

13,05

Детекторы циркулярно-поляризованного излучения на основе полупроводниковых гетероструктур с барьером Шоттки CoPt

© А.В. Кудрин^{1,2}, А.В. Здравейцев^{1,2}, О.В. Вихрова¹, М.В. Дорохин^{1,2}, И.Л. Калентьева¹, П.Б. Дёмина¹

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Физический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: kudrin@nifti.unn.ru

Показана возможность практической реализации детекторов циркулярно-поляризованного излучения на основе планарного фоторезистора, использующего эффект магнито-циркулярного дихроизма в слое CoPt, а также на основе структур, использующих эффект спиновой фильтрации слоем CoPt фотогенерированных поляризованных по спину носителей заряда. Установлено, что процесс спиновой фильтрации позволяет увеличить эффективность детектирования до 1.3%.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания — проект № 8.1751.2017/ПЧ Минобрнауки России и при поддержке РФФИ (гранты №17-37-80008_мол_эв_а, 16-07-01102_а).

DOI: 10.21883/FTT.2018.11.46669.11NN

1. Введение

Приборы на основе спин-зависимых эффектов являются важной составляющей современной полупроводниковой технологии. Одним из базовых элементов спинтроники является детектор циркулярно-поляризованного излучения (ЦПИ) — прибор, реализующий связь электрической величины (тока или напряжения) со знаком и степенью поляризации света при фиксированном магнитном поле [1]. Такие детекторы могут быть частью системы оптической передачи данных в электронно-оптических интегральных схемах.

Одним из основных направлений по созданию детекторов циркулярно-поляризованного излучения является использование систем „ферромагнитный металл/полупроводниковая структура“. Анализ работ, описывающих конструкцию фотодетекторов, показывает, что большинство из них сформировано на основе полупроводниковых структур A_3B_5 , а в качестве ферромагнитного слоя в основном используются металлические материалы, для которых установлена возможность эффективной спиновой инжекции (Fe, NiFe, CoFe, CoFeB) [2–4].

Ранее нами была предложена планарная конструкция детектора ЦПИ на основе МДП-структуры с ферромагнитным слоем CoPt [5]. Металлический сплав CoPt сохраняет ферромагнитные свойства при комнатной температуре, имеет ось легкого намагничивания, расположенную перпендикулярно поверхности структуры и обладает остаточной намагниченностью, близкой по величине к намагниченности насыщения [6].

МДП-структура состояла из проводящего слоя $In_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.1–0.15$), сформированного методом

МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ) на пластине полупроводникового GaAs, слоев комбинированного диэлектрика Al_2O_3/SiO_2 и сплава CoPt [5]. Относительно толстый (200 nm) слой диэлектрика между слоем InGaAs и пленкой CoPt обеспечивал электрическую изоляцию относительно высокоомного полупроводника от металлического сплава CoPt. При этом детектор функционировал в режиме фотосопротивления. Количество фотогенерированных носителей заряда в слое InGaAs при облучении светом с левой и правой циркулярной поляризацией было пропорционально коэффициенту пропускания слоя CoPt для левой и правой поляризации света (эффект магнито-циркулярного дихроизма — МЦД). Следовательно, продольное сопротивление слоя InGaAs было различно при облучении светом с разным знаком циркулярной поляризации.

В настоящей работе представлены: 1) результаты дальнейшего развития конструкции детектора типа фоторезистора; 2) результаты создания фотодетектора циркулярно-поляризованного излучения, функционирующего с использованием эффекта спиновой фильтрации.

2. Методика эксперимента

Изготовление структур для детекторов было реализовано в два этапа. Полупроводниковые слои: буфер GaAs (толщиной ≈ 100 nm) и слой $In_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.1–0.15$) толщиной 200–250 nm, формировались на подложках GaAs методом МОСГЭ при 600°C. Диэлектрический слой Al_2O_3 (около 2 nm) и металлический сплав $Co_{0.45}Pt_{0.55}$ (8 nm) были изготовлены в едином ростовом цикле с применением метода электронно-лучевого ис-

парения (ЭЛИ) в вакууме при температуре 200–400°C. Диэлектрические и металлические слои наносились через специальную маску, затем с использованием фотолитографии и химического травления полупроводниковых слоев формировались образцы двух типов: 1) детектор циркулярно-поляризованного излучения типа фоторезистора на подложках *i*-GaAs; 2) детектор циркулярно-поляризованного излучения, функционирующий с использованием эффекта спиновой фильтрации на подложках $n^+(p^+)$ -GaAs.

