

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра материаловедения, технологии
и управления качеством

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СПИНОВОЙ ИНЖЕКЦИИ И
АККУМУЛЯЦИИ В ПЛАНАРНЫХ СПИНВЕНТИЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ
ФЕРРОМАГНИТНЫЙ МЕТАЛЛ (CO, NiFe, NiCo) -
ПАРАМАГНИТНЫЙ МЕТАЛЛ (Cu)**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 421 группы

по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Родина Алексея Александровича

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Ю.В. Никулин

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

С.Б. Вениг

инициалы, фамилия

Саратов 2018

Введение. В последние десятилетия существует устойчивый интерес к слоистым магнитным гетероструктурам, как с практической, так и с фундаментальной точек зрения [1].

С практической точки зрения, магнитные наногетероструктуры являются основой для большинства спинтронных устройств. В индустрии, производящей жесткие диски, эффекты гигантского магнетосопротивления и туннельного магнетосопротивления используются, к примеру, в магнитных сенсорах считывающих головок жестких дисков. Кроме того, очень активно исследуется магнитная память произвольного доступа (MRAM), ячейки которой содержат трехслойные “сэндвичи” типа ферромагнетик / парамагнетик / ферромагнетик. Оперативная память такого типа обладает рядом преимуществ перед используемой сегодня полупроводниковой RAM, например большей скоростью, высокой плотностью записи и низким энергопотреблением [1].

С фундаментальной точки зрения, новые эффекты возникают, когда толщина слоев гетероструктуры становится сравнимой или меньшей, чем некие характерные линейные размеры, такие как длина спиновой релаксации или толщина доменной стенки. Помимо вышесказанного, большой интерес представляет изучение спин-зависящего транспорта в таких структурах. Именно транспорт позволяет понять физику процессов, лежащих в основе эффектов типа ГМС, ТМС и прочих [1].

Целью выпускной квалификационной работы является создание планарных спинвентильных структур ферромагнитный металл (Co, NiFe, NiCo) - парамагнитный металл (Cu) и исследование эффектов спиновой инжекции и аккумуляции в полученных структурах в диапазоне температур 8-300К в локальной и нелокальной геометриях спиновой инжекции и аккумуляции.

Для выполнения целей дипломной работы был составлен план работы:

- осаждение ферромагнитных (NiCo, Co) и парамагнитных металлических (Cu) пленок толщиной 20-40 нм методом магнетронного распыления на постоянном токе на подложках окисленного кремния, галлий-гадолиниевого граната и InSb;

- создание методом фотолитографии планарных спинвентильных структур ФМ-ПМ-ФМ;
- применение метода ионного травления для создания планарных спинвентильных структур ФМ-ПМ-ФМ;
- исследование спинзависимого транспорта в планарных спинвентильных структурах ФМ-ПМ-ФМ в локальной геометрии инжектирования и детектирования в диапазоне температур 8-300К.

Дипломная работа занимает 56 страницы, имеет 42 рисунка.

Обзор составлен по 20 информационным источникам.

Во введение рассматривается актуальность работы, устанавливается цель и выдвигаются задачи для достижения поставленной цели.

В первом разделе описываются латеральные спин-вентильные устройства и спиновая инжекция и аккумуляция.

Во втором разделе описывается технология фотолитографии.

В третьем разделе описывается технология магнетронного напыления. Рассмотрен теоретический материал по магнетронному распылению.

В четвертом разделе описывается технология ионного травления. Рассмотрен теоретический материал по ионному травлению.

В пятом разделе описываются материалы для распыления. Рассмотрен теоретический материал по материалу пармаллоя.

В шестом разделе описываются материалы для распыления. Рассмотрен теоретический материал по материалу меди.

В седьмом разделе описывается создание и исследования спинвентильных структур. Описывается метод осаждения пленки NiFe, NiCo, Co методом магнетронного распыления. Описывается создание структур методом фотолитографии и ионного травления. Исследуются эффекты спиновой инжекции и аккумуляции в локальной и нелокальной геометрии.

Основное содержание работы

Создание и исследование спинвентельных структур. Технология создания спиновых вентилей состояла из 8 основных этапов:

- Осаждение ферромагнитной пленки на подложку SiO_2 ;
- Формирование из резиста (AZ MIR701) изображения микроструктуры в виде 2-х параллельных ферромагнитных микрополосок-электродов методом позитивной фотолитографии;
- Ионное травление полученных структур с целью удаления металлической пленки не покрытой резистом;
- Далее на полученную структуру методом магнетронного распыления на постоянном токе наносилась при комнатной температуре пленка меди (Cu) толщиной 30-40 нм;
- Формирование из резиста (AZ MIR701) на пленке меди рисунка контактных площадок методом позитивной фотолитографии.

