

# Ферромагнитный инжектор CoPt в светоизлучающих диодах Шоттки на основе наноразмерных структур InGaAs/GaAs

© А.В. Здорovejцев<sup>†</sup>, М.В. Дорохин, П.Б. Демина, А.В. Кудрин\*, О.В. Вихрова, М.В. Веда\*, Ю.А. Данилов\*, И.В. Ерофеева, Р.Н. Крюков\*, Д.Е. Николичев\*

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

\* Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, физический факультет, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 25 апреля 2015 г. Принята к печати 12 мая 2015 г.)

Показана возможность создания в спиновом светоизлучающем диоде InGaAs/GaAs ферромагнитного инжектора на основе сплава CoPt (с составом, близким к эквиаtomному), имеющего ярко выраженную перпендикулярную анизотропию намагниченности. Проведено комплексное исследование физических свойств экспериментальных образцов спиновых светоизлучающих диодов. Получена циркулярно-поляризованная электролюминесценция сформированных диодов в нулевом магнитном поле за счет остаточной намагниченности слоев CoPt.

## 1. Введение

Контакты к полупроводниковым структурам на основе ферромагнитных металлов занимают важное место в технологии спинтроники [1]. Большое значение придается задачам создания тонких пленок с осью легкого намагничивания, лежащей параллельно направлению роста [2]. При использовании таких пленок появляются возможности снижения диапазона рабочих магнитных полей и получения остаточной намагниченности без внешнего магнитного поля, что существенно упрощает и удешевляет схемы использования приборов спинтроники. Например, подобные пленки могут найти применение в спиновых светоизлучающих диодах [3]. Перпендикулярная магнитная анизотропия в тонких металлических пленках была продемонстрирована ранее в материалах на основе близких к эквиаtomным сплавам CoPt (наряду со сплавами Co<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub>, Fe<sub>50</sub>Pt<sub>50</sub>, Fe<sub>50</sub>Pd<sub>50</sub>) [1,2]. Такие материалы преимущественно применялись в качестве магнитных сред хранения информации высокой плотности. Цель данной работы — изучение возможности создания эффективного ферромагнитного инжектора в спиновом светоизлучающем диоде InGaAs/GaAs (ССИД) на основе близких к эквиаtomным сплавам CoPt, имеющих ярко выраженную перпендикулярную анизотропию намагниченности.

## 2. Методика эксперимента

Светоизлучающие структуры были сформированы методом газофазной эпитаксии при атмосферном давлении и представляли собой эпитаксиальные слои с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs/GaAs (рис. 1). На поверхность

структур методом электронно-лучевого послойного осаждения наносился ферромагнитный контакт Шоттки на основе сплава CoPt. Отметим, что в литературе основным методом получения пленок CoPt является магнетронное распыление, при этом в качестве материала подложки широко используется MgO различных ориентаций [1,2]. В данной работе был использован альтернативный метод получения CoPt пленок — низкотемпературное электронно-лучевое послойное осаждение атомов Co и Pt (толщины слоев варьировались в диапазоне 0.3–0.5 нм) с последующим 3-часовым высокотемпературным отжигом (300–550 °С) в условиях высокого вакуума. Состав пленки корректировался за счет изменения толщины слоев Co и Pt и определялся методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с послойным профилированием по глубине за счет ионного распыления материала образца [4].