Эффективность детектирования ЦПИ ($D_{\text{Эфф}}$) определялась по разнице в падении напряжения на омических контактах детекторов при освещении 100% лево- (V_L) или право-поляризованным (V_R) излучением: $D_{\text{Эфф}} = 100\% \cdot (V_L - V_R)/(V_L + V_R)$. В качестве источника света использовалась галогенная лампа накаливания. Направление циркулярной поляризации излучения определяло положение четвертьволновой пластины. Структура помещалась в магнитное поле напряженностью до $H = \pm 1900$ Ое, ориентированное перпендикулярно плоскости детекторов. Дополнительно проводились измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур. Все исследования проведены при комнатной температуре.

3. Экспериментальные результаты

В процессе исследований было установлено, что для создания детектора циркулярно-поляризованного излучения на основе фоторезистивной структуры диэлектрик между проводящим полупроводниковым слоем (в частности InGaAs) и слоем CoPt может быть значительно тоньше, чем ранее нами использованный слой комбинированного диэлектрика $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ общей толщиной ~ 200 нм [5]. При нанесении слоя CoPt на полупроводниковый слой (InGaAs или GaAs) через тонкий диэлектрический слой Al_2O_3 (около 2 нм) формируется барьер Шоттки, который предотвращает утечку тока из полупроводникового слоя в слой CoPt. Кроме того, диэлектрический слой в этом случае предотвращает диффузию Co в полупроводник. На вставке к рис. 1 представлена подтверждающая наличие барьера Шоттки ВАХ структуры CoPt (8 нм)/ Al_2O_3 (2 нм)/ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ (200 нм)/*i*-GaAs, измеренная при комнатной температуре при создании разности потенциалов между слоем CoPt площадью 32 mm^2 и слоем InGaAs ($n_v = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Магнитополевая зависимость эффективности детектирования ЦПИ, полученная для фоторезистивной структуры при комнатной температуре (длина волны 632.8 нм) приведена на рис. 1. Видно, что максимальная величина $D_{\text{Эфф}}(H)$ для детектора данного типа, определяемая эффектом магнито-циркулярного дихроизма в слое CoPt, составляет $\sim 0.5\%$.

Эффективность детектирования циркулярно-поляризованного излучения может быть увеличена путем использования дополнительно к эффекту МЦД эффекта

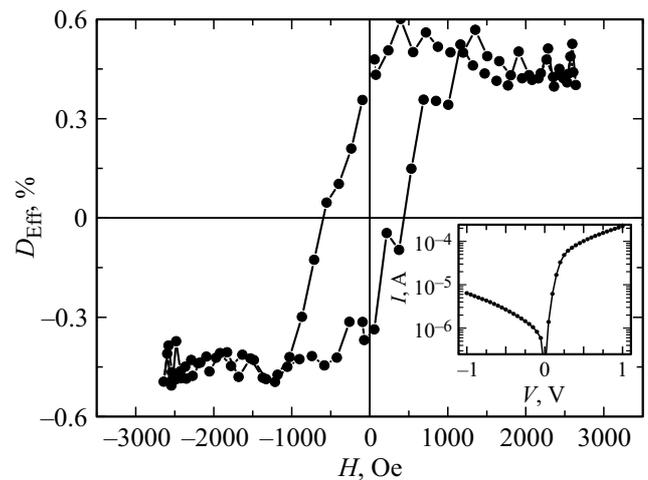


Рис. 1. Магнитополевые зависимости эффективности детектирования ЦПИ для фоторезистивного детектора CoPt (8 нм)/ Al_2O_3 (2 нм)/ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ (200 нм)/*i*-GaAs. На вставке приведена ВАХ при создании разности потенциалов между контактом CoPt площадью 32 mm^2 и слоем InGaAs ($n_v = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$).