Осаждение пленки NiFe методом магнетронного распыления на постоянном токе.

Методом магнетронного распыления проведено осаждения NiFe на подложке диоксида кремния. NiFe использовалась в виде мишени. Напыление проводилось на установке ВУП-5 с базовым давлением $1 \cdot 10^{-6}$ Торр и безмаслянной системой вакуумной откачки.

На подложке методом магнетронного распыления была сформирована пленка толщиной 30 нм.

При напылении пленки NiFe были использованы следующие ростовые режимы: $I = 150 \text{ mA}$, $U = 390 \text{ В}$, $v = 20 \text{ нм/мин}$, $L = 80 \text{ мм}$, $P = 1.5 \text{ мТорр}$, $T = 300 \text{ К}$.

Создание системы ферромагнитных электродов из пленки NiFe с помощью фотолитографии и ионного травления.

Для того чтобы создать нужную структуру из пленки NiFe применялись методы позитивной фотолитографии и ионного травления.

Процесс фотолитографии состоял из нескольких этапов:

1. нанесение фоторезиста;
2. предварительное задубливание;
3. экспонирование;
4. вторичное задубливание;
5. проявление.

Нанесение фоторезиста совершалось центрифугированием при 4000 и 6000 оборотах в минуту. Выбор скорости вращения позволял менять толщину d фоторезиста, величина которой является критическим параметром при создании микроструктур с размерами элементов менее 1 мкм (0.8 мкм). Данный метод позволяет создавать однородную пленку фоторезиста и контролировать ее толщину.

После нанесения фоторезиста была проведена его предварительная сушка. Для этого образец выдерживается на плитке при температуре 80 °С, в течении 1,5 минут. Этот этап необходим, так как он приводит к испарению растворителя, содержащегося в фоторезисте, что способствует улучшению адгезии.

Далее проводится процесс экспонирования. При проведении экспонирования использовались 2 типа фотошаблонов: 1) минимальный размер элемента составлял 1.5 мкм (4000 обмин), 2) минимальный размер элемента составлял 0.8 мкм (6000 обмин).

Совершается засветка образца через фотошаблон с нужным рисунком. Время экспонирования – 3 секунды.

После экспонирования необходимо совершить вторичное задубливание. Для этого образец повторно выдерживается на плитке при температуре 100°С, в течении 1,5 минут.

Далее проходит процесс проявления. В этом процессе нужные части фоторезиста удаляются специальной жидкостью – проявителем.

После создания нужного рисунка на подложке, путем фотолитографии, следует этап травления. Для этого применяется ионное травление. Образец травится в вакуумной камере в течении 15 минут (3×5). Этот тип травления

применяется, так как необходимо протравить структуру относительно глубоко, сохраняя при этом, как можно более вертикальный угол наклона стенок, то есть протравить анизотропно, только в вертикальном направлении.

Осаждение пленки Cu методом магнетронного распыления на постоянном токе.

Для того чтобы создать пленку из Cu поверх нанесенной пленки NiFe повторно применялся метод магнетронного распыления. [8].

Создание структуры из пленки Cu с помощью фотолитографии и ионного травления.

Для того чтобы создать нужную структуру из пленки Cu повторно применялись методы фотолитографии и ионного травления.

Данный этап проходил также, как и создание структуры из NiFe за исключением того, что происходило совмещение рисунков, то есть во время экспонирования осуществлялось совмещение фотошаблона с ранее сделанной структурой из NiFe (рисунок 1) [9].

