей пику от сформированной пленки. Цифры соответствуют маркировке образцов. Вертикальными линиями обозначены значения углов, соответствующие дифракции Co и Pt.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены спектры рентгеновской дифракции исследованных пленок для образцов 1, 2 и 3. Спектр для образца 4 аналогичен представленным, но не приведен во избежание загромождения рисунка. Положение основного дифракционного максимума (ДМ) на спектрах не соответствует линиям для Co и Pt и известных соединений Co-Pt. Аналитическая программа интерпретирует указанные пики как твердый раствор CoPt_x с составом, зависящим от соотношения толщины. Отметим, что подобный спектр характерен для большинства исследованных образцов, отличия заключаются лишь в точном положении основного дифракционного максимума. Видно монотонное увеличение углового положения ДМ с уменьшением относительной толщины Co. Таким образом, в сформированном образце слои Co и Pt существенно перемешаны между собой, а сама пленка в большей степени является твердым раствором с усредненным составом CoPt_x. Полученный результат согласуется с ранее полученными данными [13].

При введении диодов во внешнее магнитное поле в геометрии, показанной на рис. 1, *b*, электролюминесцентное излучение становится частично циркулярно-поляризованным. Зависимости степени циркулярной поляризации ЭЛ от магнитного поля для всех исследованных образцов показаны на рис. 3. Все зависимости P_{EL} описывают петлю гистерезиса с выходом в насыщение в полях до 550–1300 Ое. Вид зависимости $P_{EL}(H)$ определяется магнитопольевыми зависимостями намагниченности исследованных слоев CoPt_x, что наглядно демонстрирует подобие петель гистерезиса циркулярной

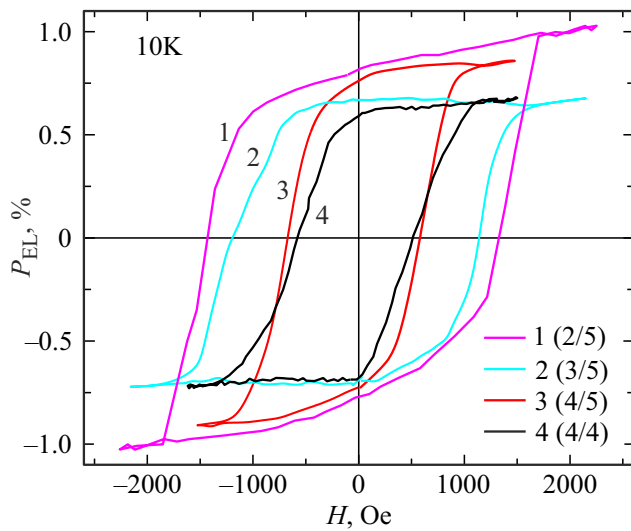


Рис. 3. Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации электролюминесценции, измеренные при температуре 10 К и токе диода 10 мА (плотность тока 50 мА/мм²). Номер образца для каждой кривой указан на графике (в скобках приведены значения состава).

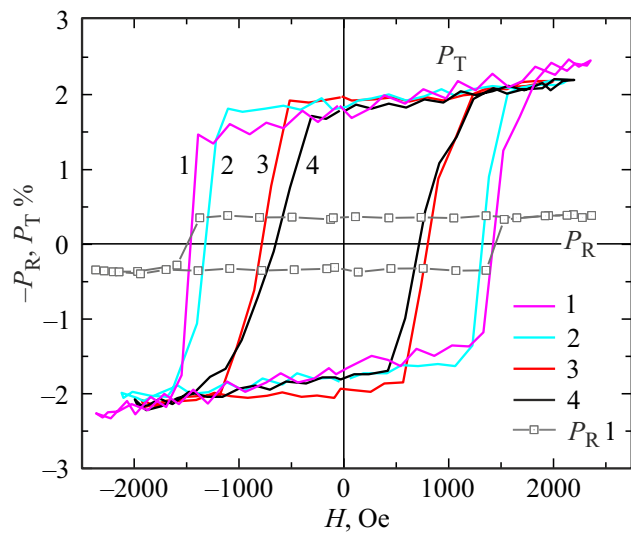


Рис. 4. Магнитопольевые зависимости степени циркулярной поляризации пропускания (P_T — линии) и отражения (P_R — точки), измеренные при температуре 10 К. Номер образца для каждой кривой указан на графике.

