

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ЯРИКОВ СТАНИСЛАВ АЛЕКСЕЕВИЧ

**МАГНИТНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР
В СИСТЕМЕ ПЕРМАЛЛОЙ-ВИСМУТ**

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Научный руководитель:
кандидат физ. – мат. наук,
Патрин К.Г.

Красноярск – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	10
1.1 СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР	10
1.1.1 МЕЖСЛОЕВОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ.....	12
1.1.2 МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА	14
1.1.3 МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ	17
1.2 ВИСМУТ И ЕГО НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ФОРМЫ.....	18
1.3 МАГНИТНЫЕ Bi-СОДЕРЖАЩИЕ СТРУКТУРЫ.....	21
1.3.1 Co-Bi.....	21
1.3.2 Fe-Bi.....	25
1.3.3 Ni-Bi.....	26
1.4 МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ С ВИСМУТОМ.....	27
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ.	35
2.1 МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК	35
2.2 АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ	36
2.3 МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	38
2.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА MPMS-XL	39
2.5 МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ	44
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК NiFe/Bi/NiFe.....	47
3.1 ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК	47

3.2 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР В СИСТЕМЕ Bi-NiFe	51
3.3 МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.....	56
3.4 МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	65
3.5 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	68
3.6 МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	94
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	106

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Проблема создания новых наноразмерных магнитных материалов не сходит с первых позиций при разработке устройств спиновой электроники. В этом плане многослойные магнитные пленки привлекают внимание исследователей в силу большого разнообразия эффектов, наблюдаемых в них. Еще большее разнообразие проявлений можно ожидать при создании структур, где различные слои обладают разными типами упорядочения или разными типами проводимости.

Одной из реализаций таких условий является создание многослойных магнитных структур с немагнитными полупроводниковыми прослойками. В этом случае можно ожидать интегрирования свойств магнитных материалов и полупроводниковых материалов. Если сравнивать свойства пленок с металлическими прослойками, то сильной стороной металлических многослойных пленок в виду большой концентрации носителей заряда является большая проводимость и сильное взаимодействие между ферромагнитными слоями. В случае структур с полупроводниковыми прослойками связь между слоями является более слабой, но зато появляется возможность управления свойствами за счет внешних воздействий. Такие многослойные пленки оказываются, например, чувствительны к температуре, разного рода излучениям и полям.

Как известно, обменная связь между магнитными слоями зависит от вероятности переноса поляризованных электронов через немагнитную прослойку и величины их взаимодействия с магнитными ионами магнитных слоев. Таким образом, ясно, что концентрация электронов проводимости в немагнитном слое и степень их поляризации будут здесь определяющими факторами. Определенные успехи в исследовании пленочных структур в системе *ферромагнитный металл/полупроводник* уже достигнуты (см. обзор [1]).

К настоящему времени обнаружены следующие новые проявления:

- температурно-зависимое межслоевое взаимодействие;

- зависимость обменных взаимодействий от легирующих примесей в полупроводнике;
- фотоиндуцированный вклад в межслоевой обмен;
- зависимость обменных взаимодействий от толщины ферромагнитного слоя;
- влияние магнитного поля на межслоевое взаимодействие;
- поведение, подобное спин-стеклольному.

Однако эффекты спин-зависимого транспорта имеют величины недостаточные для практического применения. И исследования в этом направлении продолжают как в плане разработки технологии, так и в плане изучения фундаментальных свойств, в частности, влияние интерфейса на магнитные и транспортные свойства.

Одним из решений этой проблемы видится в использовании немагнитных прослоек, например, из полуметаллического материала. При увеличении концентрации носителей в прослойке сохраняется чувствительность к внешним воздействиям.

Магнитные наноразмерные слоистые структуры с полуметаллической прослойкой являются слабо изученными объектами и представляют значительный интерес для физики конденсированного состояния. А создание и изучение структур в системе пермаллой-висмут, в силу крайне малой магнитной анизотропии магнитного материала, направлено, главным образом, на изучение межслоевых взаимодействий и эффектов, обусловленных интерфейсной анизотропией.

Целью работы является совершенствование технологии получения пленок в системе пермаллой-висмут. Исследование их магнитных, резонансных и магниторезистивных свойств в зависимости от толщины висмутового слоя.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- отработка технологии получения пленочных структур в системе пермаллой-висмут (двух- и трехслойные пленки) для обеспечения воспроизводимости их магнитных свойств;
- изучение полевых и температурных зависимостей намагниченности пленок с разной толщиной немагнитной прослойки;
- магниторезонансные исследования межслоевых взаимодействий и влияния интерфейсной анизотропии на магнитные свойства пленочных структур пермаллой-висмут;
- исследования влияния магнитного поля на электрические транспортные свойства пленок NiFe/Bi/NiFe.

Научная новизна работы:

- отработаны оптимальные условия для получения двух- и трехслойных пленочных структур в системе пермаллой-висмут;
- методами магнитостатических измерений обнаружен осциллирующий характер межслоевого взаимодействия между слоями пермаллоя через полуметалл в зависимости от толщины прослойки висмута;
- методом электронного магнитного резонанса определены величины обменного поля и интерфейсной анизотропии, получены их температурные зависимости;
- обнаружено влияние температуры на величину магнитной анизотропии, при этом для малых толщин висмута (4 и 6 нм) наблюдается рост величины анизотропии с температурой. Имеет место смена знака анизотропии в трехслойной пленке с $t_{\text{Bi}} \approx 15$ нм;
- в трехслойных пленках NiFe/Bi/NiFe обнаружено влияние полуметаллической прослойки висмута на магнитосопротивление.

Научно-практическая значимость работы заключается в развитии исследований в пленках *ферромагнитный металл/полуметалл*. Системы

пермаллой-висмут расширяют семейство материалов, обладающих управляемым межслоевым взаимодействием, что важно при разработке новых устройств на основе спин-зависимого транспорта. Также обнаружены: 1) смена знака интерфейсной анизотропии, 2) рост величины анизотропии для пленок с малой толщиной висмута с температурой.

Теоретическая ценность работы состоит в обнаружении межслоевого взаимодействия между ферромагнитными слоями через прослойку висмута и появления интерфейсной анизотропии, что расширяет представления о механизмах формирования магнитной структуры пленки. Существование длиннопериодических осцилляций межслоевого взаимодействия ставит новые задачи в изучении систем с полуметаллической прослойкой.

Достоверность результатов обеспечена применением высокоточного оборудования, надежных методик проведения эксперимента и анализа полученных результатов. В работе наблюдается согласие между данными, полученными из разных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты магнитостатических исследований трехслойных пленок NiFe/Bi/NiFe, где получена осциллирующая зависимость поля насыщения от t_{Bi} с периодом осцилляций 8 нм, что заметно превышает период осцилляций межслоевого обмена для пленок с немагнитными металлическими и полупроводниковыми прослойками.
2. Результаты магниторезонансных исследований для пленок с разной толщиной прослойки, где установлено, что имеет место зависимость межслоевого взаимодействия и интерфейсной магнитной анизотропии от толщины висмута и температуры. Показано, что при толщине висмута $t_{\text{Bi}} \approx 15$ нм интерфейсная анизотропия меняет знак.

3. В пленках NiFe/Bi/NiFe наблюдался эффект влияния магнитного поля на электрические транспортные свойства. Полученное значение магнитосопротивления имеет величину $\sim 1.5\%$ при величине магнитосопротивления отдельного слоя пермаллоя порядка $0,1\%$.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях и симпозиумах:

- Международный симпозиум «Нанозфизика и нанозлектроника». (Россия, Нижний Новгород, 2011, 2016);
- Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, ВНКСФ-17 (Россия, Екатеринбург, 2011)
- International Symposium on Spin Waves 2011, SW-2011 (Russia, Saint Petersburg, 2011);
- International Conference “Functional Materials”, ICFM – 2011 (Ukraine, Crimea, Partenit, 2011);
- Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2011) (Russia, Moscow, 2011);
- Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых, ВНКСФ-19 (Россия, Архангельск, 2013)
- VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism" (EASTMAG-2016) (Россия, Красноярск, 2016);
- 19-ый Международный симпозиум «Упорядочение в минералах и сплавах» (ОМА – 19) (Россия, Ростов-на-Дону, пос. Южный, 2016).

Личный вклад автора заключается в непосредственном проведении магнитостатических и магниторезистивных измерений, а также написании программы управления при измерении электропроводящих свойств. Автор принимал участие в создании трехслойных магнитных пленок NiFe/Bi/NiFe и

разработке методики измерений магнитотранспортных свойств на установке MPMS-XL.

Публикации. Материалы диссертационной работы изложены в 11 публикациях, среди которых 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и 9 публикаций в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

Работа выполнена в рамках Проекта РФФИ грант № 14-02-00238-а «Создание магнитных слоистых гетероструктур и исследование межслоевых взаимодействий и транспортных свойств» (2014-2016 гг.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 107 страниц, включая 46 рисунков и 2 приложения. Список литературы содержит 74 наименования.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 СВОЙСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Уменьшение линейных размеров вещества до нанометрового масштаба оказывает существенное влияние на его свойства. Например, если взять тонкую металлическую или полупроводниковую пленку (рисунок 1), то энергетический спектр носителей становится дискретным в направлении z .

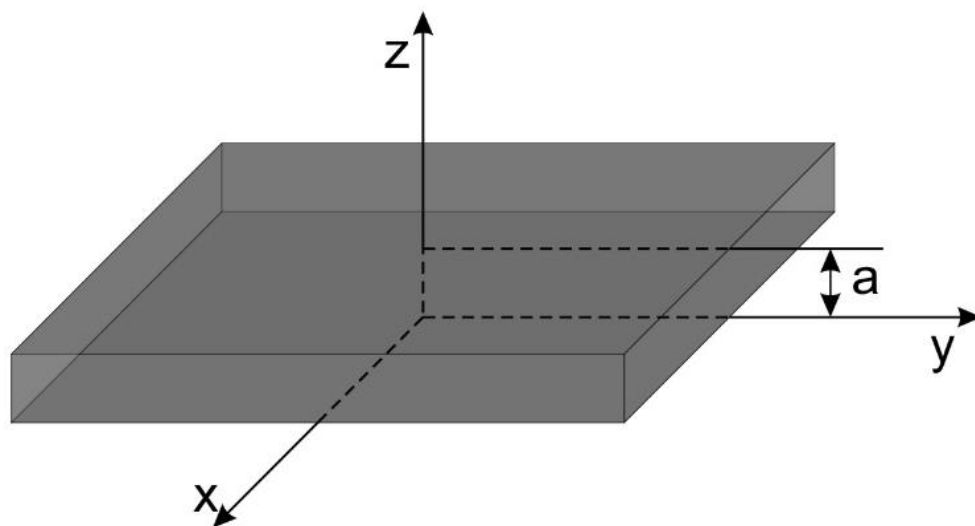


Рисунок 1 – Тонкая пленка, расположенная в плоскости xy и занимающая по оси z пространство от 0 до a

В направлениях осей x и y движение носителей подчиняется законам классической механики и характеризуется импульсами p_x и p_y . Энергия их движения в плоскости пленки равна $E_{xy} = (p_x^2 + p_y^2)/2m$. По оси z материал представляет собой потенциальную яму для находящихся в ней частиц [2]. С двух сторон ($z = 0$ и $z = a$) яма ограничена потенциалами, равными работе выхода. В таком случае согласно законам квантовой механики, энергетические уровни даются формулой:

$$E_n = \pi^2 \hbar^2 n^2 / 2ma^2, \quad (1)$$

где m – эффективная масса носителей, n – целые числа, a – ширина ямы. Полная энергия движения носителей в тонкой пленке будет равна сумме E_{xy} и E_n .