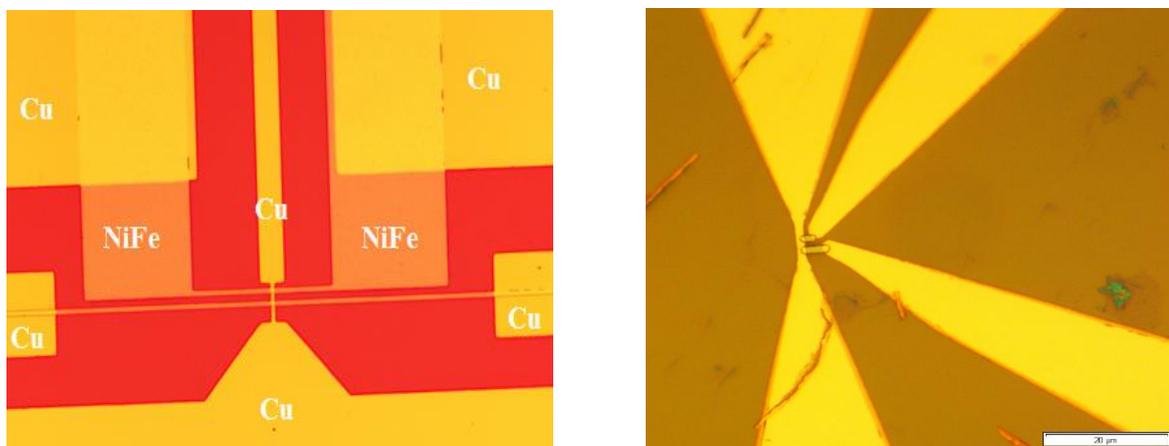


Рисунок 1 – Рисунок, полученный фотолитографией на пленке NiFe с первым и со вторым фотошаблоном

Локальная геометрия.

На рисунке 2 приведено изображение структуры с обозначением электродов при измерении в локальной геометрии инжекции и детектирования.

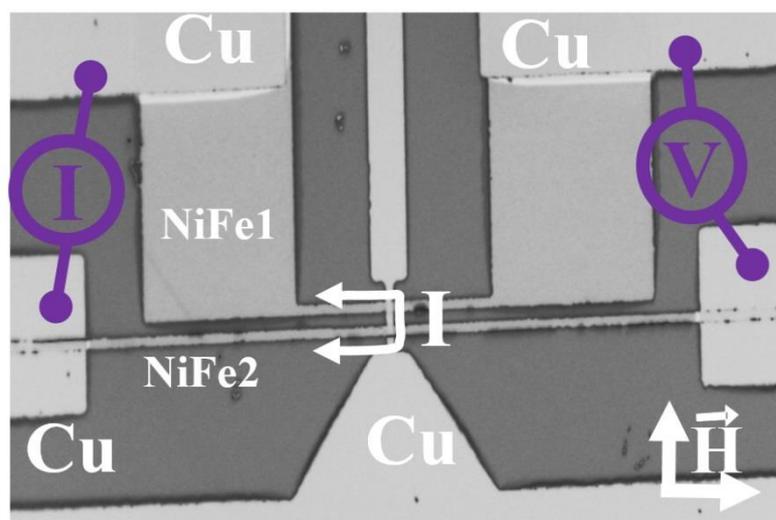


Рисунок 2 – Изображение спинвентильной структуры в локальной геометрии спиновой инжекции и детектирования

Структура NiFe(20nm)/Cu(120nm)/ NiFe(20nm) с шириной ферромагнитных электродов и расстоянием между ними 2 мкм.

На рисунке 3 приведены изображения зависимостей сопротивления R_0 ($H=0$) и $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру при комнатной температуре в локальной геометрии. Из рисунка видно, что зависимости характеризуются линейными участками в диапазоне токов между некоторыми критическими значениями I_{C+} и I_{C-} , величины которых, в общем случае, определяются геометрией структуры и толщиной пленки парамагнитного материала. При значениях $I > I_{C+}$, зависимости становятся нелинейными, при этом наблюдаются рост значений R , а при “отрицательном” направлении тока смена знака зависимостей $R(I)$ и $\Delta R(I)$. Нелинейное поведение зависимостей связано с термическим нагревом металлических токоведущих микрополосок, в результате чего генерируется термоЭДС, аналогичная ЭДС термопары. Знак этой ЭДС для обоих направлений тока является положительным (нагрев структуры).