поляризации ЭЛ ($P_{EL}(H)$) и поляризации света $P_T(H)$, прошедшего через магнитный слой (зависимости $P_T(H)$) представлены на рис. 4). Для обоих случаев величина коэрцитивного поля (H_c), а также магнитного поля насыщения (H_s) зависят от выбранного состава. Минимальные значения H_c и H_s получены для образца с наибольшей толщиной слоя Со ($a = 4$), при этом варьирование содержания Рт незначительно сказывается на этих параметрах. По мере уменьшения толщины Со

значения H_c и H_s монотонно повышаются до значений 1300 и 1700 Ое соответственно.

Таким образом, варьирование толщины слоев Со в многослойной структуре позволяет эффективно управлять параметрами перемагничивания и задавать магнитные поля переключения циркулярной поляризации. Величина степени поляризации ЭЛ при насыщении намагниченности (P_{ELS}) немонотонно зависит от толщины Со и меняется от образца к образцу в диапазоне 0.6–1%. В отличие от P_{ELS} поляризация света при пропускании излучения через пленку P_{TS} слабо меняется от образца к образцу (рис. 4) и составляет $\sim 2\%$ для всех образцов.

Сводные данные по величине степени циркулярной поляризации, измеренной в различных геометриях для исследованных образцов, представлены в таблице.

Перейдем к обсуждению полученных экспериментальных результатов. Изменение параметров петли гистерезиса при варьировании содержания Со в пленке $CoPt_x$ связывается с изменением константы магнитной анизотропии [14,15], величина которой зависит от состава пленки. Отметим, что ранее перпендикулярная магнитная анизотропия была зарегистрирована для составов в диапазоне ($a = 1-4 \text{ \AA}$, $b = 4-5 \text{ \AA}$), при отклонении состава от указанного диапазона формируются пленки с осью легкого намагничивания, лежащей в плоскости [13–15]. Таким образом, состав пленки существенно влияет на магнитную анизотропию. Варьирование степени циркулярной поляризации электролюминесценции может быть обусловлено следующими факторами [1,5,16].

1. Равновесная спиновая поляризация, обусловленная Зеемановским расщеплением уровней в квантовой яме. Согласно работе [5], величина равновесной спиновой поляризации линейно зависит от магнитного поля и в поле 2000 Ое значение равновесной спиновой поляризации не превышает 0.2%. В силу особого характера зависимости равновесной поляризации, а также в силу ее малости данный фактор будет исключен из рассмотрения.

2. Инжекция спин-поляризованных носителей заряда из намагниченного ферромагнитного контакта в полупроводник и спиновая релаксация инжектированных носителей на гетерогранице ферромагнетик/полупровод-

Значения степени циркулярной поляризации электролюминесценции, а также степени циркулярной поляризации прошедшего и отраженного света, измеренные в магнитном поле, соответствующем насыщению намагниченности (P_{ELS} , P_{TS} и P_{RS} соответственно) для исследованных образцов

№ п/п	Состав (a/b)	P_{ELS} , %	P_{TS} , %	P_{RS} , %	H_c , Ое	H_s , Ое
1	2/5	0.99	2.00	-0.29	1350	1700
2	3/5	0.67	2.00	-0.35	1150	1650
3	4/5	0.84	2.00	-0.30	570	1150
4	4/4	0.64	2.00	-0.44	500	1100

ник и в объеме полупроводника. Степень циркулярной поляризации рекомбинационного излучения в квантовой яме в результате спиновой инжекции определяется из соотношения

$$P_{EL} = P_{fm} \exp(-x/l) / [1 + (\tau_s/\tau_R)], \quad (2)$$

где P_{fm} — степень спиновой поляризации носителей в ферромагнетике [16], l — длина спиновой диффузии в полупроводнике, τ_s — время спиновой релаксации, τ_R — время жизни относительно излучательной рекомбинации. Выражение (2) справедливо в случае сравнительно небольшого внешнего магнитного поля, и при условии высокого контактного сопротивления на границе ферромагнетик/полупроводник, что вполне соответствует рассматриваемой системе CoPt/Al₂O₃/GaAs. Характерная длина спиновой диффузии для дырок в GaAs составляет ~ 100 nm [17]. Время спиновой релаксации дырок в аналогичной системе квантовой ямы InGaAs/GaAs было ранее оценено как 6.5 ps при температуре 1.4 K [18]. Также выражение (2) не учитывает спиновую релаксацию на границе ферромагнетик/полупроводник, данный процесс обеспечит снижение множителя P_{fm} .

