

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 (NiFe, NiCo) – ПОЛУПРОВОДНИК
(INSB)**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 421 группы

по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

факультета nano- и биомедицинских технологий

Резяпова Тимерлана Ренатовича

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.

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 [2].

Чтобы добавить спин в качестве новой степени свободы для прикладных целей, к примеру – для использования в электронике, необходимо научиться манипулировать динамикой спина в твердотельных устройствах, а это, в свою очередь, означает, что нужно иметь четкое представление об инжекции и детектировании спинов, а также спиновой аккумуляции [3].

Самыми известными спин-зависящими эффектами в транспорте являются гигантское магнетосопротивление и туннельное магнетосопротивление. Они заключаются в значительном изменении электрического сопротивления многослойных образцов, состоящих из чередующихся ферромагнитных и неферромагнитных слоев, в зависимости от относительного направления

намагниченности в ферромагнетиках. Для туннельного магнетосопротивления характерно то, что прослойкой между ферромагнитными электродами является туннельный диэлектрический контакт [4].

Целью работы является создание планарных спинвентильных структур ферромагнитный металл (NiFe) – полупроводник (InSb) и исследование эффектов спиновой инжекции и аккумуляции в нелокальной геометрии при комнатной температуре.

Для выполнения целей дипломной работы были поставлены следующие задачи:

- Осаждение методом импульсного термического осаждения пленок InSb на подложках галлий-гадолиниевого граната (ГГГ);
- Оценка подвижности основных носителей заряда в пленках n-InSb методом Ван-дер-Пау;
- Создание методом фотолитографии и ионного травления системы электродов из пленки InSb;
- Осаждение ферромагнитных (NiFe) пленок толщиной 30 нм методом магнетронного распыления на постоянном токе на подложке InSb/ГГГ;
- Создание методом фотолитографии и ионного травления системы ферромагнитных электродов из пленок NiFe и NiCo;

Исследование спинзависимого транспорта в планарных спинвентильных структурах NiFe-InSb-NiFe и NiCo-InSb-NiCo в нелокальной геометрии инжектирования и детектирования при комнатной температуре.

Дипломная работа занимает 47 страниц, имеет 38 рисунков и 2 таблицы.

Обзор составлен по 20 информационным источникам.

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

В первом разделе описываются спин-вентильные устройства и спиновая инжекция и аккумуляция. Был рассмотрен теоретический материал. Рассмотрены основные свойства и формулы данных процессов.

Во втором разделе описывается технология термического напыления. Рассмотрен теоретический материал по термическому напылению.

В третьем разделе описывается технология фотолитографии. Рассмотрен теоретический материал по фотолитографии, фоторезистам и фотошаблонам .

В четвертом разделе описывается технология магнетронного распыления. Рассмотрен теоретический материал по магнетронному распылению.

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

В шестом разделе описываются материалы для распыления. Рассмотрен теоретический материал по материалам: пермаллой и антимоид индия.

В седьмом разделе описывается создание и исследование спинвентильных структур ФМ-InSb-ФМ. Описывается создание пленки методами термического напыления и магнетронного распыления. Описывается создание структур методами фотолитографии и ионного травления. Исследуются эффекты спиновой инжекции и аккумуляции в нелокальной геометрии при комнатной температуре.

Основное содержание работы

Создание спинвентильных структур ФМ-InSb-ФМ. Создание спинвентильных структур состояло из нескольких этапов:

1. Осаждение пленки InSb на подложку галлий-гадолиниевый гранат (ГГГ) методом термического напыления.

2. Создание микроструктуры в виде системы электродов из пленки InSb с помощью позитивной фотолитографии и ионного травления.

3. Напыление на готовую микроструктуру из InSb пленки ферромагнитного металла NiFe или NiCo методом магнетронного распыления на постоянном токе.

4. Создание электродов в виде микрополосок из пленки NiFe с помощью позитивной фотолитографии и ионного травления на готовой микроструктуре из InSb.

Осаждение пленки InSb методом термического напыления. Методом термического напыления проведено осаждения InSb на подложке галлий-гадолиниевого граната. В качестве материала для распыления использовался монокристаллический n-InSb.