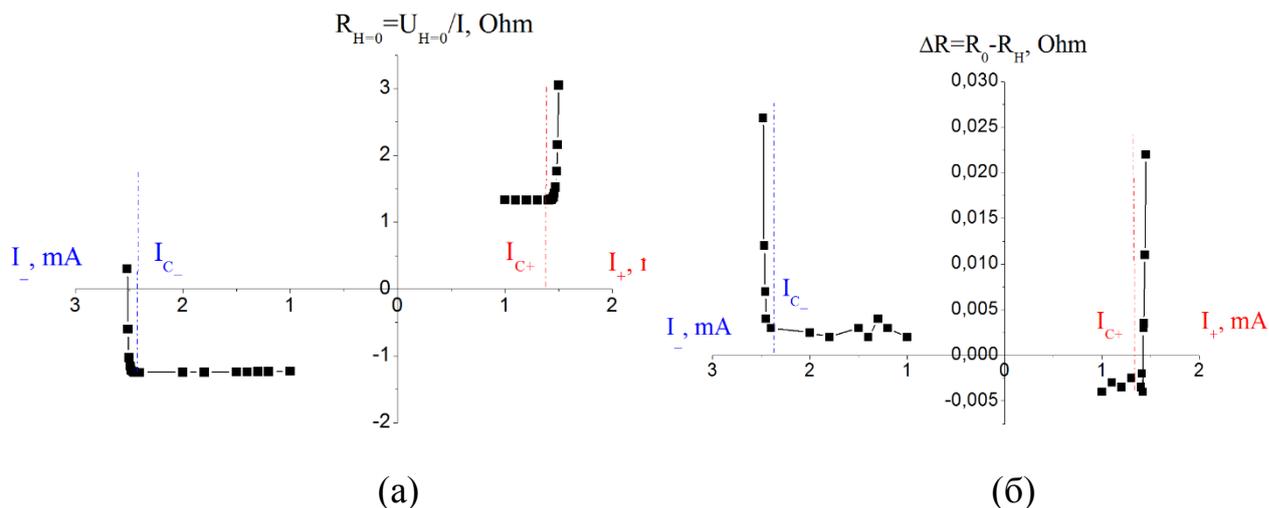


Рисунок 3 – Зависимости (а) сопротивления R_0 ($H=0$) и (б) $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру при комнатной температуре. Значение R_H соответствует сопротивлению структуры в области магнитного насыщения при $H=300\text{Э}$

Данные зависимости представлены на рисунке 4. Из рисунка видно, снижение температуры на 160 градусов (от 300К до 140К) приводит к смене знака зависимости $R(H)$ и уменьшению величины MR с 40% до 0.5%. Таким образом показано, что нелинейный ход зависимостей $MR(I)$ и $R(I)$ действительно обусловлен термо ЭДС из-за нагрева структуры при протекании токов величиной $3 \cdot 10^7 \text{ А/см}^2$.

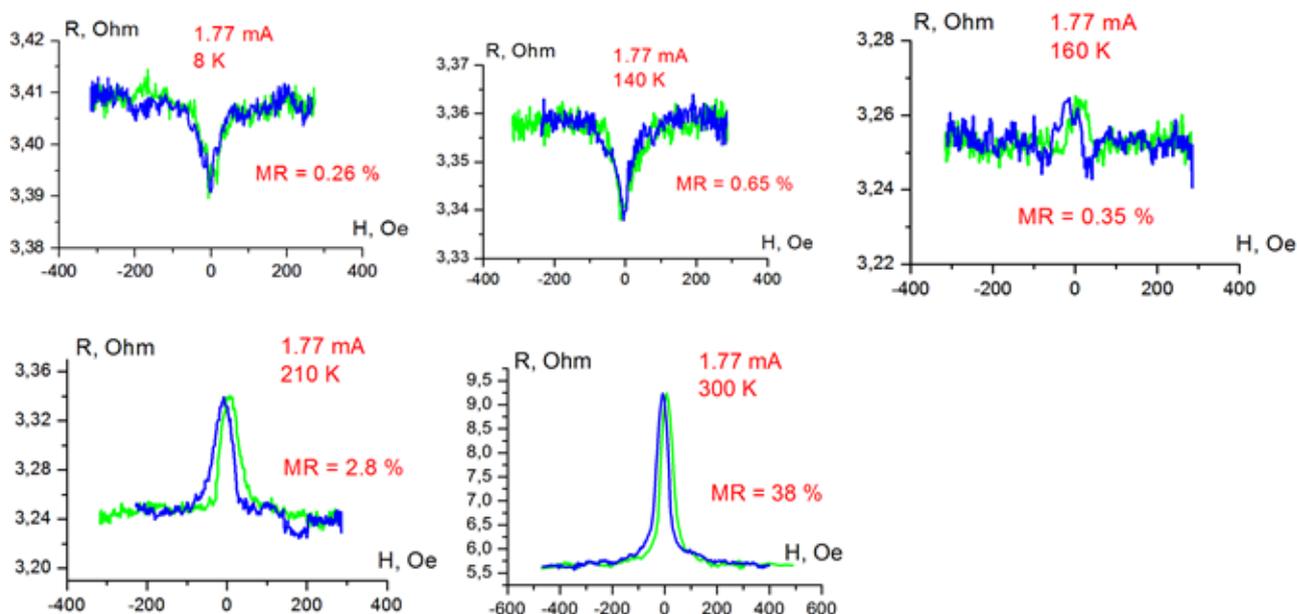


Рисунок 4 – Зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H полученные при токе инжекции 1.77мА, соответствующего максимуму зависимости $MR(I)$. Измерения проведены в диапазоне температур 8-300К.