Другим немаловажным фактором при уменьшении размеров материала является увеличение доли поверхностных атомов или ионов в низкоразмерных системах. Если говорить об ультратонких магнитных пленках толщиной в несколько атомных слоев, то здесь количество поверхностных атомов становится сравнимым с числом атомов внутри материала. А это значит, что возросло количество магнитных атомов, которые находятся в несимметричном окружении, что не может не влиять на магнитные свойства всего образца. Причем если со стороны объема симметрия материала постоянна, то с другой (свободной стороны) атомы могут контактировать с разными средами (не только с вакуумом или воздухом). Пленка может быть покрыта самыми разнообразными веществами. В то же время она должна находиться на подложке, и среди используемых материалов, контактирующих с обратной стороной пленки, тоже наблюдается заметная вариативность. Каждый новый материал по-своему влияет на магнитные моменты атомов, расположенных на поверхности (или интерфейсе) магнитного вещества. Следовательно, можно получить структуры с разными магнитными свойствами, меняя количество, толщины и порядок слоев, а также вещества, из которых они изготовлены.

С помощью послойного нанесения различных материалов создаются «сверхрешетки», где роль атомных плоскостей и магнитных подсистем играют слои разных веществ. В магнитных многослойных системах обнаружено антиферромагнитное межслоевое взаимодействие [3], а также эффект гигантского магнитосопротивления [4, 5]. Позже было найдено, что зависимость межслоевого взаимодействия от толщины немагнитной прослойки носит осциллирующий характер [6].

1.1.1 МЕЖСЛОЕВОЕ ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Обычно структуры, в которых наблюдается межслоевое обменное взаимодействие, состоят из магнитных слоев толщиной от десятых долей до десятков нанометров, разделенных тонкой прослойкой немагнитного металла. Осцилляция обменной межслоевой связи в таких структурах происходит как по знаку, так и по величине.

Для наблюдения осцилляций требуется очень высокое качество приготовления многослойных структур. Ранние исследования [7-9] не привели к положительным результатам, так как полученные в то время структуры обладали существенным количеством дефектов. Наличие дефектов, например, «закороток», нарушающих непрерывность немагнитного слоя, позволяет ферромагнитным слоям напрямую контактировать друг с другом. В результате вместо двух отдельных магнитных слоев образуется единая ферромагнитная область. Также возможно образование интерфейса типа «апельсиновая корка» между магнитными слоями, разделенными немагнитным слоем, из-за сильной шероховатости на интерфейсе [10, 11]. В 1986 году была обнаружена антиферромагнитная связь между ферромагнитными слоями [3], что стало, помимо прочего, доказательством получения слоистых структур высокого качества.

Осцилляционный характер межслоевой обменной связи при изменении толщины прослойки наводит на мысль о сходстве этого эффекта с взаимодействием Рудермана-Киттеля-Касуя-Иосиды (РККИ). РККИ-взаимодействие меняется по величине и знаку при изменении расстояния между магнитными ионами. Если интеграл косвенного обменного взаимодействия (I) больше нуля, то наблюдается ферромагнитное упорядочение. Если же $I < 0$, то упорядочение становится антиферромагнитным. В многослойных структурах с изменением толщины промежуточного немагнитного слоя меняется расстояние между магнитными слоями и, соответственно, векторами намагниченности этих слоев. Межслоевое взаимодействие является подобным взаимодействию РККИ, но простое применение теории РККИ не дает совпадения с экспериментальными данными.

Способы согласования теоретических расчетов с экспериментом подробно описаны в работах [12, 13].

Принято, что сила межслоевого взаимодействия определяется константой J . Для больших толщин прослойки t в приближении одномерной квантовой ямы константа межслоевого взаимодействия находится по формуле [14]:

$$J = (\hbar v_F / 2\pi t) |R_{\uparrow} - R_{\downarrow}|^2 \cos(2k_F t + \varphi), \quad (2)$$

где $v_F = \hbar k_F / m_e$ – скорость на уровне Ферми, m_e – масса электрона, R_{\uparrow} и R_{\downarrow} – амплитуды отражения от интерфейсов для электронов с соответствующим направлением спина. Отсюда можно увидеть затухающий характер межслоевого взаимодействия при увеличении толщины прослойки пропорционально $1/t$. Осцилляция величины связи происходят из-за изменения конфигурации уровней квантовой ямы в зависимости от толщины промежуточного слоя. Каждый последующий максимум связан с пересечением уровня Ферми очередным энергетическим уровнем. Фаза определяется процессами отражения на границах раздела.

С учетом особенностей поверхности Ферми материала прослойки зависимость величины обмена от толщины прослойки определяется выражением:

$$J = \sum (J_i / t^2) \sin(q_i t + \varphi_i), \quad (3)$$

где q_i – различные вектора соединяющие точки на поверхности Ферми, в которых волновой вектор на уровне Ферми имеет одинаковую величину, но противоположное направление [15]. Это объясняет многопериодические осцилляции межслоевого взаимодействия, т.к. каждое слагаемое может иметь свою амплитуду период и фазу.

Таким образом, период осцилляции межслоевого взаимодействия определен волновым вектором электронов на уровне Ферми в прослойке и не зависит от свойств ферромагнитного металла. Материал магнитных слоев определяет

величину взаимодействия. Энергия межслоевого взаимодействия зависит от намагниченностей магнитных слоев и выражается как:

$$E = -JAM_1 \cdot M_2 \quad (4)$$

где A – площадь двух пленок, M_1 и M_2 – намагниченности слоев. Когда константа межслоевого взаимодействия имеет отрицательный знак, в структуре наблюдается антиферромагнитное упорядочение. Если $J > 0$, то связь – ферромагнитная. Такое выражение для энергии межслоевой связи называют «билинейной формой». Существует более сложная «биквадратичная форма», в которой учитываются взаимодействия, приводящие к перпендикулярному расположению намагниченностей в соседних слоях [14]. Стоит отметить, что экспериментально можно определить параметры поверхности Ферми и всего, что связано с ней. Амплитуды отражения можно только рассчитать, но это сопряжено с рядом теоретических трудностей.

1.1.2 МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА

Одной из актуальных задач физики многослойных структур является изучение взаимосвязи магнитных и электрических свойств. Важным проявлением такой связи является зависимость транспортных свойств от внешнего магнитного поля. Этот эффект определяется тем, что, как давно известно [16], электроны в металлах имеют два спиновых состояния и, когда к металлу приложено электрическое поле, текут примерно два независимых потока электронов. Например, в немагнитном металле, таком как медь, эти два канала являются эквивалентными, в том смысле, что на уровне Ферми они имеют одинаковые плотности электронных состояний, одинаковые скорости электронов. Но в ферромагнитных переходных металлах эти характеристики обычно существенно различаются. Однако до недавнего времени для большинства физических наблюдений представляла интерес только полная проводимость этих двух

параллельных токов (или спиновых каналов). Ситуация резко изменилась после открытия эффекта гигантского магнитосопротивления и надежной воспроизводимости спин-зависимого туннелирования в многослойных структурах.

В качестве элементарной ячейки, на основе которой происходит изучение явления спин-зависимого транспорта, обычно используют трехслойные структуры наноразмерных толщин, когда два ферромагнитных слоя разделены немагнитной прослойкой (металл, полупроводник или диэлектрик). Рисунок 2 демонстрирует схему переноса электрона с различными спиновыми состояниями через немагнитную прослойку между ферромагнитными слоями для разных типов межслоевого взаимодействия [17]. Легко получить, что сопротивления для каждой конфигурации намагниченностей имеют вид:

$$(a) R_{\uparrow\uparrow} = 2 \cdot (R_{\uparrow} \cdot R_{\downarrow}) / (R_{\uparrow} + R_{\downarrow}), \quad (5)$$

$$(б) R_{\uparrow\downarrow} = (R_{\uparrow} + R_{\downarrow}) / 2, \quad (6)$$

при этом $R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow} = (R_{\uparrow} - R_{\downarrow})^2 / [(R_{\uparrow} \cdot R_{\downarrow}) \cdot 2] > 0$.

Т.е. при антипараллельной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев сопротивление трехслойной структуры больше, чем при параллельной ориентации. Величина обычно выражается как отношение изменения сопротивления к сопротивлению при параллельной конфигурации:

$$MC = (R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}) / R_{\uparrow\uparrow}. \quad (7)$$

