

13,05

## Фоторезистивный детектор циркулярно-поляризованного излучения на основе МДП-структуры со слоем CoPt

© А.В. Кудрин<sup>1,2</sup>, М.В. Дорохин<sup>1,2</sup>, А.В. Здоровейцев<sup>1,2</sup>, П.Б. Дёмина<sup>1</sup>, О.В. Вихрова<sup>1</sup>, И.Л. Калентьева<sup>1</sup>, М.В. Ведь<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: kudrin@nifti.unn.ru

Создан фоторезистивный детектор циркулярно-поляризованного излучения на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник CoPt/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/InGaAs/GaAs. Эффективность детектирования циркулярно-поляризованного излучения составляет 0.75% при комнатной температуре. Работа детектора основана на проявлении эффекта магнитоциркулярного дихроизма в слое CoPt — зависимости коэффициента пропускания CoPt от знака циркулярной поляризации света и намагниченности.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания (проект № 8.1751.2017/ПЧ Минобрнауки России), при поддержке РФФИ (гранты 17-37-80008 мол\_эв\_а, 16-07-01102\_а) и гранта (МК-8221.2016.2) Президента Российской Федерации.

DOI: 10.21883/FTT.2017.11.45062.17k

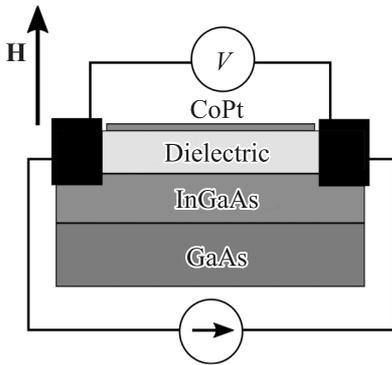
### 1. Введение

Детекторы циркулярно-поляризованного излучения (ЦПИ), демонстрирующие связь электрической величины (тока или напряжения) со знаком и степенью поляризации света, могут быть использованы в системах оптической передачи информации. В частности, такие детекторы могут быть частью системы оптической передачи данных в электронно-оптических интегральных схемах. Основным направлением по созданию детекторов циркулярно-поляризованного излучения является использование систем „ферромагнитный металл/полупроводниковая структура“. Вариантами таких систем являются структуры металл/полупроводник с барьером Шоттки [1], металл/туннельный диэлектрический слой/полупроводник [2], металл/*p-i-n*-фотодиод [3,4]. В качестве ферромагнитных металлов используются слои Fe, NiFe, Co, CoFeB, CoFeSi. Работа таких детекторов основана на эффекте спиновой фильтрации фотовозбужденных носителей заряда на интерфейсе ферромагнетик/полупроводник. Облучение полупроводниковой области циркулярно-поляризованным светом приводит к возникновению в ней поляризованных по спину носителей заряда. Для спин-поляризованных носителей заряда различаются вероятности прохождения через барьер ферромагнетик/полупроводник, что приводит к зависимости величины фототока через структуру от направления циркулярной поляризации света или намагниченности ферромагнитного контакта. Для функционирования указанных приборов необходимо протекание тока перпендикулярно слоям структуры. Нами предложен альтернативный вариант детектора циркулярно-поляризованного излучения с протеканием тока вдоль

плоскости структуры и основанного на использовании эффекта магнитоциркулярного дихроизма (МЦД).