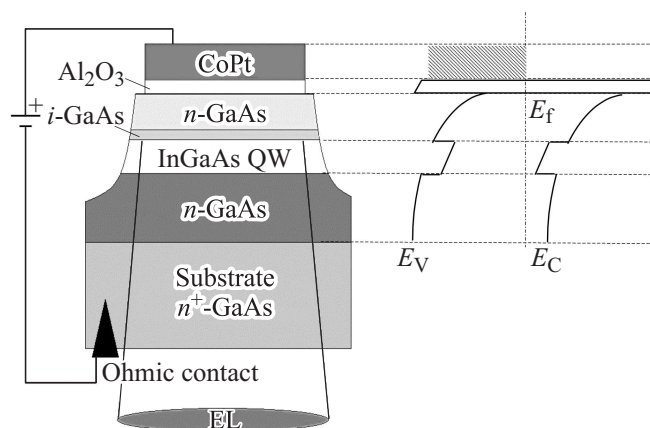


Рис. 1. Схематическое изображение и зонная диаграмма диода в режиме разомкнутой цепи исследованных спиновых светоизлучающих диодов.

<sup>†</sup> E-mail: zdorovei@gmail.com

Для повышения кристаллического качества границы раздела ферромагнетик/полупроводник перед нанесением слоя ферромагнитного материала на поверхность GaAs наносился туннельно-тонкий слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (в качестве диффузионного барьера [5]). По данным электронографических исследований обнаружено, что полученная металлическая пленка имеет структуру поликристалла. В работе проведено комплексное исследование физических свойств полученных экспериментальных образцов.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Исследование намагниченности

Зависимости намагниченности структур со слоем CoPt от внешнего магнитного поля ( $M(H)$ ) были получены при комнатной температуре с использованием магнитометра переменного градиента поля [6]. В случае приложения магнитного поля перпендикулярно поверхности структуры наблюдается петля гистерезиса с выходом намагниченности на насыщение в магнитном поле 70 мТл (рис. 2, кривая 1). При ориентации магнитного поля параллельно поверхности магнитополевая зависимость  $M(H)$  также имеет гистерезисный вид, но не насыщается в максимально доступном для данной установки магнитном поле (165 мТл) (рис. 2, кривая 2). Полученные результаты по исследованию намагниченности позволяют сделать вывод о том, что пленки CoPt обладают перпендикулярной магнитной анизотропией. Обращает на себя внимание ступенчатый вид зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля при ориентации магнитного поля перпендикулярно плоскости структуры (рис. 2, кривая 1). Подобный вид зависимости  $M(H)$  может быть связан с особенностью движения доменных стенок [7].

#### 3.2. Магнитооптические свойства

Магнитооптические свойства пленок исследовались методом экваториального эффекта Керра при комнатной температуре с использованием полупроводниковых лазерных диодов с длиной волны излучения 980 либо 800 нм [8]. Внешнее магнитное поле было приложено в плоскости слоя, но перпендикулярно направлению распространения отраженного от намагниченной поверхности излучения. В данном случае регистрируется изменение интенсивности отраженного излучения от величины магнитного поля. Эта величина пропорциональна намагниченности в плоскости слоя для исследуемого материала.

Магнитооптические зависимости экваториального эффекта Керра образцов структур с пленкой CoPt и со слоем Co при комнатной температуре для длины волны лазерного излучения 800 нм представлены на рис. 3. Из представленных данных можно заключить, что для слоя Co вектор намагниченности расположен в плоскости слоя, поскольку наблюдается быстрый выход

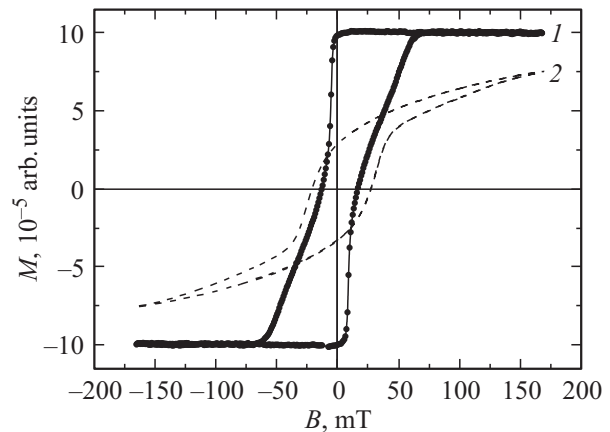


Рис. 2. Магнитооптические зависимости намагниченности при комнатной температуре. Магнитное поле приложено перпендикулярно (кривая 1) и параллельно (кривая 2) плоскости структуры.