спиновой фильтрации. Данный процесс определяется зависимостью величины тока фотогенерированных спин-поляризованных носителей заряда от намагниченности металлического слоя CoPt. При облучении циркулярно-поляризованным светом в объеме полупроводника генерируются спин-поляризованные носители заряда. Эти носители притягиваются к области ферромагнитного металлического контакта электрическим полем потенциального барьера. Прохождение спин-поляризованных носителей через такой контакт зависит от направления его намагниченности, которая управляется внешним магнитным полем. Таким образом, с помощью магнитного поля осуществляется управление сигналом фотодиода, содержащего ферромагнитный слой в качестве спинового фильтра.

Формирование барьера Шоттки в структуре CoPt/ Al_2O_3 /InGaAs(GaAs)/ $n^+(p^+)$ GaAs позволило создать детектор циркулярно-поляризованного излучения с поперечным протеканием тока. Схематичное изображение структуры для фотодетектора приведено на рис. 2, а. Измерение вольт-амперных характеристик подтвердило формирование качественных барьеров Шоттки с темновыми обратными токами $\sim 10^{-8}$ А.

На рис. 2, б представлены магнитополевые зависимости эффективности детектирования циркулярно-поляризованного лазерного излучения с длиной волны 632.5 нм для структуры CoPt (8 нм)/ Al_2O_3 (2 нм)/ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ (200 нм, $n_v = 7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)/ n^+ -GaAs. При регистрации эффективности детектирования в режиме разомкнутой цепи, величина $D_{\text{Эфф}}$ определяется эффектом МЦД и составляет $\sim 0.3\%$ (зависимость I). В этом случае эффективность детектирования сравнима по величине с $D_{\text{Эфф}}$ для фоторезистивного детектора ЦПИ (рис. 1). При регистрации $D_{\text{Эфф}}(H)$ в

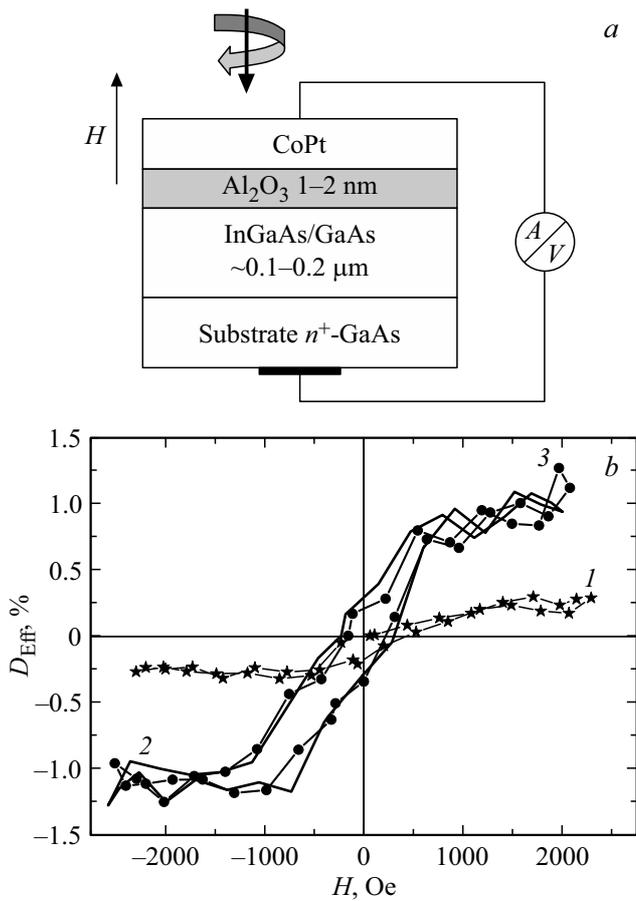


Рис. 2. *a* — конструкция с поперечным протеканием тока. *b* — магнитопольные зависимости эффективности детектирования ЦПИ фотодетектора на основе барьера Шоттки при 295 К: 1) в режиме разомкнутой цепи (вклад МЦД); в режиме замкнутой цепи, при приложении различного напряжения — 2) 0 В, 3) –2 В.