Магнитное поле H направлено перпендикулярно ферромагнитным электродам

Структура NiCo(20nm)/Cu(70nm) / NiCo(20nm); 2 мкм. Магнитное поле H перпендикулярно ферромагнитным электродам NiCo.

На рисунке 5 приведены зависимости сопротивления R_0 ($H=0$), $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ и генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру NiCo/Cu/NiCo с толщиной ферромагнитных электродов 20 нм, парамагнитного токоведущего электрода 120 нм и расстоянием между ферромагнитными электродами 2 мкм. В целом ход зависимостей аналогичен зависимостям для структуры на основе пленок NiFe с той же геометрией электродов, с той лишь разницей что величина генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ составляет 23-60 мкВ, что почти на порядок больше чем для структуры на основе NiFe. Разница в величине U может быть обусловлена разными значениями спиновой поляризации материалов NiFe и NiCo.

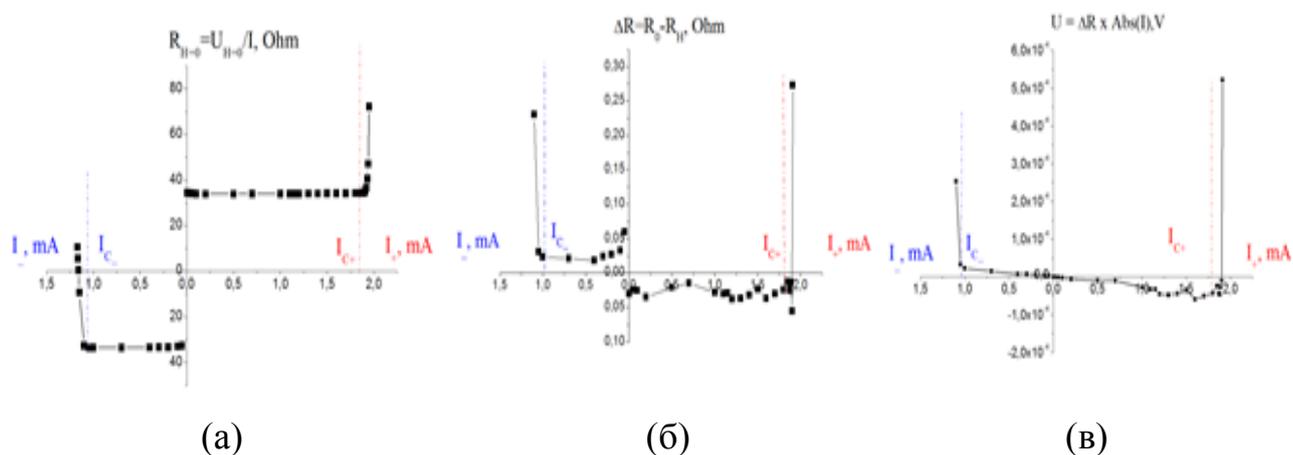


Рисунок 5 – Зависимости (а) сопротивления R_0 ($H=0$), (б) $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$, (в) генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру. Значение R_H соответствует сопротивлению структуры в области магнитного насыщения при $H=300\text{Э}$

**Структура NiFe(30nm)/Cu(120nm)/ NiFe(30nm)) с шириной ферромагнитных электродов и расстоянием между ними 1.5 мкм
Магнитное поле H параллельно NiFe.**

На рисунке 6 представлены зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H направленного параллельно ферромагнитным электродам, полученные при различных токах инжекции 0.3-5.8 мА при комнатной температуре. Видно, что с увеличением тока происходит смена знака зависимости $R(H)$ и увеличение значений MR с 0.01% до 7%. Как отмечалось ранее такое поведение зависимостей $R(H)$ связано с влиянием термоЭДС. В целом ход зависимостей сопротивления R_0 ($H=0$), $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ и генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру аналогичен приведенным ранее для структур с расстоянием между ферромагнитными электродами $w=2$ мкм.