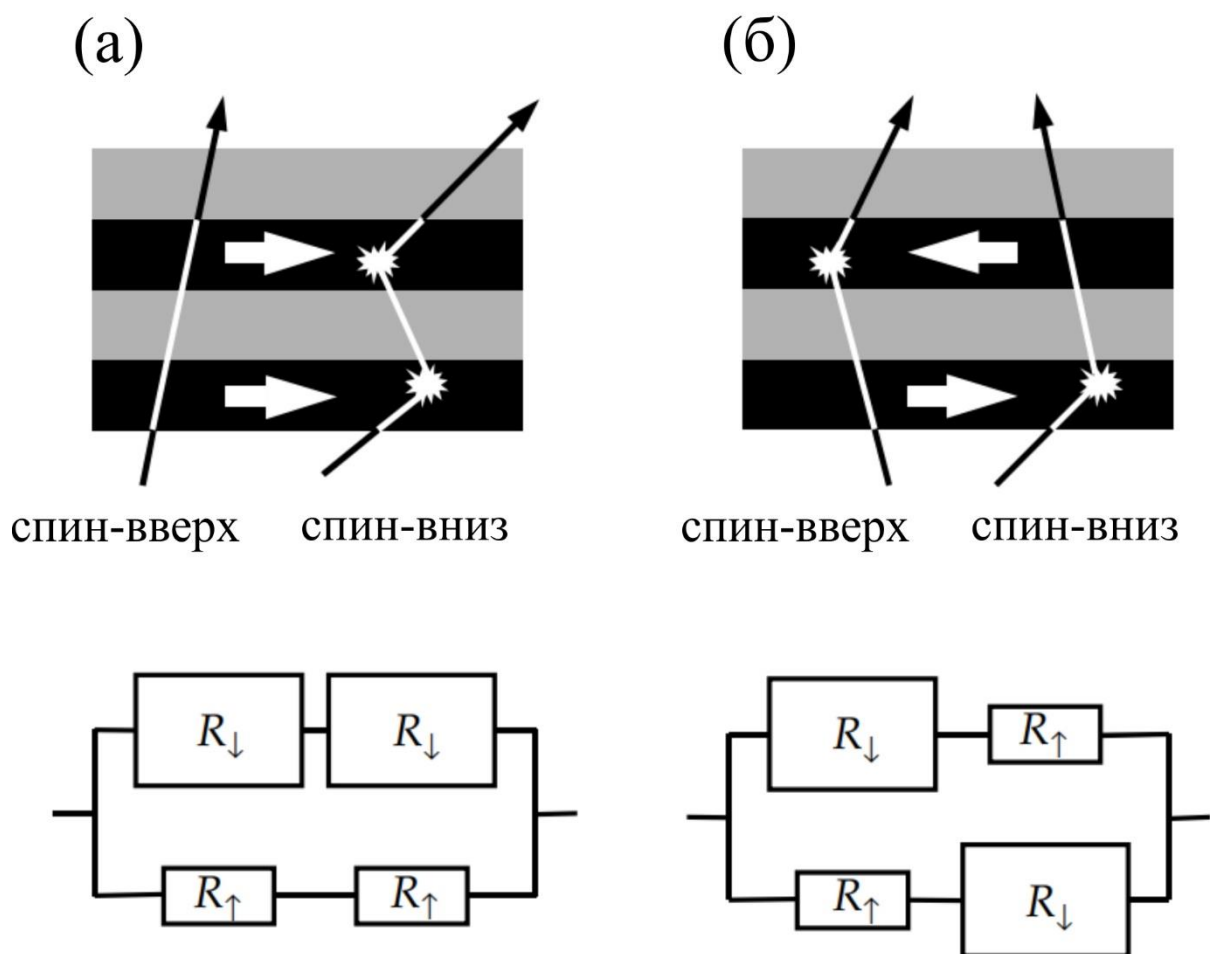


Рисунок 2 – Иллюстрация электронного транспорта в трехслойной структуре для параллельного (а) и антипараллельного (б) направлений намагниченности ферромагнитных слоев. Намагниченности слоев указаны стрелками. Сплошные линии указывают индивидуальные траектории электрона внутри спиновых каналов. Предполагается, что средняя длина свободного пробега много больше, чем толщины слоев, и электрический ток течет в плоскости слоев. Нижняя часть рисунка представляет резистивную сетку для двух токовой модели. Для параллельной конфигурации слоев (а) электроны со спином вверх проходят через структуру полностью без рассеяния, тогда как электроны со спином вниз сильно рассеиваются внутри обоих ферромагнитных слоев [17]

1.1.3 МАГНИТНАЯ АНИЗОТРОПИЯ

Магнитная анизотропия выражается в различии магнитных свойств тела при намагничивании по разным кристаллографическим направлениям. Направления, вдоль которых намагничивание осуществляется с наименьшими энергетическими затратами, называют «легкими осями». Появление магнитной анизотропии связывают с двумя основными источниками: спин-орбитальная связь («магнитная кристаллографическая анизотропия») и магнитостатическое диполь-дипольное взаимодействие («анизотропия формы»). Величина анизотропных свойств характеризуется энергией магнитной анизотропии.

Магнитная анизотропия тонких магнитных пленок отличается от анизотропии объемного образца из того же вещества. При уменьшении размеров тела в одном пространственном направлении энергия магнитной анизотропии может возрасти на несколько порядков. Это связано с увеличением доли ионов, находящихся в несимметричном окружении (на поверхности или интерфейсе).

Обычно тонким магнитным пленкам свойственна одноосная магнитная анизотропия, энергия которой дается следующим выражением:

$$E = K \sin^2(\varphi) + K_2 \sin^4(\varphi), \quad (8)$$

где φ – полярный угол от нормали к поверхности пленки. У тонких пленок константа анизотропии K может быть положительной. В этом случае намагниченность выходит из плоскости пленки, преодолев магнитостатическое взаимодействие. При этом магнитная анизотропия сильно зависит от технологии получения пленочной структуры [18].

Анизотропные свойства зависят от контакта магнетика с другими материалами. Например, наличие различных веществ на поверхности никеля существенно влияет на величину и знак энергии анизотропии. Так для объемного Ni поверхностный вклад равен 27 мкэВ/атом, в то время как вклад в случае Cu/Ni и O/Ni – 59 и -17 мкэВ/атом, соответственно [14]. Слоистые структуры содержат

границы раздела разнородных веществ. Связанную с ними магнитную анизотропию называют «интерфейсной анизотропией».

1.2 ВИСМУТ И ЕГО НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ ФОРМЫ

Среди полуметаллических материалов висмут выделяется по целому ряду необычных физических свойств как для объемных [17], так и для пленочных образцов [20]. Согласно фазовой диаграмме [21], в системах 3d-металл–висмут большинство элементов не образуют соединений. Это означает, что можно ожидать четких границ между слоями висмута и пермаллоя без каких-либо дополнительных соединений, влияющих на магнитные свойства.

В целом висмут характеризуется высокой подвижностью носителей заряда, малой эффективной массой, и сильно анизотропной поверхностью Ферми. Длина свободного пробега электрона в V_i имеет большое значение и в определенных случаях, как, например, в крестообразных структурах из ультратонких пленок висмута, может достигать 1 мкм [22].

Внешние факторы могут влиять на транспортные свойства висмута. Из-за частичного перекрытия валентной зоны и зоны проводимости, концентрация носителей в висмуте зависит от температуры. Помимо того, пленки висмута при определенных условиях в процессе напыления могут демонстрировать металлический или полупроводниковый тип проводимости, а также немонотонный характер зависимости сопротивления от температуры [22]. На транспортные свойства V_i заметно влияют размеры образца. Объемный висмут обладает удельным сопротивлением $115 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, в то время как в пленке V_i толщиной 1 мкм этот показатель возрастает до $200 \cdot 10^{-8}$ Ом·м и увеличивается еще больше в нанопроволоке диаметром 400 нм [23]. К тому же сопротивление низкоразмерных форм висмута (нанопроволоки диаметром 400 нм и наночастиц размером 100 нм) увеличивается при уменьшении температуры, тем самым демонстрируя полупроводниковый тип проводимости [23, 24].

Известно, что объемные образцы висмута обладают большим положительным эффектом магнитосопротивления. В тонких монокристаллических пленках висмута величина МС зависит от направления приложенного магнитного поля, температуры и толщины пленки [25]. Максимальное значение (около 290% при комнатной температуре и до 153000% при температуре 5 К в поле 5 Тл) наблюдается в образцах толщиной 10 мкм в магнитном поле, направленном перпендикулярно поверхности пленки. С уменьшением толщины пленки эффект МС ослабевает в несколько раз [25].

Немаловажную роль в проводимости тонких пленок висмута, в отличие от объемного материала, играет его поверхность. В работе [26] исследовались эпитаксиально выращенные тонкие пленки $\text{Bi}(111)$ разной толщины d на подложке $\text{BaF}_2(111)$. В интервале толщин 4 – 25 нм были исследованы транспортные свойства. Обнаружено, что при низкой температуре (5 К) у образцов с $d > 15$ нм при увеличении толщины пленки практически не изменяется проводимость (рисунок 3).

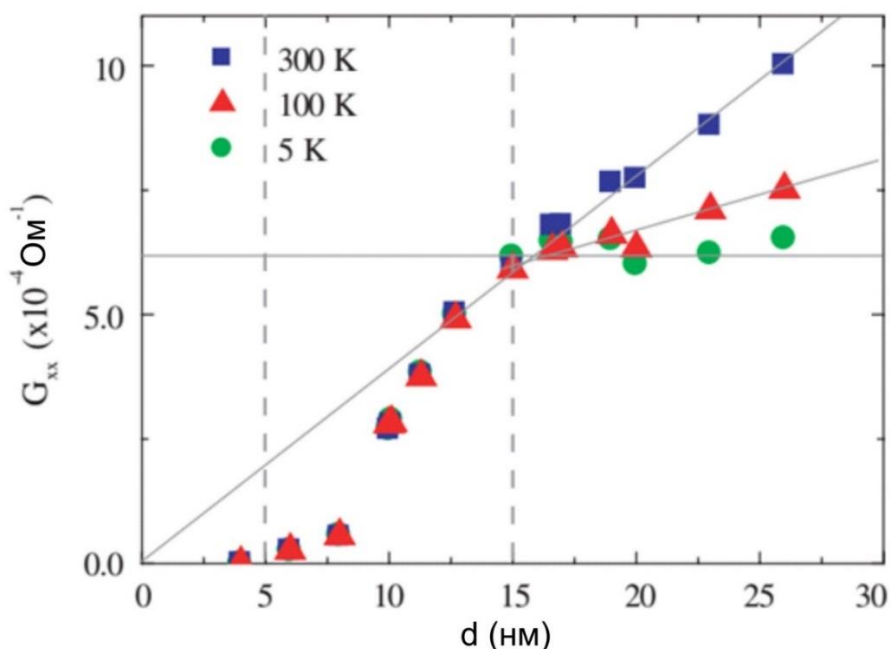


Рисунок 3 – Зависимость проводимости тонких пленок $\text{Bi}(111)$ от их толщины при температурах 5, 100 и 300 К [26]

Такое поведение объясняется тем, что поверхность пленки $\text{Bi}(111)$ является металлической, в то время как материал в толщине образца – полупроводником. Рассчитанные значения ширины запрещенной зоны ΔE составили 46 мэВ для пленки толщиной 15 нм и 26 мэВ для $d = 20$ нм. При 5 К тепловая энергия оказывается много меньше ΔE , поэтому увеличение толщины пленки не дает увеличения проводимости.

Влияние поверхности на транспортные свойства также отмечено в работе [27], где исследовались ультратонкие пленки висмута толщиной от 4 до 20 моно слоев (один моно слой имеет толщину 3.9 Å). Из-за связи между поверхностными и объемными состояниями появляется когерентный транспортный канал. Этот эффект зависит от толщины пленок с 6-16 моно слоями, что отражается на эффекте магнитосопротивления (рисунок 4). А для пленки из 20 моно слоев характер полевой зависимости сопротивления становится таким же как у объемного висмута, из-за того, что начинает доминировать канал объемной проводимости.