Осаждение пленки проходит следующим образом:

На держатель устанавливается подложка галлий-гадолиниевый гранат. В тигель засыпается порошок антимонид индия. В камере создается вакуум равный 10^{-5} Торр. Непосредственно перед напылением подложки отжигались при $T_s \approx 650^\circ\text{C}$ в течение 5 минут. Температура подложки во время осаждения пленок InSb составляла $T_s \approx 550\text{K}$. Далее осуществляется осаждение пленки: происходит вылет порошка InSb на подложку путем нагрева испарителя до $1800\text{-}2000^\circ\text{C}$. Испаритель нагревается путем пропускания через него тока в 100 ампер [5].

После осаждения, пленки InSb извлекались на атмосферу и подвергались нагреву до $T_s \approx 700\text{K}$ в течение 50 секунд с целью формирования поверхностного окисного слоя для защиты пленки и улучшения адгезии [6].

Создание структуры из пленки InSb с помощью фотолитографии и ионного травления. Для того чтобы создать нужную структуру из пленки InSb применялись методы фотолитографии и ионного травления.

Процесс фотолитографии состоял из нескольких этапов:

1. Нанесение фоторезиста;
2. Предварительное задубливание;
3. Экспонирование;
4. Вторичное задубливание;
5. Проявление [7].

Нанесение фоторезиста (AZ MIR 701) на подложку осуществлялось с помощью центрифуги SM-180 при скорости вращения 4000 об/мин в течение 60 секунд. 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 390 К, в течении 1,5 минут. Этот этап необходим, так как он приводит к испарению растворителя, содержащегося в фоторезисте, что способствует улучшению адгезии [8].

Далее проводится процесс экспонирования. 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 410 К, 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.

Для удаления фоторезиста использовался ОСЧ ацетон. Для этого образец, подвергнутый ионному травлению помещался в ОСЧ ацетон на 10 часов с целью размягчения резиста. Затем происходила смена ацетона и образец помещался в ультразвуковую ванну, где происходила финишная очистка образца в течение 40 минут при температуре 360К [9].

Осаждение пленки NiFe методом магнетронного распыления. После получения структуры из InSb методами фотолитографии и ионного травления, на структуру напылялась пленка NiFe методом магнетронного распыления. Осаждение пленок производилось при давлении рабочего газа $P=1.1$ мТорр при комнатной температуре подложки [10].

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

Создание структуры из пленки NiFe с помощью фотолитографии и ионного травления. Для того чтобы создать нужную структуру из пленки NiFe повторно применялись методы фотолитографии и ионного травления.

Данный этап проходил также, как и создание структуры из InSb за исключением того, что происходило совмещение рисунков, то есть во время экспонирования осуществлялось совмещение фотошаблона с ранее сделанной структурой из InSb [11].

Готовая структура показана на рисунке 1.

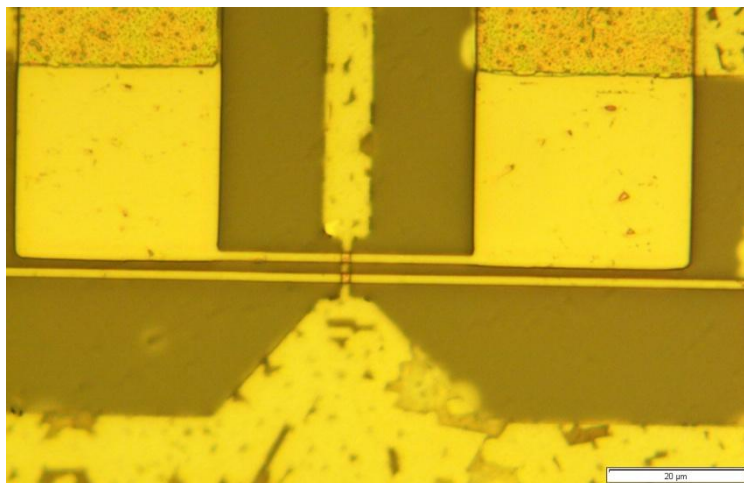


Рисунок 1 – Полученная структура из NiFe и InSb (20 мкм)

Структура NiFe(30nm) – InSb(400nm) – NiFe(30nm) с шириной ферромагнитных электродов $w= 1.5$ мкм и расстоянием между ними 1.5 мкм. На рисунке 2 представлены типичные зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H направленного параллельно и перпендикулярно (б) ферромагнитным электродам, полученные при токе инжекции 0.5 мА при комнатной температуре в нелокальной геометрии инжектирования тока I [12].