режиме замкнутой цепи (рис. 2, *b*), приложенное к контакту CoPt относительно подложки n^+ -GaAs напряжение составляло 0 и –2В (зависимости 2 и 3 соответственно). Видно, что эффективность детектирования циркулярно-поляризованного излучения значительно возрастает благодаря вкладу от эффекта спиновой фильтрации. Величина $D_{\text{Эфф}}$ достигает 1.3% в магнитном поле до 1900 Oe при комнатной температуре.

В указанной геометрии также была реализована и исследована конструкция детектора ЦПИ на основе гетероструктур, использующихся для создания спиновых светоизлучающих диодов (ССИД) со слоем CoPt [6]. Гетероструктуры содержали подложку n^+ (p^+)-GaAs, буферный слой n (p)-GaAs, квантовую яму InGaAs, покровный слой GaAs, дельта-легированный углеродом (в случае подложки n^+ -GaAs) или кремнием (p^+ -GaAs — подложка). На поверхность структур методом электронно-лучевого испарения наносился тонкий (1–2 nm) слой диэлектрика Al_2O_3 и слой CoPt. Затем с использованием фотолитографии и химического

травления формировались меза-структуры диаметром 500 μm (рис. 3, *a*). Изготовленные светодиоды испускали циркулярно-поляризованное электролюминесцентное излучение с длиной волны около 1 μm в широком диапазоне температур (от 10 до 300 К).

В случае применения ССИД в качестве детектора, циркулярно-поляризованное излучение с длиной волны 632.5 nm заводи́ли со стороны контакта CoPt. Установлено, что в данном случае также наблюдается возрастание величины $D_{\text{Эфф}}$ в режиме замкнутой цепи (учет эффекта спиновой фильтрации дополнительно к МЦД) относительно режима разомкнутой цепи (использование только МЦД). Эффективность детектирования $D_{\text{Эфф}}$ составляет $\approx 1.3\%$ (при 300 К), при этом вклад МЦД не превышает 0.3%. Величина $D_{\text{Эфф}} \approx 1\%$ обусловлена эффектом спиновой фильтрации (рис. 3, *b*). Следует отметить, что

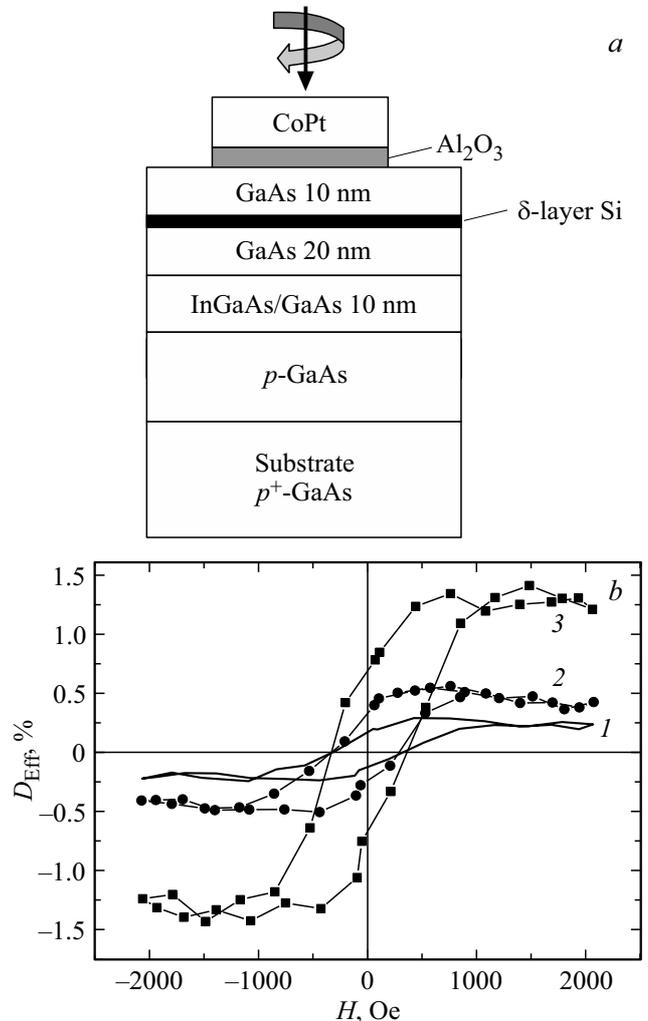


Рис. 3. *a* — конструкция детектора ЦПИ на основе гетероструктур, использующихся для создания спиновых светоизлучающих диодов. *b* — магнитопольные зависимости эффективности детектирования ЦПИ при 295 К при приложении различного напряжения: 1) в режиме разомкнутой цепи (вклад МЦД); в режиме замкнутой цепи, при приложении различного напряжения — 2) 0 В, 3) –2 В.