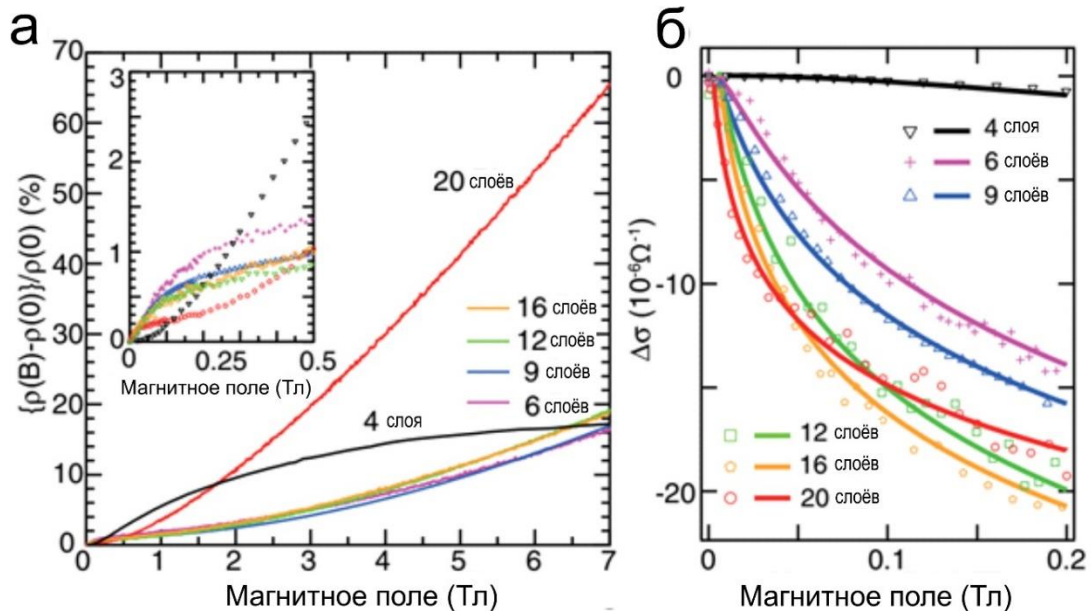


Рисунок 4 – (а) эффект магнитосопротивления для ультратонких пленок $\text{Bi}(111)$ с разной толщиной слоев. На вставке приведен увеличенный участок малых полей, (б) – зависимость проводимости ультратонких пленок $\text{Bi}(111)$ от магнитного поля из данных графиков (а) [27]

Висмут и его низкоразмерные формы мало используются в технике, поэтому большинство практически-направленных исследований посвящено изучению Вi-содержащих полупроводниковых сплавов, которые могут быть использованы в качестве материала для инфракрасных приемников [28] или многослойных пленок 3d-металл–висмут [29] для микроэлектромеханических (MEMS) устройств.

1.3 МАГНИТНЫЕ Вi-СОДЕРЖАЩИЕ СТРУКТУРЫ

1.3.1 Co-Vi

Представляет интерес вопрос, - а как влияет висмут на вещества, по своей природе обладающие сильными ферромагнитными свойствами? Ферромагнитный Co не смешивается с Вi, но слоистую структуру в этой системе создать трудно. Например, пленки $[\text{Co/Vi}]_{19}/\text{Co}$, полученные с помощью электронно-лучевого напыления на подложку из стекла, представляют собой висмутовые слои с вкраплениями небольших гранул Co [30]. Слои Co и Вi напылялись поочередно, и их толщина менялась от образца к образцу. Суммарная толщина структуры составляла от 50 до 100 нм. Слоистая структура не была получена из-за того, что атомы Co при напылении пронизывают слои Вi, вызывая смешивание на границе слоев. Данный процесс похож на то, как формируются пленки MnVi [31], где кристаллы, в отожженных при температуре плавления висмута слоистых пленках, растут за счет внедрения атомов Mn в структуру Вi. Был введен параметр x , равный процентному содержанию кобальта в соединении.

Магнитные измерения при комнатной температуре на образцах $[\text{Co/Vi}]_{19}/\text{Co}$ показали линейное увеличение намагниченности насыщения с ростом параметра x . При этом коэрцитивная сила уменьшалась по закону $1/x$. По мере увеличения содержания кобальта, петли магнитного гистерезиса образцов становились более узкими и вытянутыми.

Сопротивление образцов $[\text{Co/Vi}]_{19}/\text{Co}$ зависит от процентного содержания Co и Вi. При комнатной температуре удельное сопротивление (ρ) пленки из чистого

висмута составляет 1068 мкОм·см, и при охлаждении оно уменьшается. Но с увеличением параметра x наблюдается резкое уменьшение ρ (до 400 мкОм·см в структуре, содержащей 10% кобальта). Далее удельное сопротивление продолжает уменьшаться. У пленки чистого кобальта его значение составляет 33 мкОм·см, и наблюдается металлический тип температурной зависимости. В интервале $x = 10 \div 40$ удельное сопротивление очень слабо меняется при изменении температуры, что связывается с возникновением прыжковой проводимости между гранулами Co [30].

Магнитосопротивление образцов $[\text{Co}/\text{Bi}]_{19}/\text{Co}$ тоже зависит от концентрации кобальта. Так, для чистой пленки висмута оно пропорционально квадрату приложенного поля с минимумом при $H = 0$ (рисунок 5).

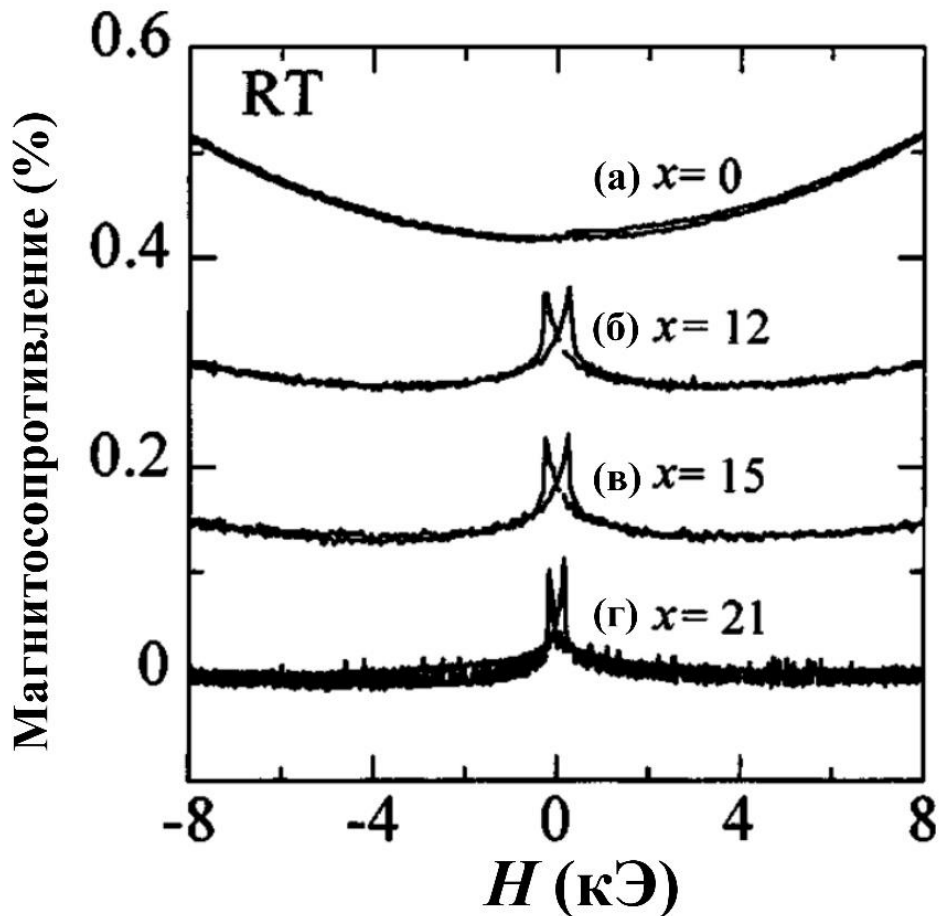


Рисунок 5 – Магнитосопротивление образцов $[\text{Co}/\text{Bi}]_{19}/\text{Co}$ разной концентрации x при комнатной температуре. (а) – пленка чистого висмута, (б) – Co (0.5 нм)/Bi (4 нм), (в) – Co (0.5 нм)/Bi (3 нм), (г) – Co (0.5 нм)/Bi (2 нм) [30]

Такое магнитосопротивление, вызванное действием силы Лоренца, характерно для немагнитных полупроводников, и его называют «обычным магнитосопротивлением» (ОМС). При наличии кобальта в области нулевого поля появляются два дополнительных пика. Положение пиков меняется в зависимости от параметра x и соответствует значениям коэрцитивного поля. Предполагается, что дополнительные пики возникают из-за эффекта анизотропного магнитосопротивления (АМС). ОМС резко уменьшается при добавлении кобальта. АМС, наоборот, быстро возрастает при увеличении количества Со в соединении, достигая максимального значения (0.11 %) в интервале $x = 15 \div 20$. После этого анизотропное магнитосопротивление начинает монотонно убывать.

В другой работе получение многослойных пленок из кобальта и висмута с помощью электронно-лучевого напыления также сопровождалось проникновением атомов кобальта в слои висмута [32]. Разные соотношения содержания Со и Вi в образцах были получены за счет изменения толщины слоев кобальта t_{Co} в диапазоне от 1.2 до 9 нм. При этом толщина висмутовых слоев была неизменна и составляла 6 нм.

Смешивание элементов происходит на границах слоев. Атомы Со, оказываясь в межузловых позициях решетки Вi, создают напряжение кристаллической структуры, которое выражается в небольшом изменении ее параметров. Для пленки толщиной 100 нм, не содержащей Со, параметры ромбоэдрической структуры висмута имеют значения $a = 4.558 \text{ \AA}$ и $c = 11.90 \text{ \AA}$. В образце той же толщины, но с небольшим содержанием ферромагнетика, $a = 4.549 \text{ \AA}$ и $c = 11.88 \text{ \AA}$. Образцы с большим содержанием Со состоят из однородной матрицы висмута и небольшого количества распределенных в ней кластеров кобальта.

В работе [33] были созданы образцы $Co(5 \text{ нм})/Bi(t_{Bi})/Co(10 \text{ нм})$ и $Co(5 \text{ нм})/Bi(t_{Bi})/Co(20 \text{ нм})$, где толщина слоя висмута t_{Bi} менялась в диапазоне от 1 до 30 нм. После изготовления пленки подвергались обжигу при температурах 680 К и 900 К. Полученные образцы не обладают слоистой структурой. Они состоят из кобальтовой матрицы со случайно распределенными в ней гранулами висмута. В

образцах до обжига, а также после отжига с температурой 680 К кобальт имеет ГПУ-структуру. При увеличении температуры отжига до 900 К структура кобальта становится кубической гранецентрированной.

Магнитосопротивление образцов значительно возрастает с увеличением температуры отжига до 900 К. Авторы [33] связывают этот факт с происходящей при такой температуре отжига трансформацией структуры кобальта. Зависимость величины эффекта МС от толщины висмутовой прослойки оказалась осциллирующей (рисунок 6). Средний период осцилляции составил 10 нм.