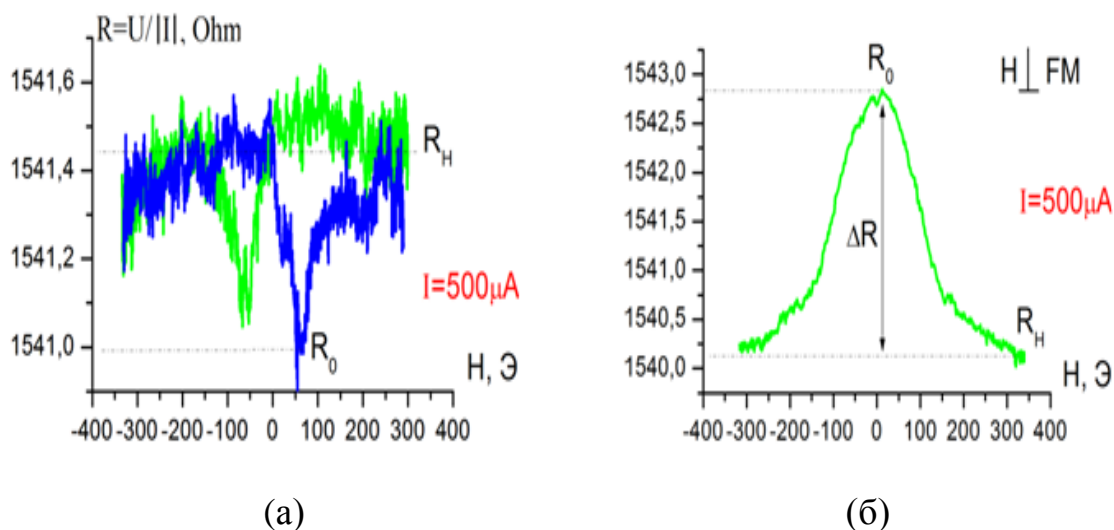


Рисунок 2 – Зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H полученные при токе инжекции 0.5 мА в магнитном поле H направленном параллельно (а) и перпендикулярно (б) ферромагнитным электродам

Магнитное поле H перпендикулярно NiFe. 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 нелокальной 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, толщиной пленки ферромагнитного материала и толщиной пленки InSb. При значениях $I > I_C$, зависимости становятся нелинейными, при этом наблюдаются рост значений R , а при “отрицательном” направлении тока смена знака зависимости $R(I)$. Нелинейное поведение зависимостей связано с термическим нагревом токоведущих микрополосок, в результате чего генерируется термоЭДС, аналогичная ЭДС термопары. Знак этой ЭДС для обоих направлений тока является положительным (нагрев структуры) [13].

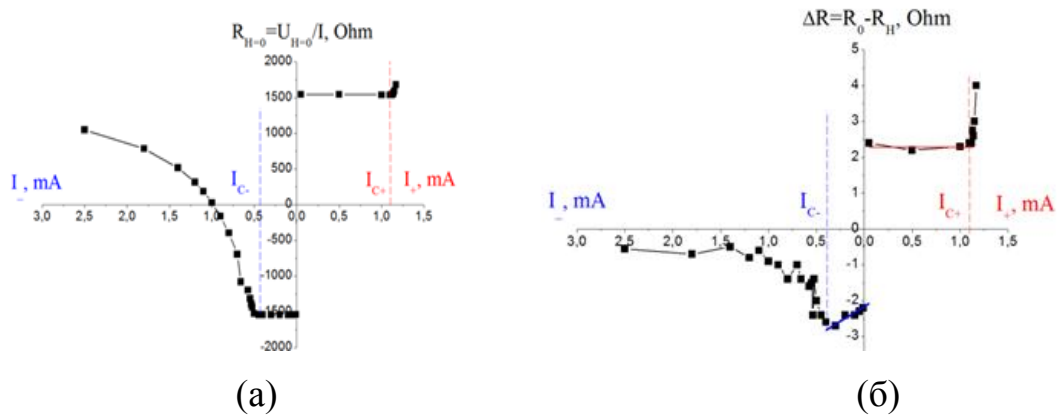


Рисунок 3 – Зависимости (а) сопротивления R_0 ($H=0$) и (б) $\Delta R = R_0 - R_H$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру при комнатной температуре. Значение R_H соответствует сопротивлению структуры в области магнитного насыщения при $H=300\text{Э}$

На рисунке 4 приведена зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру. Из рисунка видно, зависимости также характеризуются линейными участками при $I < I_c$. Эти области токов, при которых нагрев структуры еще не проявляется обусловлены спиновой аккумуляцией. Для “отрицательно” направления тока влияние термоЭДС ярко проявляется в смене знака зависимости $U(I)$ при некотором критическом значении тока. Для структуры NiFe/InSb/NiFe с толщиной ферромагнитных электродов 30 нм и расстоянием между ферромагнитными электродами 1.5 мкм величина U для линейного участка зависимости составляет около 1-2.5 мВ при комнатной температуре, что на 2-3 порядка больше значений U , генерируемых в структурах ферромагнитный металл-парамагнитный металл и обусловлена большими значениями спиновой диффузии в InSb по сравнению с типичным парамагнитным металлом Cu [14].