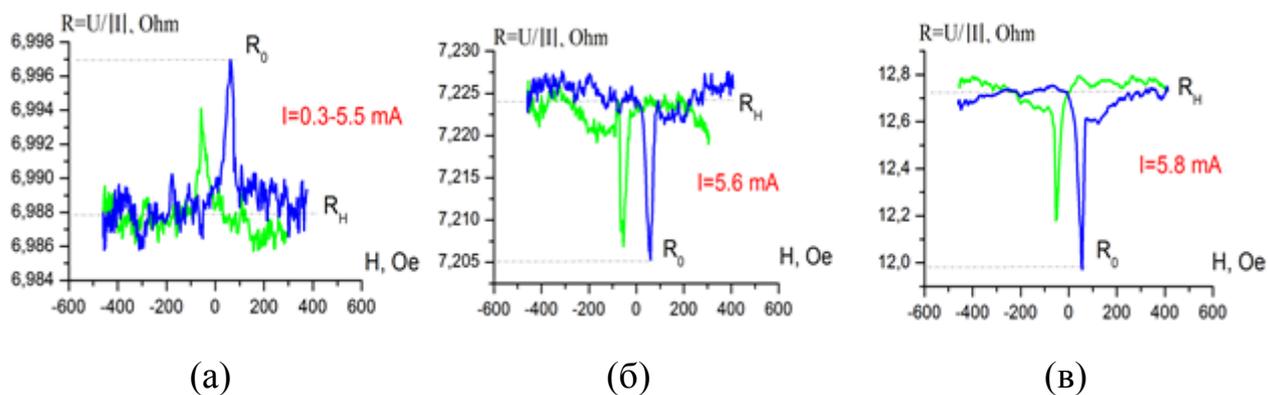
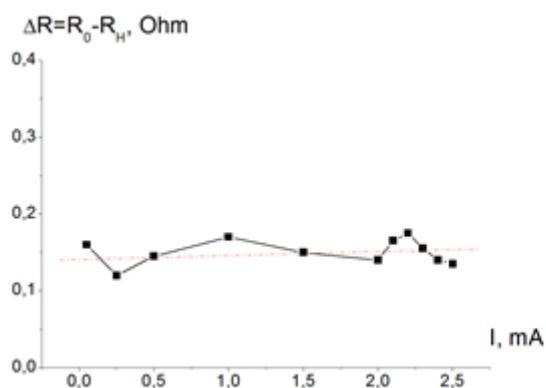


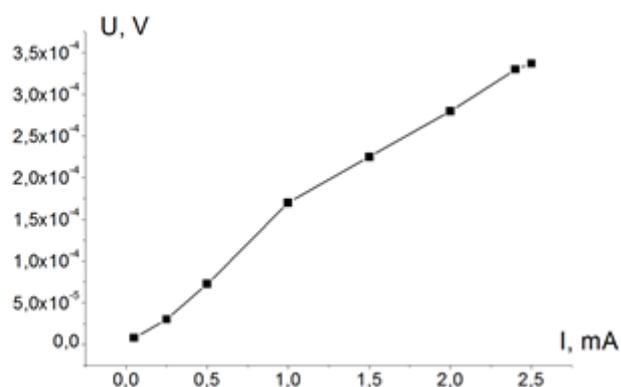
Рисунок 6 – Зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H полученные при различных токах инжекции 0.3-5.8 мА при комнатной температуре

Структура Co(20nm)/Cu(70nm)/ Co(20nm) с шириной ферромагнитных электродов $w= 1.2$ мкм и расстоянием между ними 0.8 мкм. Магнитное поле H параллельно электродам Co.

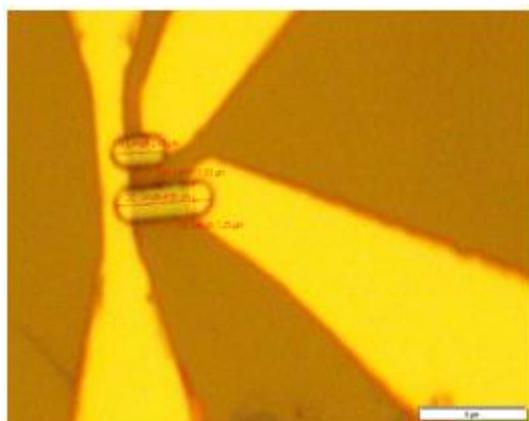
На рисунке 7 (а, б) представлены зависимости ΔR и U от величины тока (линейный участок зависимости $U(I)$) для структуры с расстоянием между ферромагнитными электродами $w=0.8$ мкм (рисунок 7 в). Измерения проводились при комнатной температуре в магнитном поля H направленном параллельно ферромагнитным электродам. Как следует из вольт-амперной характеристики контакта ФМ-НМ, представленной на рисунке 7(г) контакт между ферромагнитными и парамагнитными электродами является омическим. Из рисунка 7 (б) видно, что с увеличением тока происходит линейное увеличение генерируемого напряжения $U=\Delta R \cdot |I|$ до 320 мкВ. Сравнение зависимостей $U(I)$ представленных на рисунке 7 (б) уменьшение расстояния между ферромагнитными электродами с $w=1.5$ мкм до $w=0.8$ мкм приводит к увеличению значений U с 40-50 мкВ до 340 мкВ и связано со снижением вероятности рассеяния спиновых состояний поляризованных электронов на фононах или примесях при уменьшении длины спинового канала до 0.8 мкм.