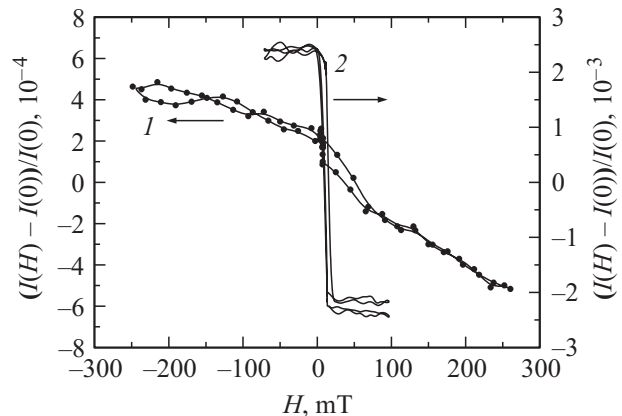


Рис. 3. Магнитооптические зависимости экваториального эффекта Керра образцов структур со слоем CoPt (1) и со слоем Co (2) при комнатной температуре для длины волны лазерного излучения 800 нм.

на насыщение в малых полях (до 100 мТл). Значение коэрцитивного поля при этом составляет около 10 мТл. В случае пленки CoPt насыщение зависимости не наступает вплоть до значений магнитного поля  $\pm 300$  мТл и гистерезис виден очень слабо, что позволяет сделать вывод о преимущественном положении вектора намагниченности слоя вне его плоскости.

#### 3.3. Электролюминесценция и циркулярная поляризация электролюминесценции

Исследования электролюминесценции (ЭЛ) гетероструктур, выращенных на подложках  $n^+$ -GaAs, выполнялись при прямом смещении диодов (на контакт Шоттки подавался положительный по отношению к базе потенциал). Измерения выполнены в диапазоне температур 10–250 К. На спектрах электролюминесценции, измеренных при 77 К, доминирует линия при энергии 1.35 эВ,

соответствующая излучательному переходу в квантовой яме  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ , расположенной в приповерхностной области GaAs (на расстоянии 15 нм от контакта Шоттки). Наличие электролюминесценции в приповерхностной КЯ свидетельствует о том, что Co, диффундирующий из ферромагнитного слоя, вносит минимальные нарушения в структуру приповерхностной области ССИД, что согласуется с данными [9] и подтверждается результатами исследований фотолюминесценции по методике, предложенной в работе [5]. Следует отметить особенность использованной схемы измерений (CoPt/*n*-GaAs), для которой в полупроводник *n*-типа в режиме прямого смещения инжектируются спин-поляризованные дырки. Для инжекции спин-поляризованных электронов можно использовать гетероструктуры *p*-типа в качестве активной области [10].

Измерения циркулярной поляризации электролюминесценции изготовленных диодов проводились при температуре 20 К в криостате замкнутого цикла с электромагнитом. Магнитном поле варьировалось в диапазоне 0–300 мТл и было приложено перпендикулярно плоскости структуры. Значение степени циркулярной поляризации ЭЛ оценивалось из соотношения:  $P_{\text{EL}} = (I_+ - I_-)/(I_+ + I_-)$ , где  $I_+$  ( $I_-$ ) — интенсивности компонент с левой (правой) поляризацией [3].