Таким образом, отличить вклад спиновой инжекции в детектируемом сигнале U от вклада термоэлектрического эффекта возможно 2 способами: 1 – по изменению знака U для одного направления тока при $I = I_c$, 2 – по отсутствию нелинейной зависимости величины U от I в области $I < I_c$ для противоположного направления тока [3].

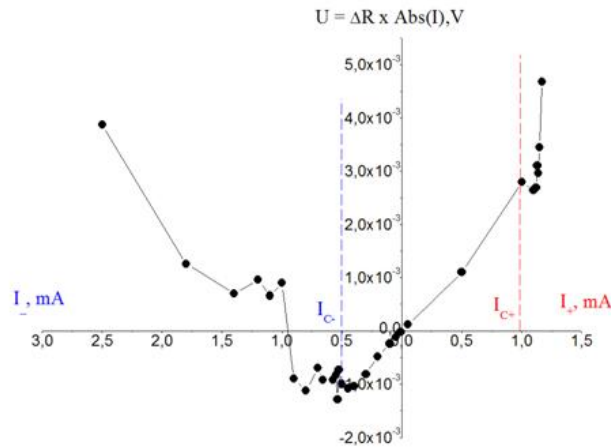


Рисунок 4 – Зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру

Магнитное поле H параллельно $NiFe$. На рисунке 5 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 нелокальной геометрии с магнитным полем H направленным вдоль ферромагнитных электродов. Из рисунка видно, что зависимости аналогичны случаю когда H перпендикулярно ферромагнитным электродам и характеризуются линейными участками в диапазоне токов между некоторыми критическими значениями I_{C+} и I_{C-} . При значениях $I > I_{C+}$, зависимости становятся нелинейными [2].

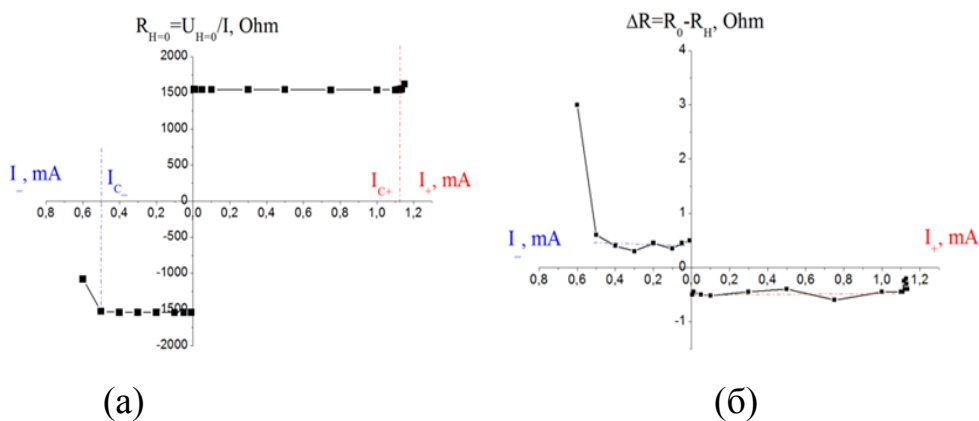


Рисунок 5 – Зависимости (а) сопротивления R_0 ($H=0$) и (б) $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру при комнатной температуре. Значение R_H соответствует сопротивлению структуры в области магнитного насыщения при $H=300\text{Э}$

На рисунке 6 приведена зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру. Из рисунка видно, зависимости также характеризуются линейными участками при $I < I_C$. Эти области токов, при которых нагрев структуры еще не проявляется, обусловлены спиновой аккумуляцией. Величина U для параллельного намагничивания оказывается в 3-5 раз меньше по сравнению с ситуацией, когда H направлено перпендикулярно ФМ электродам.