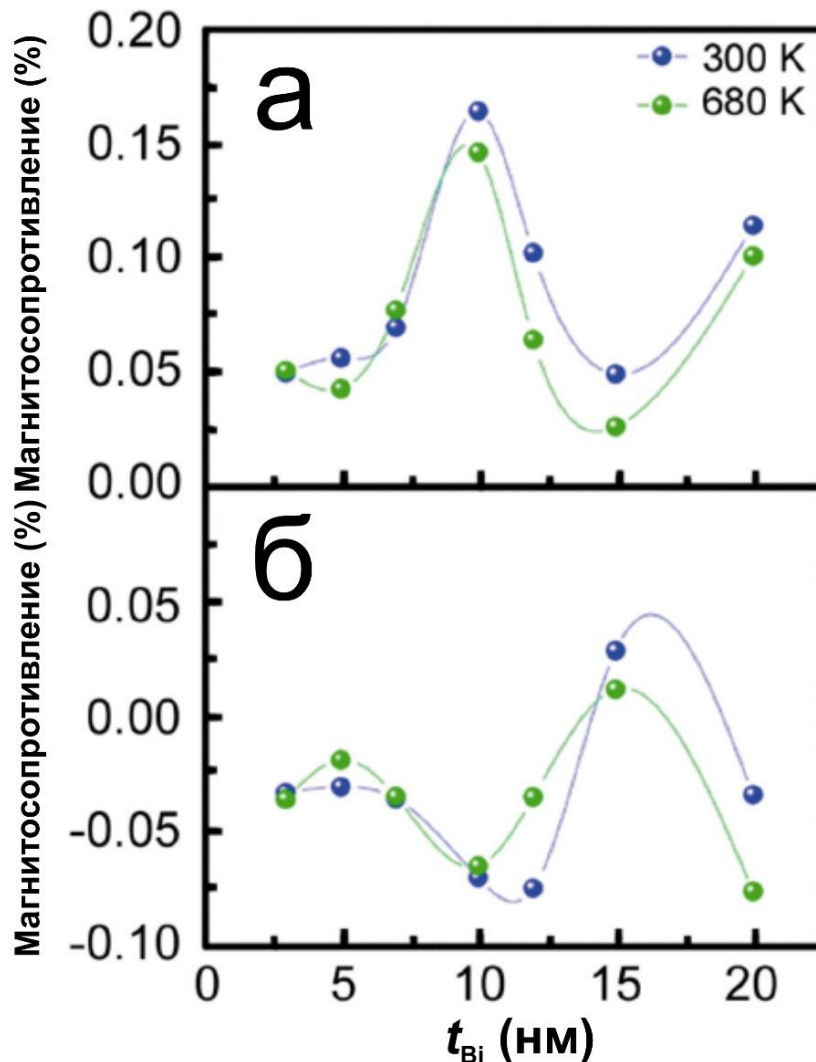


Рисунок 6 – Зависимость магнитосопротивления от толщины прослойки V_i в структурах $Co/V_i/Co$ в продольном (а) и поперечном (б) направлениях [33]

Найдено, что отжиг при температуре 680 К уменьшает намагниченность насыщения M_s и остаточную намагниченность M_r образцов Co/Vi/Co. Также M_s и M_r уменьшаются по мере увеличения t_{Vi} . Толщина прослойки висмута оказывает слабое влияние на величину коэрцитивной силы H_c у пленок без отжига. Однако у образцов, прошедших отжиг, с увеличением толщины прослойки (а также с ростом температуры отжига) значительно увеличивается H_c .

1.3.2 Fe-Vi

Железо, как и кобальт, не смешивается с висмутом, поэтому сплав с однородной структурой невозможно получить с помощью диффузии в твердой фазе или быстрой закалкой. Однако метастабильный объемный сплав FeVi можно изготовить методом ионного перемешивания и магнетронного распыления [34]. Образцы состава $Vi_{50}Fe_{50}$ имеют аморфную структуру. А в образце $Vi_{65}Fe_{35}$ отсутствует ОЦК-железо. При этом ромбоэдрическая фаза висмута имеет параметры ($a = 4.708 \text{ \AA}$ и угол между кристаллографическими осями $\theta = 57^\circ 26.1'$), немного отличающиеся от параметров решетки чистого висмута ($a = 4.739 \text{ \AA}$ и $\theta = 57^\circ 14.6'$). Это говорит о том, что атомы Fe встраиваются в ромбоэдрическую структуру висмута. Из-за существенного различия атомных радиусов эта фаза оказывается менее стабильной, чем аморфная фаза в образце $Vi_{50}Fe_{50}$, и при комнатной температуре распадается на чистые Vi и Fe.

Помимо того, в полученных методом магнетронного распыления пленках Fe_xVi_{1-x} [35, 36] отмечается необычно большое значение времени магнитной релаксации. Само явление магнитной релаксации известно давно и хорошо изучено как теоретически, так и практически. В большинстве спиновых стекол время релаксации очень мало, а сам эффект наблюдается только при низких температурах. Однако в только что полученных пленках Fe_xVi_{1-x} даже при комнатной температуре намагниченность увеличивается с течением времени по медленному экспоненциальному закону, и не достигает максимального значения

даже по прошествии 10 часов. При понижении температуры процесс релаксации растягивается во времени еще больше.

В системах на основе железа, но не содержащих висмут, таких как Fe-Cu и Fe-Ag, описанный выше эффект не обнаружен [36]. В то же время поведение магнитной релаксации, схожее тому, что проявляется в сплаве Fe-Vi, наблюдается в уже описанной системе Co-Vi. Большое время магнитной релаксации в метастабильном сплаве Fe-Vi объясняется эффектом гибридизации, из-за которого большое спин-орбитальное расщепление уровней в Vi оказывает воздействие на электронную структуру Fe [36].

Пленки $Fe_{1-x}Vi_x$ и $Co_{1-x}Vi_x$, полученные на подложках из покровного стекла, плавленого кварца и NaCl, имеют аморфную структуру при $x = 0.2$ и толщине менее 10 нм. [37]. Изменение концентрации (как в большую, так и в меньшую сторону) или увеличение толщины пленки приводит к появлению кристаллических Vi и Fe (Co). Аморфные пленки $Fe_{1-x}Vi_x$ и $Co_{1-x}Vi_x$ являются ферромагнитными. В похожих образцах $Fe_{1-x}V_x$ при увеличении концентрации бора уменьшаются магнитные моменты атомов железа. Но в пленках $Fe_{1-x}Vi_x$ и $Co_{1-x}Vi_x$ при $x = 0.2$ магнитные моменты атомов железа и кобальта почти полностью сохраняют свою величину (примерно 95% от величины магнитных моментов в чистом Fe и Co).

Также пленки $Fe_{1-x}Vi_x$ и $Co_{1-x}Vi_x$ обладают большой анизотропией со значением константы анизотропии $K = 4 \cdot 10^5$ эрг/см³. Замечено, что на эту величину существенно влияет температура подложки при напылении. Магнитный момент перпендикулярен плоскости пленки.

1.3.3 Ni-Vi

Неожиданные физические свойства проявляются в двухслойной структуре Ni/Vi. Соединение ферромагнитного слоя никеля и диамагнитного слоя висмута проявило, помимо магнитных свойств, еще и сверхпроводимость [38]. Факт существования сверхпроводимости совместно с ферромагнетизмом известен, но только в структурах, которые изготовлены из веществ, первоначально обладающих

такими свойствами (обычно S/F), и сплавах (в том числе и сплав BiNi). Но в данном случае следов смешения слоев не обнаружено, а ни один элемент по отдельности сверхпроводящими свойствами не обладает. При смене порядка осаждения (т.е. в структуре Bi/Ni) сверхпроводимость в структуре все еще сохраняется.

1.4 МНОГОСЛОЙНЫЕ СТРУКТУРЫ С ВИСМУТОМ

Наряду с созданием сплавов и соединений путем смешения составных компонент тем или иным способом, есть еще один подход к получению новых систем с содержанием висмута. Этот способ заключается в искусственном поочередном нанесении разных материалов на подложку. Таким образом получают многослойные структуры, свойства которых могут коренным образом отличаться в зависимости от заданной геометрии и размеров наносимых слоев. Это вносит дополнительные возможности для наблюдения новых эффектов.

Многослойные пленки Fe/Bi с четкой слоистой структурой получены на подложках из SrTiO₃ [39]. Важную роль для данных образцов играет температура подложки в процессе осаждения. Для трехслойных пленок Fe(50 нм)/Bi(15 нм)/Fe(50 нм) четкая структура границы раздела получается при температуре подложки 473 К. Такие образцы обладают магнитной анизотропией с легким направлением в плоскости пленки. Ее появление связывается с наличием висмута, так как намагниченность контрольной пленки (без слоя висмута) является изотропной [39].

В других пленках с чередующимися слоями Fe и Bi также обнаружена магнитная анизотропия [40]. Многослойные структуры были получены на подложках двух типов. Суммарная толщина пленок на подложках NaCl составила более 60 нм, а на кремниевых пластинах – более 150 нм. Если толщина слоев железа была меньше 1.5 нм, то образцы Fe/Bi обладали перпендикулярной магнитной анизотропией. Энергия анизотропии на единицу объема для пленки с $t_{Fe} = 1$ нм составила $K_u = 5.5 \cdot 10^5$ Дж/м³. Это значение превышает энергию анизотропии формы ($2\pi M^2 = 4.7 \cdot 10^5$ Дж/м³), из-за чего намагниченность ориентируется

перпендикулярно плоскости пленки. Для образцов с толщиной слоев железа больше 1.5 нм легкая ось находится в плоскости пленки.

Намагниченность насыщения на единицу объема $4\pi M_s$ многослойных пленок с толщиной слоев железа 4 и 5 нм примерно равна намагниченности насыщения чистого объемного железа ($4\pi M_s = 2.15$ Т). Когда слои железа становятся тоньше 2.5 нм, M_s начинает убывать. При толщине 0.5 нм, что соответствует 2 слоям атомов Fe, магнитный момент практически равен нулю (так называемый "мертвый магнитный слой"). Для пленки с толщиной слоев Fe 1 нм намагниченность насыщения $4\pi M_s$ составляет примерно 1.2 Т. Здесь железо находится в состоянии суперпарамагнетика. В образцах с большей толщиной магнитных слоев железо находится в ферромагнитном состоянии, и присутствует лишь небольшая часть немагнитного железа. Во всех образцах висмут имеет ромбоэдрическую структуру. Железо же имеет аморфную структуру, если толщина слоев $t_{Fe} \leq 1.5$ нм, и ОЦК-структуру в образцах с более толстыми магнитными слоями.

Исследование межслоевого взаимодействия ферромагнитных слоев через прослойку висмута было проведено на структурах CoFe/Vi/Co [41]. Используя в процессе напыления серию масок, были получены образцы двух видов. Первый вид – это пересеченные крест-накрест под прямым углом ферромагнитные полосы, разделенные в месте пересечения круглым висмутовым слоем разной толщины (от 1 до 60 нм). Ферромагнитные полосы имели фиксированные размеры (длина – 1 см, ширина – 0.3 см, толщина – 15 нм). Второй вид – это трехслойные сэндвич-структуры, с теми же толщинами слоев CoFe, Vi и Co.

Оказалось, что толщина промежуточного слоя в крестообразных структурах существенно влияет на форму петель гистерезиса. Для отдельных слоев CoFe и Co, а также контрольной пленки, где они нанесены друг на друга без полуметаллической прослойки, петли имеют ферромагнитный вид. Но уже при добавлении промежуточного слоя висмута толщиной 1 нм картина меняется, и петля гистерезиса такой структуры совершенно не похожа ни на сумму зависимостей двух магнитных слоев, ни на любую другую петлю для этой серии образцов (рисунок 7).