3. Прецессия инжектированных спин-поляризованных носителей по мере переноса от инжектора к активной области. Указанный фактор влияет как на абсолютное значение, так и на знак степени циркулярной поляризации, прецессия спина в спиновых светоизлучающих диодах подробно изучалась в работах [4,5];

4. Дополнительными факторами, оказывающими влияние на величину P_{EL} , являются поляризация ЭЛ излучения при отражении неполяризованного света от магнитного слоя и при прохождении света через намагниченный ферромагнитный слой (P_R и P_T соответственно). В использованной геометрии измерений (рис. 1, *b*) детектором регистрируется лишь та часть излучения, которая выводится со стороны подложки, поэтому поляризация света при пропускании не оказывает влияния на измеряемое значение P_{EL} . Поляризация отраженного от ферромагнитного слоя излучения может вносить вклад в P_{EL} , поскольку часть ЭЛ излучения отражается от контакта CoPt и выводится со стороны подложки в геометрии рис. 1, *b*. Для оценки степени поляризации отраженного излучения были выполнены соответствующие измерения. На рис. 4 точками показана магнитополевая зависимость $P_R(H)$ для образца 1, измеренной в геометрии, показанной на рис. 1, *c*. Аналогично остальным характеристикам, вид зависимости $P_R(H)$ определяется намагниченностью ферромагнитного контакта, а величина поляризации не превышает 0.4%. В таблице указаны значения P_{RS} при насыщении намагниченности. В силу геометрии эксперимента поляризация отраженного света имеет обратный знак и, поэтому, снижает итоговое значение P_{EL} . Количественный вклад этого эффекта в величину P_{EL} оценить невозможно в силу сложности оценки интенсивности компоненты света, отраженной от контакта CoPt_x (необходимо учитывать коэффициент

пропускания, возможность многократного отражения, диаграмму направленности ЭЛ излучения). При этом отметим, что образцам с наибольшим значением P_{EL} характерны наименьшие значения P_R , что косвенно подтверждает влияние отраженной волны на измеряемое значение степени циркулярной поляризации, но не объясняет зарегистрированные различия в P_{EL} для разных образцов.

Рассмотрим влияние второго и третьего из перечисленных факторов на циркулярно-поляризованную люминесценцию. Совпадение значений степени циркулярной поляризации света, прошедшего через CoPt_x, свидетельствует о подобии магнитной структуры, поскольку степень взаимодействия магнитных моментов с прошедшим излучением для всех образцов одинакова. Поэтому можно заключить, что величина начальной поляризации P_{fm} близка для всех составов магнитных пленок. Спиновая релаксация при транспорте носителей заряда в режиме спиновой инжекции не различается, поскольку пленки сформированы на базе одной и той же полупроводниковой структуры. Спиновая релаксация на границе раздела также не может существенно различаться в силу близости свойств гетерограниц для всех пленок: во всех случаях на поверхность полупроводника наносился слой Al₂O₃ толщиной 1 nm, а первым металлическим слоем на поверхности Al₂O₃ всегда была платина.

Согласно работам [4,5] существенное влияние на значение P_{EL} оказывает прецессия спин-поляризованных носителей, инжектированных в полупроводник из слоя CoPt_x. Ранее было показано, что причиной прецессии является магнитное поле неоднородно намагниченного контакта. Наличие в пленке неоднородностей структуры и состава создает в приповерхностной области дополнительное встроенное магнитное поле, имеющее компоненты в направлении, перпендикулярном нормали пленки. Вследствие прецессии носителей в этом встроенном магнитном поле по мере их переноса к активной области изменяется среднее значение спиновой поляризации и, как следствие, степень циркулярной поляризации ЭЛ. Величина встроенного магнитного поля и, соответственно, итоговое регистрируемое значение P_{EL} зависят от плотности магнитных неоднородностей. Предположительно, именно этот параметр и изменяется при варьировании толщин слоев многослойной структуры, что определяет модуляцию значения P_{EL} от образца к образцу. Отметим, что модуляция степени поляризации сравнительно невелика: минимальное значение, полученное для образца 2, составило 0.6%, максимальное для образца 4 — вблизи 1%. Полученные значения значительно превышают уровень экспериментальной ошибки в измерениях P_{EL} , который составляет $\sim 0.05\%$.