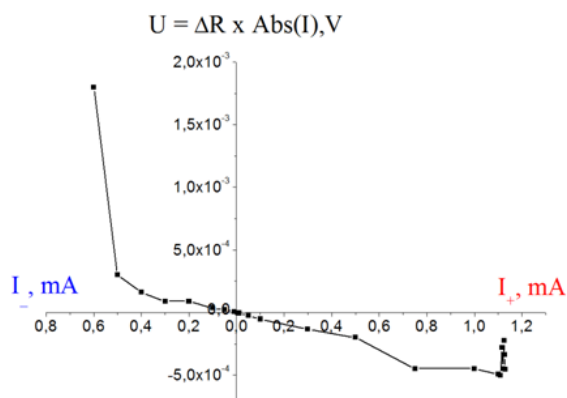


Рисунок 6 – Зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру

Вольт-амперная характеристика контакта NiFe/InSb. На рисунке 7 представлена вольт-амперная характеристика контакта InSb/NiFe и геометрия измерения ВАХ. Как следует из вольт-амперной характеристики контакта NiFe-InSb, для структуры описанной выше контакт между ферромагнитными и парамагнитными электродами близок к омическому [15].

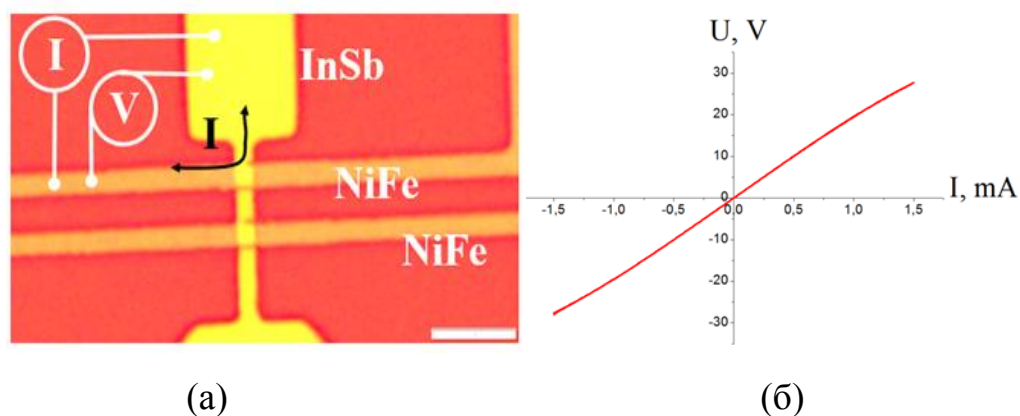


Рисунок 7 – Геометрия измерения ВАХ (а) и вольт-амперная характеристика контакта InSb/NiFe (б)

Структура NiCo(d=30 nm) – InSb(d=400nm) – NiCo(d=30 nm) с шириной ферромагнитных электродов $w= 2$ мкм и расстоянием между ними 2 мкм. На рисунке 8 представлены типичные зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H направленного перпендикулярно и параллельно ферромагнитным электродам, полученные при токе инжекции 0.5 мА при комнатной температуре в нелокальной геометрии инжектирования тока I .

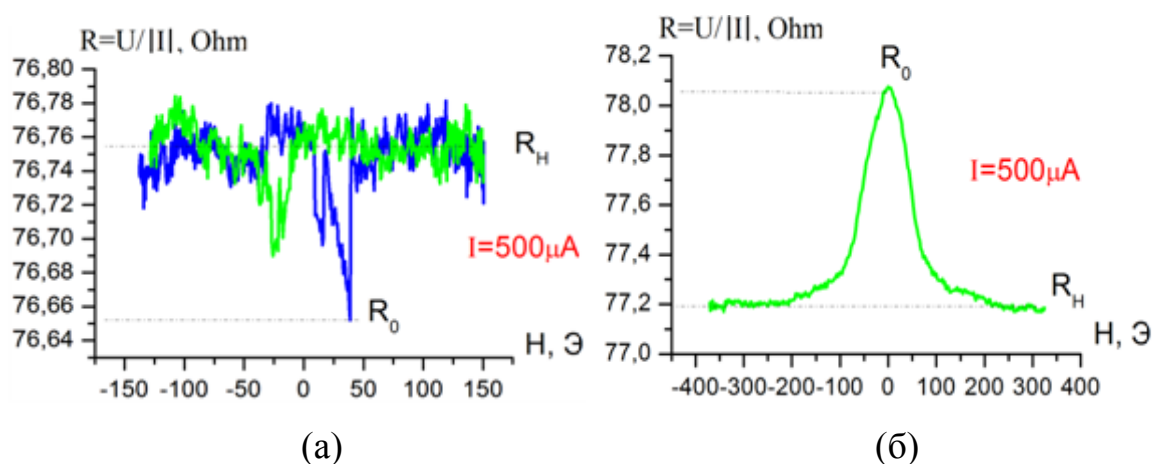


Рисунок 8 – Зависимости электрического сопротивления R от магнитного поля H полученные при токе инжекции 0.5 мА в магнитном поле H направленном параллельно (а) и перпендикулярно (б) ферромагнитным электродам