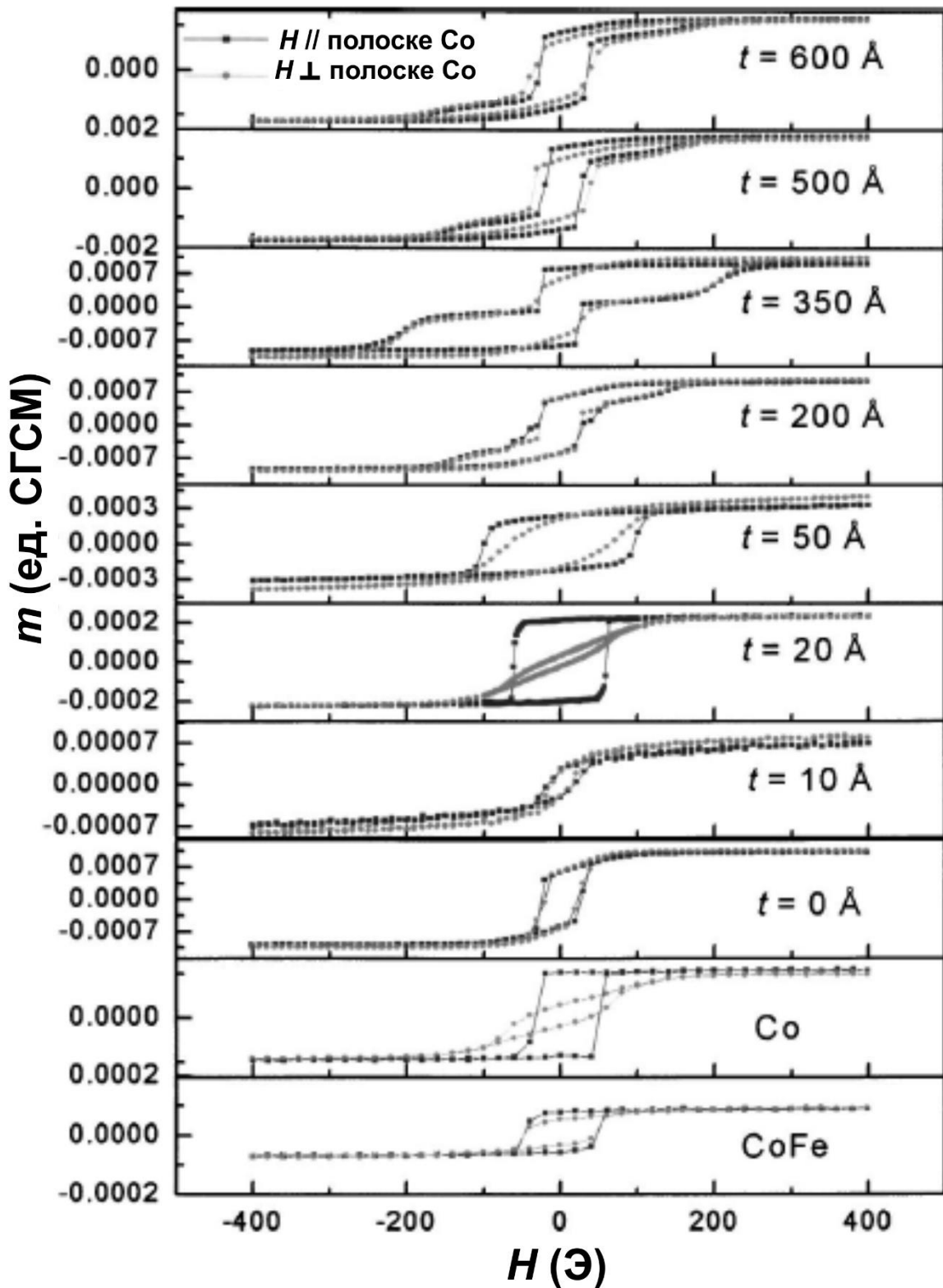


Рисунок 7 – Петли гистерезиса образцов CoFe/Vi/Co крестообразной формы в двух направлениях (параллельно слою Co и слою CoFe) [41]

Отношение остаточной намагниченности к намагниченности насыщения для пленки с толщиной прослойки 1 нм составляет всего 0,2, в то время как для контрольной пленки CoFe/Co эта величина равна 0,6. Это говорит о том, что намагниченности магнитных слоев в малых полях упорядочены антипараллельно, т.е. наблюдается антиферромагнитная связь между слоями.

При увеличении толщины прослойки форма петли претерпевает дальнейшие неоднообразные изменения. Так, уже при $t_{Bi} = 2$ нм петля приобретает квадратный вид, что означает потерю антиферромагнитной связи между слоями CoFe и Co. При толщине висмутовой прослойки от 5 до 20 нм петли имеют ступени. А при 35 нм у петель появляется плато в малых полях, что вновь свидетельствует о появлении антиферромагнитного упорядочения в этих структурах. Образцы с толщиной висмутовой прослойки 50 и 60 нм демонстрируют «растянутую» петлю гистерезиса, которую можно представить, как сумму вкладов, созданных слоями CoFe и Co. Это говорит о том, что магнитные слои независимы друг от друга или обладают слабой ферромагнитной связью. Таким образом, в пленках CoFe/Bi/Co наблюдается изменение поведения намагниченности при увеличении толщины промежуточного слоя висмута.

Похожие изменения формы петли гистерезиса наблюдаются и в трехслойных сэндвич-структурах CoFe/Bi/Co, что исключает влияние размагничивающих полей на результаты магнитных измерений. Получено, что величина межслоевой связи во всех образцах CoFe/Bi/Co осциллирует в зависимости от толщины прослойки висмута. Понижение температуры не меняет характера зависимости межслоевой связи от t_{Bi} , но увеличивает ее амплитуду. Свидетельства наличия антиферромагнитной связи найдены при значениях $t_{Bi} = 1, 10$ и 35 нм.

Авторы [41] отмечают, что силу антиферромагнитной межслоевой связи J можно оценить с помощью выражения $-4J = H_s \cdot M \cdot t_F$, где H_s – поле насыщения, M – намагниченность, а t_F – толщина ферромагнитного слоя. Вычисленное значение ($J = 0.7 \cdot 10^{-3}$ эрг/см²) для пленки с толщиной прослойки висмута 1,5 нм оказалось значительно меньше величины межслоевой связи в структурах с металлической прослойкой (например, для системы Fe/Cr $J = -1$ эрг/см², а для Co/Ru $J = -5$ эрг/см²).

Возможной причиной слабой связи авторы работы называют малую концентрацию носителей заряда в висмуте. При комнатной температуре плотность зарядов в нем $n = p = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что много меньше, чем, например, в меди ($8.5 \cdot 10^{22}$).

Описанным способом можно оценить величину межслоевой связи J при антиферромагнитном упорядочении, но не при ферромагнитном. За ее осцилляциями можно косвенно наблюдать по изменению поля насыщения. При увеличении толщины слоя висмута t_{Bi} от 1 до 2 нм величина H_s уменьшается до минимального значения 64 Э. После этого поле насыщения начинает возрастать, и при толщине приблизительно 10 нм наблюдается максимум. Также есть максимум при 35 нм, после чего следует уменьшение H_s вплоть до самого большого из исследуемых значений толщины Bi (60 нм). Зависимость поля насыщения от толщины прослойки висмута приведена на рисунке 8.

Осцилляция межслоевой связи в структурах CoFe/Bi/Co не может быть представлена в виде простого гармонического процесса, потому что два наблюдаемых колебания происходят с разными периодами (9 и 25 нм). Для простого металла, близкого к модели свободных электронов, период осцилляции постоянный и имеет порядок длины волны Ферми. В нашем случае для висмута эта величина составляет 40 нм, что превышает значение обоих найденных периодов.

Нужно отметить, что межслоевая связь в системе CoFe/Bi/Co обладает гораздо большей протяженностью (60 нм), чем в трехслойных структурах с металлической немагнитной прослойкой (например, 5 нм в Co/Cu/Co и 4.2 нм в Fe/Cr/Fe).

Исследование образцов Co/Bi/Co также подтвердило наличие связи между магнитными слоями в широком диапазоне толщин прослойки (от 0.2 до 50 нм) [42]. Образцы были получены методом магнетронного распыления при комнатной температуре во внешнем поле 250 Э, приложенном параллельно плоскости пленки, чтобы сформировать легкую ось намагничивания. Магнитные слои имели одинаковую толщину 5 нм. Соединений Bi-Co на интерфейсах не обнаружено.

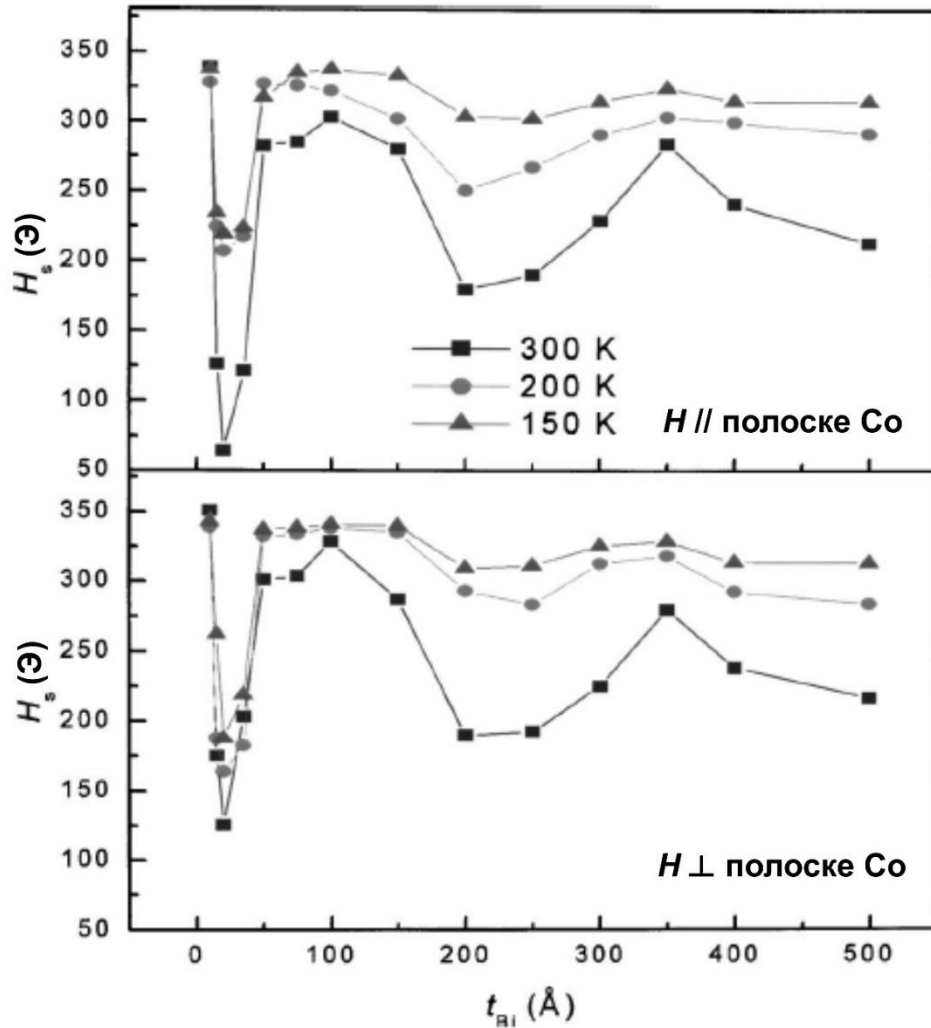


Рисунок 8 – Зависимость поля насыщения образцов CoFe/Vi/Co крестообразной формы от толщины прослойки при разных температурах и направлениях приложенного внешнего поля (вверху – вдоль слоя Co, внизу – вдоль слоя CoFe) [41]

Обнаружено, что форма петель во внешнем поле, параллельном легкой оси намагничивания, зависит от толщины прослойки висмута. Зависимость коэрцитивной силы H_c и намагниченности насыщения H_s носит осциллирующий характер (рисунок 9). Пики для обеих величин наблюдались при толщине прослойки $t_{Bi} = 2, 4, 5, 20$ и 35 нм.