в случае применения ССИД в качестве детектора одна и та же структура может служить как источником, так и детектором ЦПИ. Данный факт делает перспективной возможность практической реализации спинового оптрона, прибора, включающего в себя спиновый светоизлучающий диод и фотодетектор ЦПИ, интегрированные на единой подложке.

4. Заключение

Таким образом, в процессе выполнения работы были исследованы два типа конструкций детекторов циркулярно-поляризованного излучения на основе гетероструктур InGaAs/GaAs с CoPt: 1) детектор циркулярно-поляризованного излучения типа фоторезистора на подложках *i*-GaAs; 2) детектор циркулярно-поляризованного излучения, функционирующий с использованием эффекта спиновой фильтрации на подложках $n^+(p^+)$ -GaAs.

Показана возможность использования тонкого диэлектрического слоя Al₂O₃ (толщиной ~ 2 nm) в конструкции детектора циркулярно-поляризованного излучения типа фоторезистора. При этом величина эффективности детектирования ЦПИ, определяемая эффектом магнито-циркулярного дихроизма в слое CoPt, составляет ~ 0.5%.

Установлено, что детектор циркулярно-поляризованного излучения, функционирующий с использованием эффекта спиновой фильтрации, позволяет достичь эффективности детектирования ~ 1.3%. При этом вклад, обусловленный эффектом магнито-циркулярного дихроизма, составляет около 0.3%. Продемонстрировано использование полупроводниковой гетеронаноструктуры InGaAs/GaAs с барьером Шоттки CoPt в качестве спинового светоизлучающего диода и детектора циркулярно-поляризованного излучения с эффектом спиновой фильтрации.

Необходимо отметить, что полученные результаты по величинам эффективности детектирования представленных нами образцов детекторов ЦПИ соответствуют мировым достижениям в данной области. Так, в работе [1] максимально зафиксированная величина D_{eff} составляла ~ 1% для детектора с конструкцией, подобной ССИД (Co₂FeSi/InGaAs/GaAs) в магнитном поле 5 Т.

Перспектива практического применения разработанных конструкций детекторов при создании оптоэлектронных интегральных схем обусловлена такими достоинствами полученных приборов, как возможность их использования при комнатной температуре и в отсутствии внешнего магнитного поля (благодаря сохранению величины остаточной намагниченности слоя CoPt на уровне намагниченности насыщения).

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за изготовление полупроводниковых структур методом МОС-гидридной эпитаксии.

Список литературы

- [1] R. Farshchi, M. Ramsteiner, J. Herfort, A. Tahraoui, H.T. Grahn. Appl. Phys. Lett. **98**, 162508 (2011).
- [2] A. Hirohata, Y.B. Xu, C.M. Guertler, J.A.C. Bland. J. Appl. Phys. **87**, 4670 (2000).
- [3] Y.H. Li. Condens. Mater. Phys. **15**, 13701 (2012).
- [4] C. Rinaldi, M. Cantoni, D. Petti, R. Bertacco. J. Appl. Phys. **111**, 07C312 (2012).
- [5] А.В. Кудрин, М.В. Дорохин, А.В. Здоровейцев, П.Б. Дёмина, О.В. Вихрова, И.Л. Калентьева, М.В. Ведь. ФТТ **11**, 2203 (2017).
- [6] А.В. Здоровейцев, М.В. Дорохин, О.В. Вихрова, А.В. Кудрин, П.Б. Демина, А.Г. Темирязов, М.П. Темирязева. ФТТ **58**, 2186 (2016).

Редактор К.В. Емцев

Публикация материалов Симпозиума завершена.