Магнитное поле H перпендикулярно NiCo. На рисунке 9 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 NiCo-InSb-NiCo при комнатной температуре в нелокальной 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, толщиной пленки ферромагнитного материала и толщиной пленки InSb. При значениях $I > I_{C-}$, зависимости становятся нелинейными, при этом наблюдаются рост значений R , а при “отрицательном” направлении тока смена знака зависимости $R(I)$.

Нелинейное поведение зависимостей связано с термическим нагревом токоведущих микрополосок.

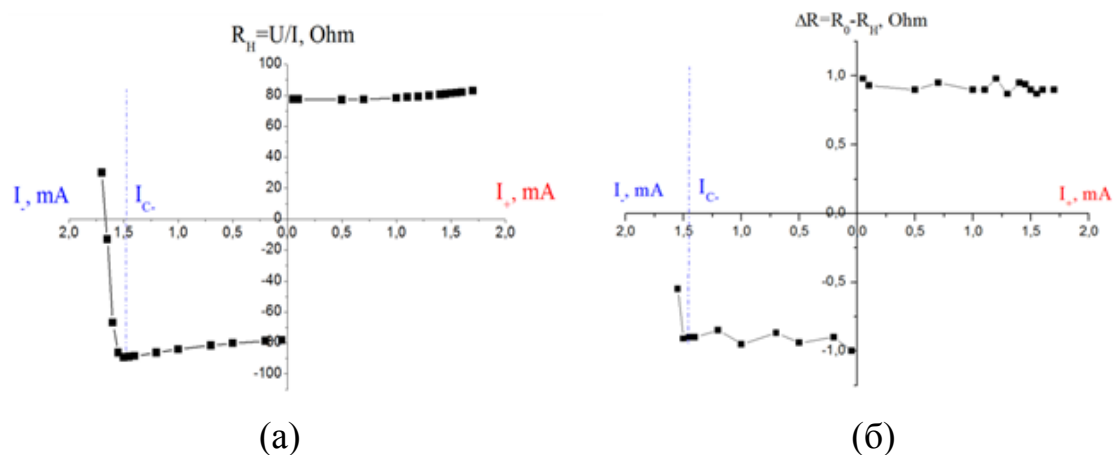


Рисунок 9 – Зависимости (а) сопротивления R_0 ($H=0$) и (б) $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру при комнатной температуре. Значение R_H соответствует сопротивлению структуры в области магнитного насыщения при $H=300\text{Э}$

На рисунке 10 приведена зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру. Из рисунка видно, зависимости также характеризуются линейными участками при $I < I_C$. Эти области токов обусловлены спиновой аккумуляцией. Для “отрицательно” направления тока влияние термоЭДС ярко проявляется в смене знака зависимости $U(I)$ при некотором критическом значении тока. Для структуры NiCo/InSb/NiCo с толщиной ферромагнитных электродов 30 нм и расстоянием между ферромагнитными электродами 2 мкм величина U для линейного участка зависимости составляет около 1.2-1.5 мВ при комнатной температуре, b и по порядку величины сопоставима со значениями U для структуры на основе пленок NiFe [16].

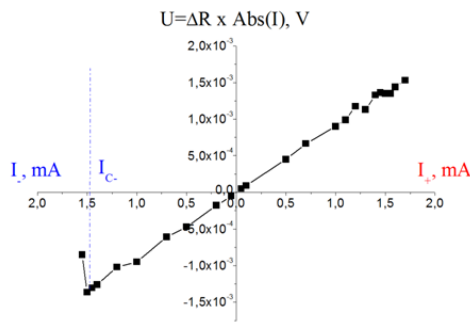


Рисунок 10 – Зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру

Магнитное поле H параллельно $NiCo$. На рисунке 11 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 нелокальной геометрии с магнитным полем H направленным вдоль ферромагнитных электродов. Из рисунка видно, что зависимости аналогичны случаю когда H перпендикулярно ферромагнитным электродам и характеризуются линейными участками в диапазоне токов между некоторыми критическими значениями I_{C+} и I_{C-} . При значениях $I > I_C$, зависимости становятся нелинейными [17].