4. Заключение

Таким образом в работе была показана возможность управления параметрами магнитополевой зави-

симости степени циркулярной поляризации электролюминесценции в спиновых светодиодах с многослойным магнитным контактом CoPt_x . Управление коэрцитивным полем и магнитным полем насыщения в пределах 500–1500 Ое осуществляется путем варьирования толщины слоя Co (a). В работе не было выявлено влияния толщины Pt (b) на магнитные характеристики, тем не менее толщина Pt влияет на максимальное значение степени циркулярной поляризации электролюминесценции. Предполагается, что механизмом, обеспечивающим управление параметрами петли гистерезиса, является изменение константы магнитной анизотропии; механизмом, обеспечивающим изменение P_{EL} , является спиновая прецессия во встроенном магнитном поле неоднородной магнитной пленки.

С практической точки зрения, полученные значения степени циркулярной поляризации ЭЛ значительно превышают погрешность измерений, что делает сформированные диоды перспективными в системах оптического кодирования информации [1]. Возможность управления коэрцитивным полем позволяет варьировать необходимую величину магнитного поля переключения спинового светоизлучающего диода между двумя состояниями насыщенной намагниченности.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-20186.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D* **40**, R179 (2007).
- [2] Оптическая ориентация / Под ред. Б.П. Захарчени, Ф. Майера. Наука, Л. (1989).
- [3] А.Г. Аронов, Г.Е. Пикус. *ФТП* **10**, 6, 1177 (1976).
- [4] М.В. Дорохин, М.В. Вель, П.Б. Дёмина, А.В. Здоровейцев, А.В. Кудрин, А.В. Рыков, Ю.М. Кузнецов. *ФТТ* **59**, 11, 2135 (2017).
- [5] М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, А.В. Здоровейцев, С.В. Зайцев, А.В. Кудрин. *ЖТФ* **92**, 5, 724 (2022).
- [6] S. Goel, N.H.D. Khang, Y. Osada, L.D. Anh, P.N. Hai, M. Tanaka. *Sci. Rep.* **13**, 2181 (2023).
- [7] G. Salis, R. Wang, X. Jiang, R.M. Shelby, S.S.P. Parkin, S.R. Bank, J.S. Harris. *Appl. Phys. Lett.* **87**, 262503 (2005).
- [8] Zhenhao Sun, Ning Tang, Shixiong Zhang, Shuaiyu Chen, Xingchen Liu, Bo Shen. *Adv. Phys. X* **8**, 1, 2158757 (2023).
- [9] M. Mustaqeem, P.T. Chou, S. Kamal, N. Ahmad, J.-Y. Lin, Y.-J. Lu, X.-H. Lee, K.-H. Lin, K.-L. Lu, Y.-F. Chen. *Adv. Func. Mater* **33**, 19, 213587 (2023).
- [10] 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**, 085310 (2014).
- [11] S. Mooser, J.F.K. Cooper, K.K. Banger, J. Wunderlich, H. Sirringhaus. *Phys. Rev. B* **85**, 235202 (2012).
- [12] M.V. Dorokhin, A.V. Zdoroveyshchev, M.P. Temiryazeva, A.G. Temiryazev, P.B. Demina, O.V. Vikhrova, A.V. Kudrin, I.L. Kalentyeva, M.V. Ved, A.N. Orlova, V.N. Trushin, A.V. Sadvonnikov, D.A. Tatarskiy. *J. Alloys Compd.* **926**, 166956 (2022).
- [13] М.В. Дорохин, П.Б. Дёмина, А.В. Здоровейцев, Д.А. Здоровейцев, А.Г. Темирязов, М.П. Темирязова, И.Л. Калентьева, В.Н. Трушин. *ФТТ* **65**, 6, 989 (2023).
- [14] I.H. Cha, T. Kim, Y.J. Kim, G.W. Kim, Y.K. Kim. *J. Alloys Compd.* **823**, 153744 (2020).
- [15] J.C.A. Huang, T.H. W, A.C. Hsu, L.C. Wu, Y.M. Hu. *J. Magn. Magn. Mater.* **193**, 1–3, 166 (1999).
- [16] *Concepts in spin electronics* / Ed. S. Maekawa. Oxford University Press, N. Y. (2006).
- [17] М.В. Дорохин. Док. дис. Национальный исследовательский Нижегородский гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород (2016).
- [18] T. Amand, B. Doreys, B. Baylac, X. Marie, J. Barrau, M. Brousseau. *Phys. Rev. B* **50**, 16, 11624 (1994).

Редактор Ю.Э. Кутаев