В представленных на рис. 4 зависимостях степени циркулярной поляризации ЭЛ ( $P_{\text{EL}}$ ) от магнитного поля для структуры с контактом Co (кривая 1) в диапазоне полей до 300 мТл наблюдается близкая к линейной зависимость  $P_{\text{EL}}(B)$ , которая насыщается в больших магнитных полях  $\sim 3.5$  Тл. Для структуры с контактом CoPt (рис. 4, кривая 2) наблюдается нелинейная зависимость с петлей гистерезиса и насыщением в магнитном поле  $\pm 100$  мТл, при этом максимальное значение  $P_{\text{EL}}$  составляет 0.013. Вид кривой  $P_{\text{EL}}(B)$  подобен зависимости намагниченности от магнитного поля (рис. 2, кривая 1). Величина остаточной степени поляризации после выключения магнитного поля составляет 0.012. При увеличении температуры измерения до 250 К (максимальная температура, при которой можно было зафиксировать излучение КЯ) величина максимальной степени поляризации практически не изменяется, наблюдается лишь сужение петли гистерезиса (рис. 4, кривые 2 и 3). Повышение температуры измерений выше 250 К приводит к полному термическому гашению ЭЛ квантовой ямы. Для контрольной структуры, содержащей Au контакт вместо CoPt [5], значение степени циркулярной поляризации в диапазоне магнитных полей 0–300 мТл не превышает погрешности измерений.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что вероятной причиной наблюдаемой в обоих случаях циркулярной поляризации ЭЛ является электрическая инжекция спин-поляризованных дырок из ферромагнитного контакта в GaAs и последующая их рекомбинация с неполяризованными электронами, сопровождающаяся испусканием циркулярно-поляризованного света [3,10]. Значение  $P_{\text{EL}}$  при этом пропорционально

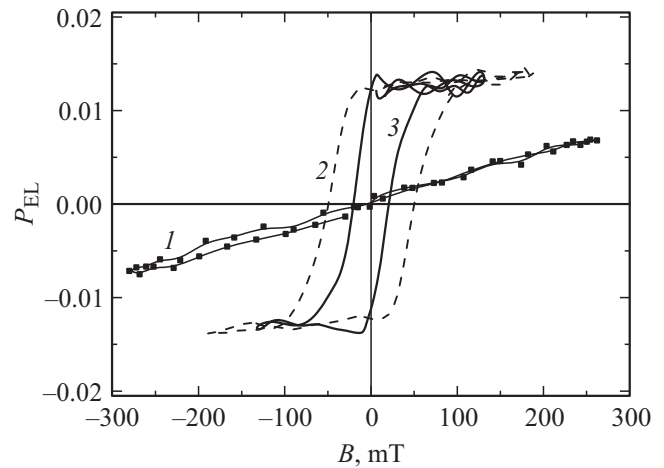


Рис. 4. Зависимость  $P_{\text{EL}}$  от магнитного поля ( $B$ ) для образца с контактом Co при температуре измерения ЭЛ ( $T_{\text{EL}}$ ) 20 К (кривая 1) и CoPt при  $T_{\text{EL}} = 20$  К и 150 К (кривые 2 и 3 соответственно).

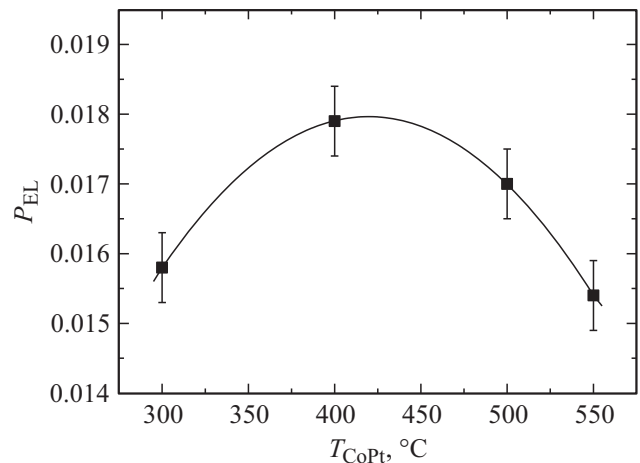


Рис. 5. Зависимость максимального значения  $P_{\text{EL}}$  от температуры отжига пленки  $\text{Co}_{45}\text{Pt}_{55}$  ( $T_{\text{CoPt}}$ ).