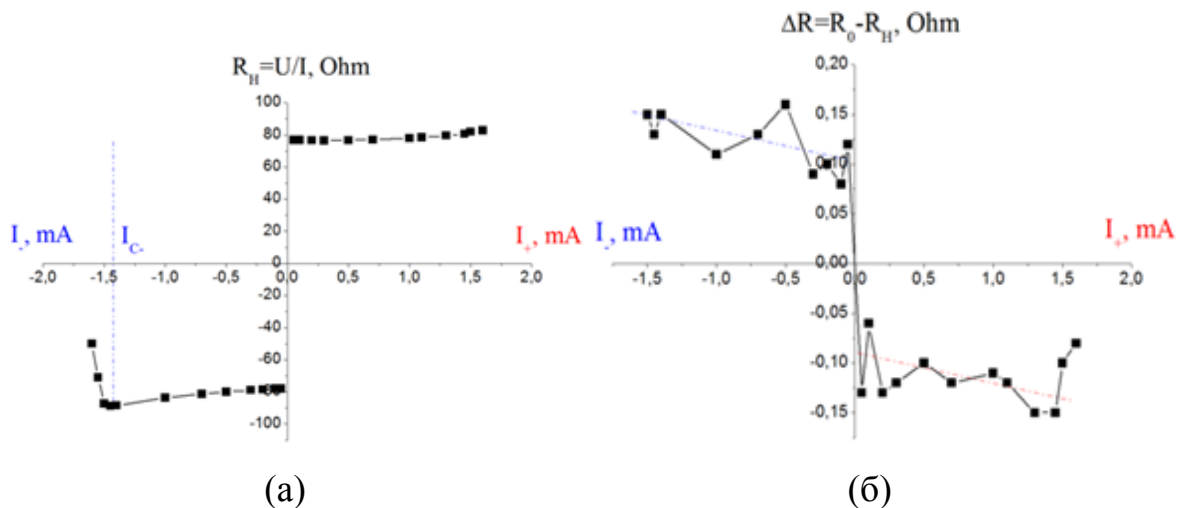


Рисунок 11 – Зависимости (а) сопротивления R_0 ($H=0$) и (б) $\Delta R = R_0(H=0) - R_H$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру при комнатной температуре. Значение R_H соответствует сопротивлению структуры в области магнитного насыщения при $H=300\text{Э}$

На рисунке 12 приведена зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока I инжектируемого в структуру. Из рисунка видно, зависимости также характеризуются линейными участками при $I < I_C$ для которых величина U составляет 0.2 мВ и почти на порядок меньше значений U в случае когда магнитное поле H направлено перпендикулярно ФМ электродам [18].

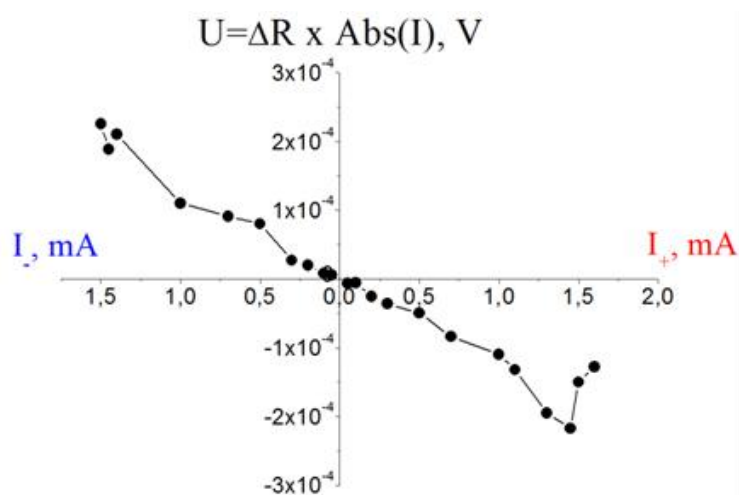


Рисунок 12 – Зависимость генерируемого напряжения $U = \Delta R \cdot |I|$ от величины и полярности тока инжектируемого в структуру

Заключение. Для нелокальной геометрии спиновой инжекции и детектирования на постоянном токе показано, что при комнатной температуре планарные спинвентильные структуры NiFe-InSb-NiFe и NiCo-InSb-NiCo на основе текстурированных пленок InSb способны эффективно генерировать спиновое напряжение U_s величиной $U_s \sim 2-2500$ мкВ при токах инжекции $I \sim 1-1500$ мкА и расстоянии между ФМ электродами 1.5-2 мкм [19].