### 2. Методика эксперимента

Магнитоциркулярный дихроизм выражается в различии коэффициента отражения (и пропускания) в ферромагнитном материале для лево- и правоциркулярно-поляризованных компонент света. Изготовленный детектор функционирует за счет комбинации эффектов МЦД в ферромагнитном слое CoPt и фотопроводимости в слое InGaAs. На подложке *i*-GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии при температуре 600°C были выращены буферный слой GaAs (толщиной ≈ 100 nm) и слой InGaAs (толщиной ≈ 200 nm). Содержание индия в слое In<sub>*x*</sub>Ga<sub>1-*x*</sub>As составляло  $x_{\text{In}} = 0.11\%$ . Легирование слоев в процессе роста не проводилось. На поверхности полупроводниковой структуры методом электронно-лучевого испарения (ЭЛИ) создавался слой комбинированного диэлектрика Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> общей толщиной 170 nm. Далее также методом ЭЛИ на диэлектрик наносился слой Co<sub>0.45</sub>Pt<sub>0.55</sub> толщиной 8 nm. Назначение диэлектрика заключается в электрической изоляции относительно высокоомного слоя InGaAs от более проводящего слоя CoPt при исследовании планарной фотопроводимости структуры. К слою InGaAs создавались In омические контакты. Таким образом, формировалась структура фоторезистивного элемента, которая демонстрировала *p*-тип проводимости и имела величину темнового слоевого сопротивления 89 kΩ<sup>-2</sup>. На рис. 1 представлено схематическое изображение структуры. Исследование фотопроводимости проводилось при освещении структуры через слой CoPt. В каче-



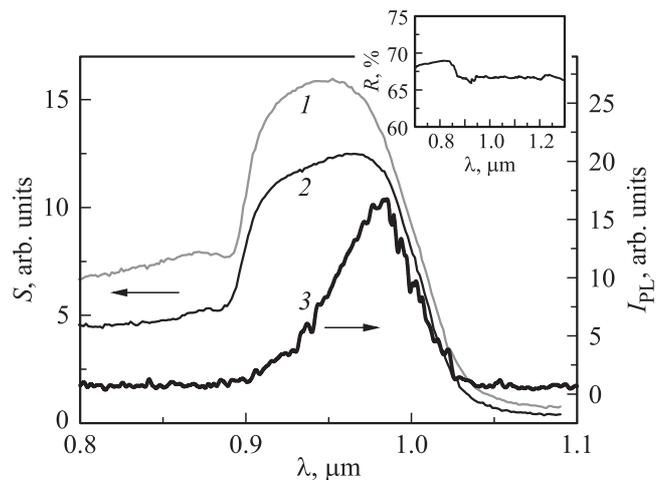
**Рис. 1.** Схематическое изображение фоторезистора для детектирования циркулярно-поляризованного излучения.

стве источника света использовалась галогенная лампа накаливания, излучение от которой пропускалось через монохроматор. Выходящий из монохроматора свет проходил через опто-механический модулятор, далее через линейный поляризатор и затем через четвертьволновую ( $\lambda/4$ ) пластину. Положение четвертьволновой пластины определяло направление циркулярной поляризации света, падающего на фоторезистор перпендикулярно поверхности CoPt. Структура помещалась в магнитное поле напряженностью до  $\pm 1900$  Ое, ориентированное перпендикулярно плоскости. При каждом значении магнитного поля проводилось поочередное освещение структуры лево- ( $L$ ) и право- ( $R$ ) 98% поляризованным светом. Эффективность детектирования ЦПИ определялась следующим образом:  $(V_L - V_R)/(V_L + V_R)$ , где  $V_L$  и  $V_R$  падение напряжения на омических контактах структуры при освещении светом соответствующей поляризации. Величина напряжения на омических контактах регистрировалась фазочувствительным вольтметром, работающим на частоте опто-механического модулятора (170 Hz). Через слой InGaAs пропусклся постоянный ток величиной  $10 \mu\text{A}$ . Спектры фотопроводимости  $S(\lambda)$  были получены в диапазоне  $0.8-1.1 \mu\text{m}$  без использования линейного поляризатора и пластины  $\lambda/4$ . Величина  $S(\lambda)$  определялась как спектральная зависимость возникающего на контактах напряжения  $V(\lambda)$ , отнесенного к интенсивности излучения лампы  $I_L(\lambda)$ . Фотолуминесценция слоя InGaAs получена при возбуждении через слой диэлектрика лазером с длиной волны  $450 \text{ nm}$ . Спектральные зависимости коэффициента отражения от слоя CoPt в диапазоне  $0.7-1.3 \mu\text{m}$  были записаны с использованием спектрофотометра Varian Cary 6000i. Магнитолевые зависимости намагниченности  $M(H)$  структуры получены с использованием магнетометра переменного градиента силы в диапазоне напряженности внешнего магнитного поля  $\pm 1700$  Ое. Для оценки величины магнитоциркулярного дихроизма в слое CoPt была получена структура, представляющая собой аналогичный слой CoPt, нанесенный непосредственно на GaAs-подложку. Магнитолевая зависимость величины магнитоциркулярного дихроизма в слое CoPt исследо-