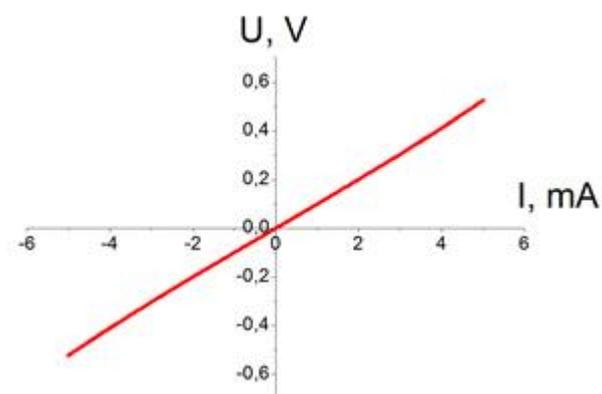
(a)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 7 – Зависимости (а) $\Delta R = R_0(H=0) - R_H(H=300\text{Э})$ и (б) генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины I для “положительного” направления тока инжектируемого в структуру. (в) Изображение измеряемой структуры. (г) ВАХ контакта NiFe – Cu

Нелокальная геометрия.

Измерения в нелокальной геометрии спиновой инжекции и детектирования проводились в структуре NiFe(30nm)/Cu(120nm)/ NiFe(30nm)) с шириной ферромагнитных электродов и расстоянием между ними 1.5 мкм при 8К с магнитным полем H направленным перпендикулярно электродам NiFe (рисунок 8). Из рисунка 8 (б) видно, что ход зависимости $U(I)$ аналогичен зависимостям полученным в локальной геометрии, т.е для нее характерно наличие линейных участков при токах $I < I_C$ (область чистого спинового тока, $U_{\max} = 20\text{мкВ}$), а также областей в которых наблюдается смена знака зависимости $U(I)$ и резкое увеличение значений генерируемого напряжения.

Существенным отличием измерения в нелокальной геометрии в рассматриваемом случае, является необходимость охлаждения структуры до 8К с целью снизить вероятность рассеяния спинов на тепловых колебаниях кристаллической решетки спинового канала Cu.

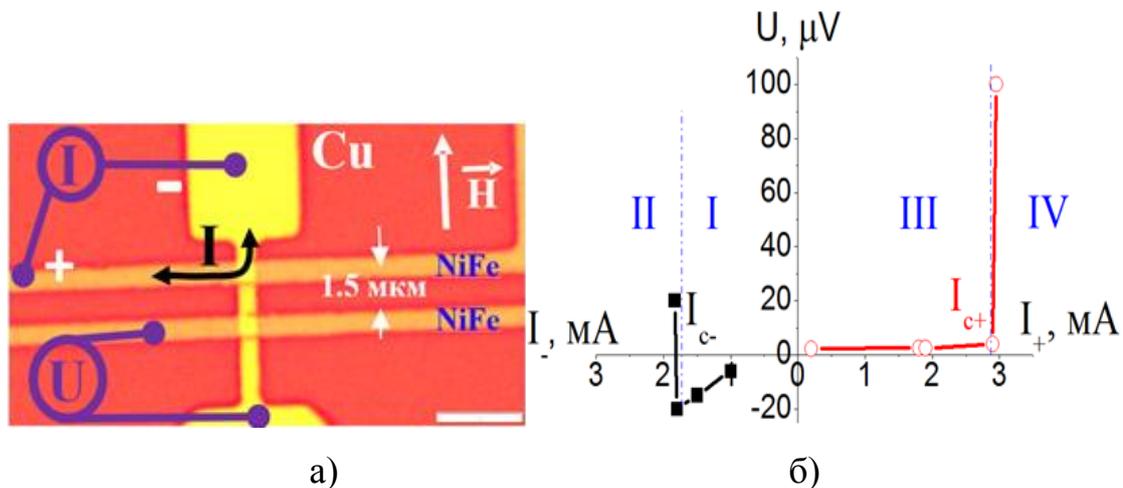


Рисунок 8 – (а) Нелокальная геометрия спиновой инжекции и детектирования. (б) Зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и направления тока I инжектируемого в структуру

Заключение. Для спинвентильных структур NiFe-Cu-NiFe в локальной геометрии спиновой инжекции и детектирования для 2-х направлений инжектируемого тока (“положительное I_+ ” и ”отрицательное I_- ”) обнаружен эффект увеличения магнетосопротивления с 0.5% до нескольких десятков процентов и изменения знака зависимости $R(H)$ при токах инжекции I больших на 1-2% критических значений I_{c+} и I_{c-} , определяемых расстоянием между ФМ электродами и толщинами пленок NiFe и Cu. Рост магнетосопротивления и изменение знака зависимости $R(H)$ при увеличении I связаны с вкладом напряжения U_e от термоэлектрического эффекта при $I > I_c$, что подтверждается изменением знака зависимости $R(H)$ для токов $I > I_c$ при охлаждении структуры от 300 К до 140 К .