Работа [43], где висмут использован не в качестве прослойки между магнитными слоями, а, наоборот, в качестве обкладок, была направлена на

изучение транспортных свойств. Исследовалось 5 разных структур, среди которых пленка Bi толщиной 10 нм, двуслойная пленка Bi (10 нм)/Co (1.5 нм), а также, трехслойные сэндвич-структуры с тремя наборами толщин: Bi (10 нм)/Co (1.5 нм)/Bi (10 нм), Bi (5 нм)/Co (2 нм)/Bi (5 нм) и Bi (12.5 нм)/Co (2 нм)/Bi (12.5 нм). Образцы имели размеры $0.2 \div 0.5$ мм в ширину и $3 \div 5$ мм в длину. В качестве подложки было использовано очищенное стекло, охлажденное жидким азотом.

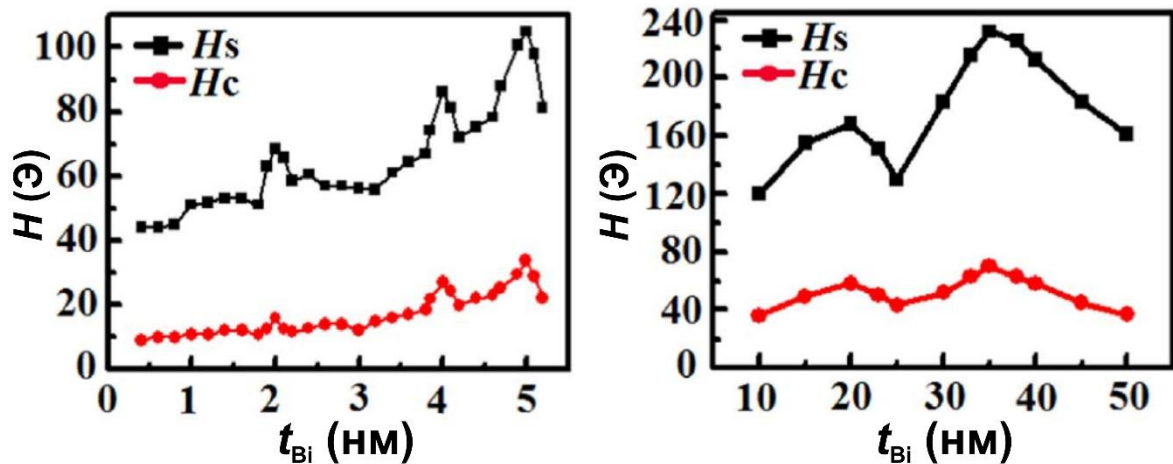


Рисунок 9 – Зависимость H_s и H_c от толщины висмутовой прослойки в структурах Co/Bi/Co. Внешнее поле приложено параллельно легкой оси намагничивания в плоскости пленки [42]

Сопротивление всех пяти образцов (в области высоких температур) уменьшалось при увеличении температуры, тем самым демонстрируя полупроводниковое поведение. А вот при низких температурах найдена особенность, которая заключается в падении сопротивления на 6-8 % у наиболее тонких образцов ниже T_c примерно 3-5 К. Данный эффект разрушается в приложенном внешнем магнитном поле. Совокупность этих фактов может говорить о частичной сверхпроводимости таких пленок.

Главные результаты в изучении магнитотранспортных свойств данных образцов были получены с помощью измерения магнитопроводимости σ в постоянном магнитном поле, приложенном перпендикулярно плоскости пленки.

Во всех образцах наблюдается отрицательная магнитопроводимость, а ее величина логарифмически возрастает с увеличением магнитного поля. В больших полях σ выходит на насыщение. Для образцов Bi/Co и Bi/Co/Bi отмечено снижение величины магнитопроводимости относительно пленки из чистого висмута. Причем для двухслойной структуры это снижение было меньше, чем для трехслойной.

Измерения магнитопроводимости при очень низких температурах (менее 5 К) позволили авторам [43] выделить взаимодействия разного рода и представить их в виде трех рассеивающих полей: H_i – поля неупругого рассеяния, H_{so} – поля спин-орбитального рассеяния, H_s – поля спин-спинового рассеяния. Также транспортные свойства рассмотрены с точки зрения неклассических эффектов рассеяния. Среди них электрон-электронное, спин-орбитальное взаимодействие и эффект слабой локализации электронов.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1 МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК

Для изготовления пленок NiFe/Bi/NiFe применялась технология термического испарения в вакууме. Процесс напыления происходит в вакуумной камере, где создается давление $P < 10^{-5}$ торр. Внизу камеры расположены три источника с кольцевыми катодами, а в верхней части – держатель и нагреватель подложки (рисунок 10). В зависимости от задач в трех источниках могут использоваться одинаковые или разные материалы. Минимальная скорость напыления составляет десятые доли нм/с. Чередование материалов напыления осуществляется последовательным включением и выключением нужных источников.

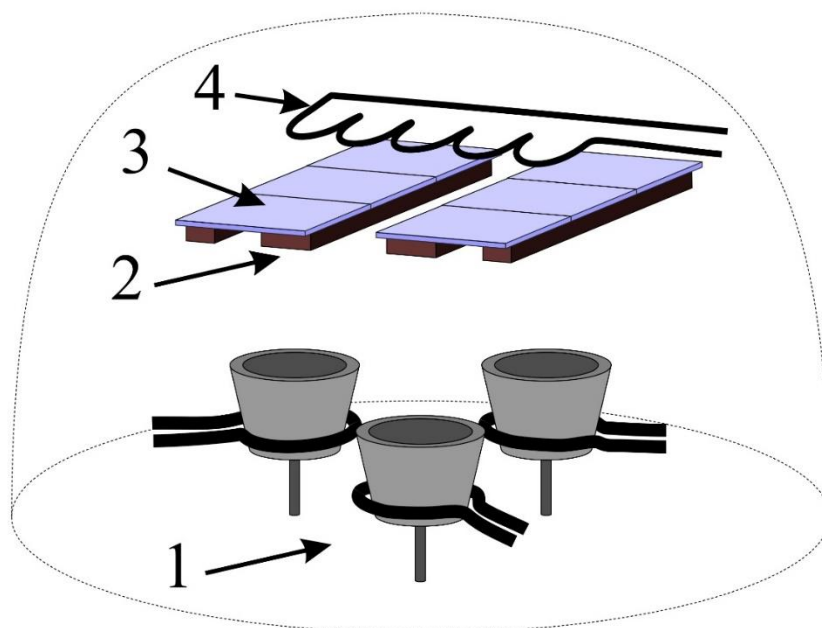


Рисунок 10 – Расположение элементов для напыления пленок методом термического испарения в вакуумной камере. 1 – испарители, 2 – маска, 3 – подложки, 4 – нагреватель подложки.

Поток атомов переносится на подложку, на поверхности которой происходит конденсация. Вакуум обеспечивает большую длину пробега для атомов и сохранение высокой подвижности, что способствует плотному и равномерному распределению вещества на подложке. Подложки из пьезокерамического стекла проходили стандартную процедуру очистки и термообработку для снятия механических напряжений. Над подложками установлен нагреватель, чтобы регулировать их температуру, так как это оказывает существенное влияние на процесс конденсации и свойства будущей пленки.

С помощью различных масок можно получить пленки (или отдельные слои) нужной формы и размеров. Установка также оснащена фигурной заслонкой, которая позволяет закрывать часть пространства, где размещены подложки. С помощью заслонки можно за один цикл напыления получить наборы пленок с разными толщинами того или иного слоя. Когда заслонка отсутствует, то на всех подложках напыляются идентичные слои.

2.2 АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

Метод атомно-силовой микроскопии (АСМ) использовался для контроля качества поверхности изготавливаемых пленок. Атомная силовая микроскопия основана на взаимодействии специального зонда (кантилевера) с поверхностью образца за счет сил Ван-дер-Ваальса. С помощью пьезокерамических манипуляторов кантилевер может перемещаться над исследуемой плоскостью и фиксировать величину ее взаимодействия с зондом.

АСМ-микроскоп может работать в двух режимах. В первом режиме определяется рельеф поверхности образца по изменению силы, действующей на зонд. При этом кантилевер перемещается только в горизонтальной плоскости. Но более распространенным является режим, при котором зонд во время исследования приближается или отдаляется от поверхности (или, наоборот, движется площадка с образцом), сохраняя постоянную величину взаимодействия. За счет очень

тонкого острия кантилевер может различать мельчайшие неровности на поверхности вплоть до атомарного размера.

Реальные установки для атомно-силовой микроскопии требуют высокой точности при изготовлении всех элементов. Игла кантилевера должна быть очень тонкой и прямой, но в действительности она имеет форму клина. При опускании в углубление на поверхности пленки она начинает испытывать взаимодействие не только с острием, но и с боковой поверхностью. Это не дает возможности отследить резкие изменения рельефа, и на изображении они получаются сглаженными. Чтобы получить итоговое изображение, данные, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии, подвергаются сложной компьютерной обработке. Но, несмотря на эти недостатки, на сегодняшний день АСМ является одним из самых наглядных методов исследования поверхности образца, вне зависимости от материала, из которого он изготовлен.

Для исследования поверхности пленок NiFe/Bi/NiFe был использован сканирующий зондовый микроскоп Veeco MultiMode с программным обеспечением NanoScope SPM. Основная функциональная часть прибора изображена на рисунке 11.

Кантилевер данного микроскопа представляет собой пластину, на одном краю которой перпендикулярно ее поверхности закреплена игла. А на противоположной стороне нанесено зеркальное покрытие. На зеркальную поверхность кантилевера направлен луч лазера, который, отражаясь, доходит до фотодетектора. Кантилевер приводится в колебание с помощью специального пьезоэлектрического устройства. В результате действия на него силы со стороны поверхности образца происходит изменение колебаний. Фотодетектор регистрирует изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера. В зависимости от того, касается или нет игла поверхности образца в процессе измерения, возможны три режима работы: бесконтактный, полуконтактный и контактный.