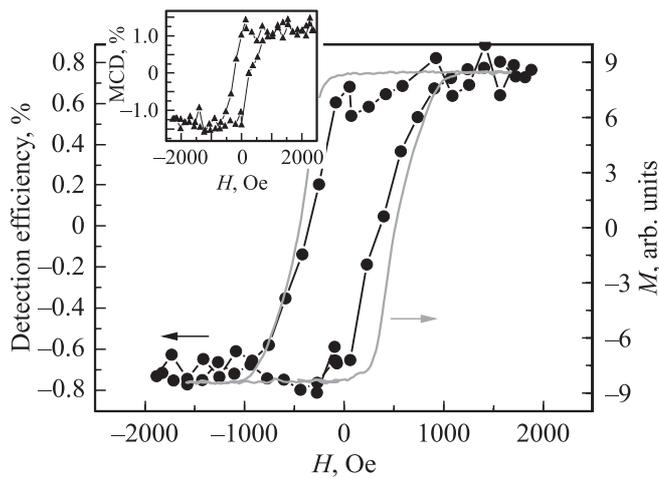
валась путем пропускания через структуру CoPt/GaAs неполяризованного света с длиной волны  $920 \text{ nm}$ . Структура CoPt/GaAs помещалась в магнитное поле (ориентированное перпендикулярно плоскости). Свет, прошедший через структуру CoPt/GaAs, приобретал частичную циркулярную поляризацию, величина которой определялась с использованием четвертьволновой пластины и линейного поляризатора. Все исследования проведены при комнатной температуре.

### 3. Экспериментальные результаты

На рис. 2 кривой 1 представлен спектр фотопроводимости  $S(\lambda)$  при облучении структуры через слой диэлектрика. Спектр  $S(\lambda)$  для исходной структуры без диэлектрика выглядит аналогично. На спектре присутствует ярко выраженный длинноволновый спад, связанный с фундаментальным краем поглощения ( $E_g$ ) слоя InGaAs. Длинноволновый край поглощения, определенный по критерию Мосса из зависимости 1, соответствует длине волны  $\approx 1 \mu\text{m}$ . Эта величина близка к положению пика фотолуминесценции  $0.98 \mu\text{m}$  (кривая 3 на рис. 3). Полученные значения хорошо согласуются с величиной ширины запрещенной зоны  $E_g$  ( $1.26 \text{ eV}$  ( $0.984 \mu\text{m}$ )) для твердого раствора  $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ . На длине волны  $\approx 0.9 \mu\text{m}$  кривая 1 содержит характерный для фотопроводимости коротковолновый спад. Спектр 2 на рис. 2 соответствует  $S(\lambda)$  при облучении структуры через слой CoPt. Вид спектра  $S(\lambda)$  в этом случае качественно совпадает со спектром при облучении структуры через диэлектрик, следовательно, спектр поглощения CoPt в исследуемом диапазоне не имеет значительных особенностей. Это согласуется со слабой спектральной зависимостью коэффициента отражения для слоя CoPt, представленного на вставке к рис. 2.



**Рис. 2.** Спектральные зависимости фотопроводимости при облучении структуры через слой диэлектрика (кривая 1) и через слой CoPt (кривая 2). Зависимость 3 — спектр фотолуминесценции слоя InGaAs. На вставке приведена спектральная зависимость коэффициента отражения для слоя CoPt.



**Рис. 3.** Магнитополевая зависимость намагниченности структуры (непрерывная линия) и эффективность детектирования циркулярно-поляризованного света (символы). На вставке представлена магнитополевая зависимость величины магнитоциркулярного дихроизма (МЦД) в слое CoPt, нанесенном на GaAs подложку.