Для локальной и нелокальной геометрии спиновой инжекции и детектирования установлено, что зависимость генерируемого напряжения U от тока I близка к линейной в диапазоне $0 < I < I_{c+}$ и $0 < I < I_{c-}$ (область спиновой аккумуляции U_s), а при токах $I > I_{c+}$ и $I > I_{c-}$ наблюдается резкое увеличение U до

единиц мВ и смена знака U для одного из направлений тока (термоэлектрический вклад U_e в U доминирует над вкладом U_s).

Для локальной геометрии спиновой инжекции и детектирования установлено, что уменьшение расстояния между ФМ электродами с 1.5-2 мкм до 0.8 мкм приводит к увеличению напряжения U_s за счет спиновой аккумуляции с 60 мкВ до 350 мкВ при комнатной температуре.

Список использованных источников

1 1 Никитин, М. М. Технология и оборудование вакуумного напыления / М. М. Никитин. М. : Изд-во Металлургия, 1992. 150 с.

2 Черняев, В. Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров / В. Н. Черняев. М. : Изд-во Радио и связь, 1987. 23 с.

3 Белый, А. В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. М. : Изд-во Машиностроение, 1991. 42 с.

4 Спиновый транспорт в латерально-ограниченных наногетероструктурах [Электронный ресурс] // РФФИ [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/project_search/o_1889311 (дата обращения: 05.06.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

5 Ведяев, А. В. Спин-зависимый транспорт в магнитных наноструктурах / А. В. Ведяев, О. А. Котельникова, Н. В. Рыжанова. М. : Изд-во Московского университета, 2012. 141 с.

6 Википедия [Электронный ресурс] : свободная энциклопедия / Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Электрон. дан. (1360438 статей, 5080499 страниц, 194844 загруженных файлов). Wikipedia®, 2001-2018. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/фотолитография> (дата обращения: 05.06.2018). Загл. с экрана. Последнее изменение страницы: 13:05, 4 апреля 2018. Яз. рус.

7 Википедия [Электронный ресурс] : свободная энциклопедия / Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; Wikimedia

Foundation, Inc, некоммерческой организации. Электрон. дан. (78239 статей, 1349562 страниц, 85903 загруженных файлов). Wikipedia®, 2001-2018. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Магнетронное_распыление](https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнетронное_распыление) (дата обращения: 05.06.2018). Загл. с экрана. Последнее изменение страницы: 15:45, 10 января 2018. Яз. рус.

8 Википедия [Электронный ресурс] : свободная энциклопедия / Текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Электрон. дан. (2376417 статей, 4561786 страниц, 675716 загруженных файлов). Wikipedia®, 2001-2018. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ионное_травление (дата обращения: 05.06.2018). Загл. с экрана. Последнее изменение страницы: 12:53, 25 марта 2018. Яз. рус.

9 Данилин, Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок / Б. С. Данилин. М. : Изд-во Энергия, 1967. 312 с.

10 Ионное травление [Электронный ресурс] // Heuristic [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://www.heuristic.su/effects/catalog/tech/byId/description/882/index.html> (дата обращения: 05.06.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

11 Bader, S. D. Spintronics / S. D. Bader, S. S. Parkin // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 1. P. 71-73.

12 Binasch, G. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 39. P. 4828-4831.

13 Fert, A. A two-current Conduction in Nickel / A. Fert, I. Campbell // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 21. P. 1190-1192.

14 D'yakonov, M. I. Possibility of orienting electron spins with current / M. I. D'yakonov, V. I. Perel' // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 13. P. 467.

15 Берлин, Е. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. Берлин, С. Двинин, Л. Сейдман. М. : Изд-во Техносфера, 2007. 163 с.

16 Ефремов, А. М. Вакуумно-плазменные процессы и технологии / А. М. Ефремов, В. И. Светцов, В. В. Рыбкин. М. : Изд-во Техносфера, 2006. 51 с.

17 Фурсей, Г. Н. Особенности полевой эмиссии полупроводников / Г. Н. Фурсей, Л. М. Баскин. М. : Изд-во Микроэлектроника, 1997. С. 117-122.