намагниченности ферромагнитного контакта, а вид зависимости  $P_{\text{EL}}(B)$  подобен магнитопольевой зависимости намагниченности [3,10–12]. Отличие кривых 1 и 2 на рис. 4 обусловлено различием ферромагнитных свойств Co и CoPt. Для последнего характерна анизотропия намагниченности с осью легкого намагничивания, лежащей в направлении роста структуры, что подтверждается исследованиями на магнитометре (рис. 2, кривая 1). Известно, что для тонкопленочного Co-контакта ось легкого намагничивания лежит в плоскости слоя. В геометрии эксперимента, используемой для структур с КЯ [8–12], это направление перпендикулярно приложенному магнитному полю. Для разворота оси легкого намагничивания и насыщения намагниченности в данном случае требуется приложение магнитного поля величиной до 3.5 Тл [3].

Для структур с контактом на основе CoPt также было обнаружено, что величина степени поляризации в остаточном поле, максимальное значение степени поляризации и величина поля насыщения имеют слабую зависимость от температуры отжига CoPt, а оптимальная температура составляет  $\sim 400^\circ\text{C}$  (рис. 5). Низкотемпературный спад максимального значения степени поляризации можно связать с недостаточным перемещением пленки CoPt при ее формировании, а высокотемпературный спад — с деградацией поверхности исходной полупроводниковой гетероструктуры. Сравнительно небольшое изменение степени поляризации в зависимости от температуры формирования CoPt свидетельствует о том, что промежуточный слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$  является эффективным диффузионным барьером, препятствующим образованию дефектов — центров спинового рассеяния в приповерхностной области GaAs. Это согласуется с данными исследований интенсивности электролюминесценции, приведенными выше. Состав многослойной пленки CoPt, напротив, существенно влияет на анизотропию намагниченности и степень циркулярной поляризации. Наибольшая степень циркулярной поляризации излучения  $P_{\text{EL}} \approx 0.018$  была получена при содержании Co  $\approx 45$  ат%. После увеличения содержания Co до  $\approx 50$  ат% максимальная степень поляризации существенно уменьшилась до  $P_{\text{EL}} \approx 0.008$ , а величина остаточной намагниченности снизилась до уровня погрешности измерений. При содержании Co  $\approx 57$  ат% зависимость  $P_{\text{EL}}(B)$  может быть описана линейной функцией и подобна зависимости для однородной пленки Co (рис. 4, кривая 1). Сильную зависимость  $P_{\text{EL}}$  от состава CoPt мы связываем с преимущественным формированием кристаллитов  $L1_1\text{-Co}_{50}\text{Pt}_{50}$  [1] с осью легкого намагничивания, направленной по нормали к пленке, при содержании Co  $\approx 45$  ат%.

#### 4. Заключение

Методом электронно-лучевого послойного осаждения в высоком вакууме были получены ферромагнитные пленки CoPt с составом, близким к эквивалентному. Показано, что данные пленки имеют ярко выраженную анизотропию намагниченности с преимущественным положением оси легкого намагничивания перпендикулярно плоскости пленки. Показана возможность использования пленок CoPt в качестве ферромагнитных инжекторов в спиновых светоизлучающих диодах, работающих при температурах, близких к комнатным (до 250 К), в сравнительно узком диапазоне рабочих полей до  $\pm 100$  мТл. Исследована зависимость эффективности СИИД данной конструкции от температуры формирования и состава пленки CoPt. Пленки CoPt, полученные методом электронно-лучевого осаждения в условиях высокого вакуума, могут найти применение не только при производстве СИИД, но и в ряде других приборов спинтроники (системы магнитной памяти со сверхвысокой плотно-

стью записи, высокочувствительные датчики магнитного поля и др.) благодаря экономичности и технологичности данного метода по сравнению с используемыми на данный момент сверхвысоковакуумными (УНВ) системами.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (15-02-07824а, 14-07-31280 мол\_а) и государственных заданий Министерства образования и науки России (8.1054.2014/К, 3.285.2014/К, 2014/134).