На рис. 3 непрерывной линией представлена магнитополевая зависимость намагниченности исследуемого фоторезистора при ориентации внешнего магнитного поля перпендикулярно плоскости структуры. Очевидно, что зависимость  $M(H)$  соответствует магнитополевой зависимости намагниченности слоя CoPt. Слои CoPt, полученные используемым методом ЭЛИ, обладают ярко выраженной перпендикулярной магнитной анизотропией [5]. На рис. 3 символами представлена зависимость эффективности детектирования циркулярно-поляризованного излучения от величины внешнего магнитного поля при комнатной температуре для длины волны падающего излучения  $0.96 \mu\text{m}$  (на максимуме спектральной зависимости фотопроводимости (рис. 2, кривая 2)). На вставке к рис. 3 представлена магнитополевая зависимость величины магнитоциркулярного дихроизма в слое CoPt, нанесенном на GaAs-подложку. Вид зависимости эффективности детектирования ЦПИ от магнитного поля совпадает с видом магнитополевой зависимости намагниченности структуры и с видом магнитополевой зависимости магнитоциркулярного дихроизма для структуры CoPt/GaAs. Наибольшая величина эффективности детектирования составляет  $\approx 0.75\%$  и соответствует выходу намагниченности слоя CoPt на насыщение. Величина эффективности детектирования согласуется с наблюдаемой величиной магнитоциркулярного дихроизма для структуры CoPt/GaAs ( $\approx 1.2\%$ , вставка к рис. 3). Наличие эффекта магнитоциркулярного дихроизма в слое CoPt приводит к зависимости коэффициентов отражения и пропускания слоя CoPt от направления циркулярной поляризации света и намагниченности слоя (определяемой внешним магнитным полем). Результатом этого является различие в количестве фотовозбужденных носителей в слое InGaAs, что

приводит к различию в сопротивлении слоя InGaAs и соответственно в регистрируемом значении напряжения. Обращает на себя внимание, что благодаря остаточной намагниченности CoPt, равной по величине намагниченности насыщения, эффективность детектирования лево- и правоциркулярно-поляризованных компонент света сохраняет свое максимальное значение и в отсутствии внешнего магнитного поля.

Величина эффективности детектирования ЦПИ может быть повышена путем увеличения толщины слоя CoPt, поскольку величина МЦД, определяющая эффективность детектирования, пропорциональна толщине поглощающего магнитного слоя. В дальнейшем планируется исследование зависимости величины эффективности детектирования циркулярно-поляризованного излучения от толщины ферромагнитного слоя, его типа (CoPt, CoPd, CoFe), длины волны излучения.

#### 4. Заключение

С использованием методов МОС-гидридной эпитаксии и электронно-лучевого испарения в вакууме получена структура CoPt/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/InGaAs/i-GaAs, являющаяся детектором циркулярно-поляризованного излучения. Детектор функционирует на основе комбинации эффектов фотопроводимости и магнитоциркулярного дихроизма. Эффективность детектирования циркулярно-поляризованного излучения составляет  $\approx 0.75\%$  при комнатной температуре, в том числе при отсутствии внешнего магнитного поля, благодаря сохранению остаточной намагниченности слоя CoPt.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за выращивание полупроводниковой части структуры.

#### Список литературы

- [1] S.T. Ruggiero, A. Williams, C.E. Tanner, S. Potashnik, J. Moreland, W.H. Rippard. Appl. Phys. Lett. **82**, 4599 (2003).
- [2] Y.J. Park, M.C. Hickey, M.J. Van Veenhuizen, J. Chang, D. Heiman, C.H. Perry, J.S. Moodera. J. Phys.: Condens. Matter. **23**, 116002 (2011).
- [3] R. Farshchi, M. Ramsteiner, J. Herfort, A. Tahaoui, H.T. Grahn. Appl. Phys. Lett. **98**, 162508 (2011).
- [4] P. Renucci, V.G. Truong, H. Jaffres, L. Lombez, P.H. Binh, T. Amand, J.M. George, X. Marie. Phys. Rev. B **82**, 195317 (2010).
- [5] А.В. Здоровейшев, М.В. Дорохин, О.В. Вихрова, П.Б. Демина, А.В. Кудрин, А.Г. Темирязов, М.П. Темирязева. ФТТ **58**, 2186 (2016).

*Публикация материалов Симпозиума завершена.*