Большие значения напряжения $U_s \sim 1.5-2$ мВ, генерируемого спиновым током, обусловлены высокой подвижностью электронов ($\mu \approx 20000$ см²/В·с, $T \approx 300$ К) для текстурированных пленок InSb, из которых изготавливается электрод, передающий поляризованные по спину электроны [20].

Отличить вклад спиновой инжекции U_s в детектируемом сигнале $U = U_s + U_e$ от вклада напряжения U_e , обусловленного резистивным нагревом структуры при больших токах инжекции возможно 2 способами: (1) – по

изменению знака U при критическом значении тока $I \approx I_c$ для одного из направлений тока, инжектируемого в структуру, (2) – по линейному характеру зависимости величины $U_s(I)$ для обоих направлений тока I в диапазоне $0 < I < I_{c+}$ и $0 < I < I_{c-}$.

Список использованных источников

- 1 Jonson, M. Bipolar spin Switch / M. Jonson // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 260 P. 320.
- 2 Иванов, Р. Д. Магнитные металлические пленки в микроэлектронике / Р. Д. Иванов. М. : Изд-во Советское радио, 1980. 192 с.
- 3 Кифер, И. И. Испытание ферромагнитных материалов / И. И. Кифер. М. : Изд-во Госэнергоиздат, 1962. 544 с.
- 4 Звездин, А. К. Магнитооптика тонких пленок / А. К. Звездин, В. А. Котов. М. : Изд-во Наука, 1988. 192 с.
- 5 Метод термического испарения в вакууме [Электронный ресурс] // kirensky [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://kirensky.ru/ru/info/study/dop/vak> (дата обращения: 07.05.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 6 Готра, З. Ю. Технология микроэлектронных устройств / З. Ю. Готра. М. : Изд-во Радио и связь, 1991. 528 с.
- 7 Фотолитография [Электронный ресурс] // studfiles [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <https://studfiles.net/preview/1671660/> (дата обращения: 07.05.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.
- 8 Пресс, Ф. П. Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / Ф. П. Пресс. М. : Изд-во Советское радио, 1978. 96 с.
- 9 Шлезингер, М. А. Люминесцентный анализ / М. А. Шлезингер. М. : Изд-во Физ-мат литература, 1961. 401 с.

10 Магнетронное распыление [Электронный ресурс] // Studfiles [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <https://studfiles.net/preview/2493747/page:3/> (дата обращения: 07.05.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

11 Данилин, Б. С. Магнетронные распылительные системы / Б. С. Данилин, В. К. Сырчин. М. : Изд-во Радио и связь, 1982. 72 с.

12 Кузьмичев, А. И. Магнетронные распылительные системы / А. И. Кузьмичев. Киев : Изд-во Аверс, 2008. 244 с.

13 Берлин, Е. В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е. В. Берлин, С. А. Двинин, Л. А. Сейдман. М. : Изд-во Техносфера, 2007. 176 с.

14 Никитин, М. М. Технология и оборудование вакуумного напыления / М. М. Никитин. М. : Изд-во Металлургия, 1992. 112 с.

15 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. М. : Изд-во Металлургия, 1992. 432 с.

16 Данилин, Б. С. Ионное травление микроструктур / Б. С. Данилин, В. Ю. Киреев. М. : Изд-во Советское радио, 1979. 101 с.

17 Киреев, В. Ю. Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур / В. Ю. Киреев, Б. С. Данилин, В. И. Кузнецов. М. : Изд-во Радио и связь, 1983. 126 с.

18 Преображенский, А. А. Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. М. : Изд-во Высшая школа, 1986. 352 с.

19 Пермаллой. Свойства, применение [Электронный ресурс] // Electrophysic [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://electrophysic.ru/elektricheskie-materialyi-i-komponentyi/permalloy.-svoystva-primenenie.html> (дата обращения: 02.06.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.

20 Антимонид индия [Электронный ресурс] // Helpiks [Электронный ресурс] : [сайт]. URL: <http://helpiks.org/1-25699.html> (дата обращения: 02.06.2018). Загл. с экрана. Яз. рус.