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращивание полупроводниковых структур и Е.А. Питиримовой за выполненные электронографические исследования.

#### Список литературы

- [1] H. Sato, T. Shimatsu, Y. Okazaki, H. Muraoka, H. Aoi, S. Okamoto, O. Kitakami. *J. Appl. Phys.*, **103**, 07E114 (2008).
- [2] П.Д. Ким, И.А. Турпанов, С.В. Столяр, Р.С. Исхаков, В.И. Юшков, А.Я. Бетенькова, Л.А. Ли, Е.В. Бондарева, Т.Н. Исаева, М.М. Карпенко. *ЖТФ*, **74** (4), 53 (2004).
- [3] N.V. Baidus, M.I. Vasilevskiy, M.J.M. Gomes, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, E.A. Uskova, B.N. Zvonkov, V.D. Kulakovskii, A.S. Brichkin, A.V. Chernenko, S.V. Zaitsev. *Appl. Phys. Lett.*, **89** (18), 181 118 (2006).
- [4] Д.Е. Николичев, А.В. Боряков, С.Ю. Зубков, Р.Н. Крюков, М.В. Дорохин, А.В. Кудрин. *ФТП*, **48** (6), 839 (2014).
- [5] А.И. Бобров, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейцев, Н.В. Малехонова, Е.И. Малышева, Д.А. Павлов, С. Сайед. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 7, 57 (2015).
- [6] P.J. Flanders. *J. Appl. Phys.*, **63**, 3940 (1988).
- [7] J.R. Barnes, S.J. O'Shea, M.E. Welland, J.-Y. Kim, J.E. Evetts, R.E. Smeekh. *J. Appl. Phys.*, **76**, 2974 (1994).
- [8] О.В. Вихрова, Ю.А. Данилов, М.В. Дорохин, Ю.Н. Дроздов, Б.Н. Звонков, А.В. Здоровейцев, А.В. Кудрин, И.Л. Калентьева. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **77** (1), 79 (2013).
- [9] Е.А. Ускова, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, П.Б. Дёмина, Е.И. Малышева, Е.А. Питиримова, Ф.З. Гильмутдинов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 2, 89 (2016).
- [10] Н.В. Байдусь, П.Б. Демина, М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, Е.И. Малышева, Е.А. Ускова. *ФТП*, **39** (1), 25 (2005).
- [11] M. Holub, P. Bhattacharya. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40** (11), R179 (2007).
- [12] C.H. Li, G. Kioseoglou, O.M.J. van 't Erve, A.T. Hanbicki, V.T. Jonker, R. Mallory, M. Yasar, A. Petrou. *Appl. Phys. Lett.*, **85** (9), 1544 (2004).

Редактор Т.А. Полянская

## **Ferromagnetic CoPt injector in light-emitting Schottky diodes, based on nanostructures InGaAs/GaAs**

*A.V. Zdoroveyshchev, M.V. Dorokhin, P.B. Demina, A.V. Kudrin\*, O.V. Vikhrova, M.V. Ved'\*, Yu.A. Danilov\*, I.V. Erofeeva, R.N. Krjukov\*, D.E. Nikolichev\**

Physicotechnical Research Institute  
of Lobachevsky State University,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia  
\* Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The possibility of fabrication of a near-equiatomic CoPt alloy ferromagnetic spin injector for the InGaAs/GaAs light-emitting diodes was demonstrated. This injector possesses pronounced perpendicular anisotropy of magnetization. The comprehensive study of the physical properties of spin light-emitting diodes was performed. The circularly polarized electroluminescence of the diodes in zero magnetic field due to the remanent magnetization of CoPt layers was obtained.