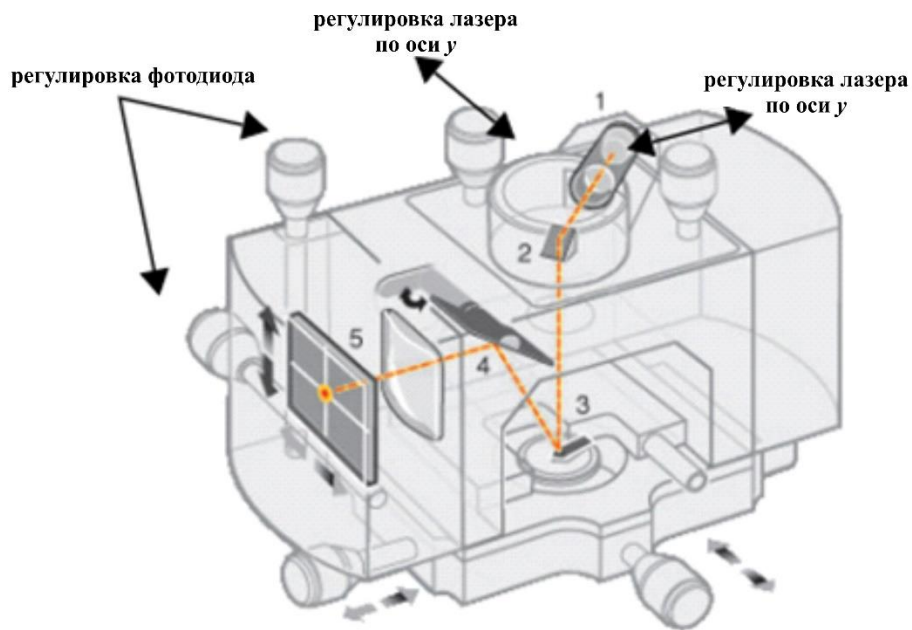


Рисунок 11 – Головная часть Veeco MultiMode SPM и основные компоненты: 1 – лазер, 2 – зеркало, 3 – кантилевер, 4 – наклонное зеркало, 5 – фотодетектор.

Оранжевой пунктирной линией обозначен
путь лазерного луча [44]

С помощью Veeco MultiMode SPM можно проводить исследование поверхности на площади 200×200 мкм. Глубина исследования составляет 10 мкм. По результатам обработки экспериментальных данных получается изображение одного из трех стандартных размеров: 128×128 , 256×256 или 512×512 пикселей.

2.3 МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получить детальную информацию о межслоевых взаимодействиях в многослойных пленках путем одних только магнитных квазистатических измерений не представляется возможным, поскольку эффекты анизотропии, гранулярность пленок, неоднородность состава и пр. могут затушевывать важные детали. Применение метода электронного магнитного резонанса (ЭМР) позволяет решить эту проблему. Спецификой этого метода является то, что параметры ЭМР

чувствительны к деталям взаимодействий, ответственных за формирование магнитного состояния.

Магниторезонансные исследования образцов NiFe/Bi/NiFe проводились на спектрометре, собранном по стандартной схеме и описанном в [45]. Частота СВЧ излучения была $\omega_{\text{УHF}} = 26.7$ ГГц для трехслойных пленок и 9.2 ГГц для двухслойных пленок. Использовался цилиндрический резонатор, действующий на моде TE₀₁. Магнитное поле лежало в плоскости пленки, а температурный диапазон составлял $T = 90\text{--}300$ К.

2.4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА MPMS-XL

Для исследования магнитных свойств пленок NiFe/Bi/NiFe использовался многозадачный автоматизированный комплекс MPMS-XL, обладающий широким набором возможностей для управления функциональными элементами и для контроля хода эксперимента.

Ключевой системой MPMS является СКВИД-магнетометр, чувствительность которого составляет 1×10^{-8} электромагнитных единиц. Измерения можно проводить в температурном диапазоне от 1.9 до 400 К и в магнитных полях от -7 до $+7$ Тл. Образец помещается в цилиндрическую камеру длиной 40 мм и диаметром 9 мм, где обеспечена однородность по магнитному полю и температуре.

Для создания магнитного поля в установке MPMS-XL используется сверхпроводящий соленоид, изготовленный в виде цилиндра из многожильного сверхпроводящего провода. Для подачи или изменения тока в сверхпроводящем контуре предусмотрен «коммутатор незатухающего тока» (КНТ) (см. рисунок 12). Это нагревательная спираль, намотанная на небольшой сегмент соленоида. При подаче напряжения на КНТ участок сверхпроводящего контура переходит в нормальное состояние. Таким образом происходит открытие контура, и можно изменять в нем ток с помощью источника питания.

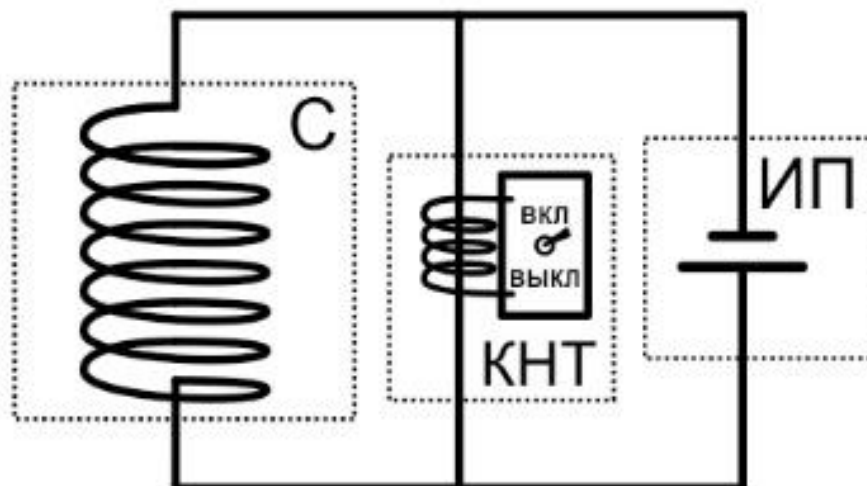


Рисунок 12 – Схема подключения устройств для изменения тока в сверхпроводящем соленоиде. С – сверхпроводящий соленоид, КНТ – коммутатор незатухающего тока, ИП – источник питания

Устойчивым режимом работы сверхпроводящего соленоида считается такой, при котором источник питания выключен из цепи и в системе установилось равновесие. Нестабильность работы при открытом контуре связана с флуктуациями тока в самом источнике питания. В MPMS предусмотрен один режим работы с открытым контуром. Он называется режимом «гистерезис» (hysteresis) и используется для быстрого измерения зависимости намагниченности образца от внешнего поля. Сверхпроводящий контур закрывается в режимах «осцилляции» (oscillate) и «без выбросов» (no-overshot) после стабилизации полученного поля.

Измерительная часть установки MPMS состоит из контура-детектора и СКВИД-датчика, объединенных в замкнутый сверхпроводящий контур. Контур-детектор магнетометра MPMS-XL расположен вокруг камеры образца внутри сверхпроводящего магнита. Он сконструирован по типу градиометра второго порядка (рисунок 13). Эта конструкция позволяет отделить локальный магнитный момент образца внутри контура от внешних магнитных полей (в том числе и от

поля, созданного сверхпроводящим соленоидом). СКВИД-датчик расположен ниже сверхпроводящего магнита, и сигнал от собирающего контура-детектора доходит до него по сверхпроводящей проволоке.

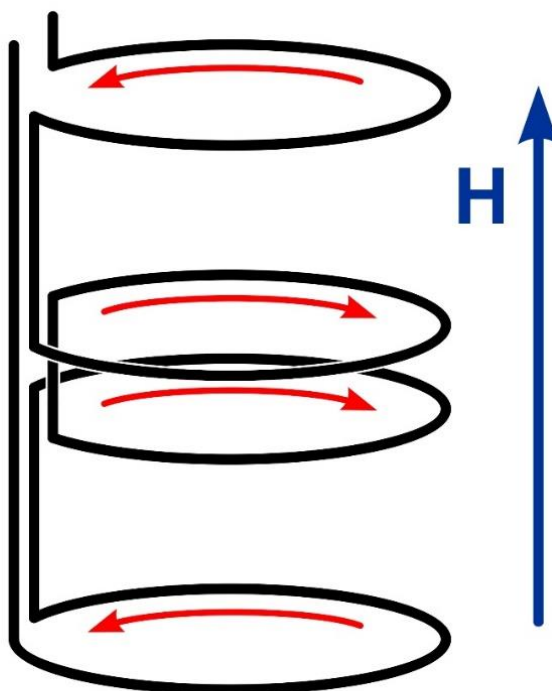


Рисунок 13 – Контур-детектор СКВИД-магнетометра MPMS-XL

Работа СКВИД-датчика (от англ. SQUID – superconducting quantum interference device) основана на эффекте Джозефсона. В структуре сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (S/I/S) протекает туннельный ток, если фазы волновых функций сверхпроводящего конденсата в двух сверхпроводниках на обкладках не совпадают. Простейший СКВИД-датчик представляет собой кольцо из сверхпроводника с джозефсоновским контактом. При помещении его во внешнее магнитное поле в контуре возникает сверхпроводящий ток, а на контакте – разность потенциалов. Тонкопленочный СКВИД-элемент MPMS является высоко линейным преобразователем тока, который создается в контуре за счет наличия магнитного момента у образца, в напряжение.

Чтобы подготовить образец для измерения магнитного момента, необходимо вырезать его под нужный размер (как правило, не больше 10 мм в длину и 5 мм в ширину) и поместить в специальную капсулу. Затем капсула закрепляется на конце измерительного штока с помощью держателя. Измерительный шток (после помещения в шлюз и продувки) продвигается вниз вручную и закрепляется верхней частью в специальные зажимы. Закрепленный шток приводится во вращательное или поступательное движение с помощью шагового механизма, расположенного за пределами камеры в верхней части установки. Управление им осуществляется через программное обеспечение, установленное на ПК.

Если образец будет очень длинный и выходить за пределы витков детектора, то его перемещение не будет вызывать изменение потока. Поэтому образец должен быть как можно меньше, а его намагниченность однородной. В таком случае контур будет максимально точно реагировать на каждое положение образца.

В ходе измерения магнитного момента образец перемещается сквозь контур-детектор вдоль его оси. При каждом шаге в сверхпроводящем контуре возникает ток. В результате со СКВИДа снимается зависимость напряжения приблизительно такого вида, как на рисунке 14. Перед измерениями требуется провести калибровку MPMS с помощью эталонного образца той же формы и размера, что и исследуемый образец. Но, в любом случае, выходной сигнал требует последующего анализа для нахождения величины магнитного момента. Для этого в MPMS предусмотрено 3 режима обработки полученной зависимости.

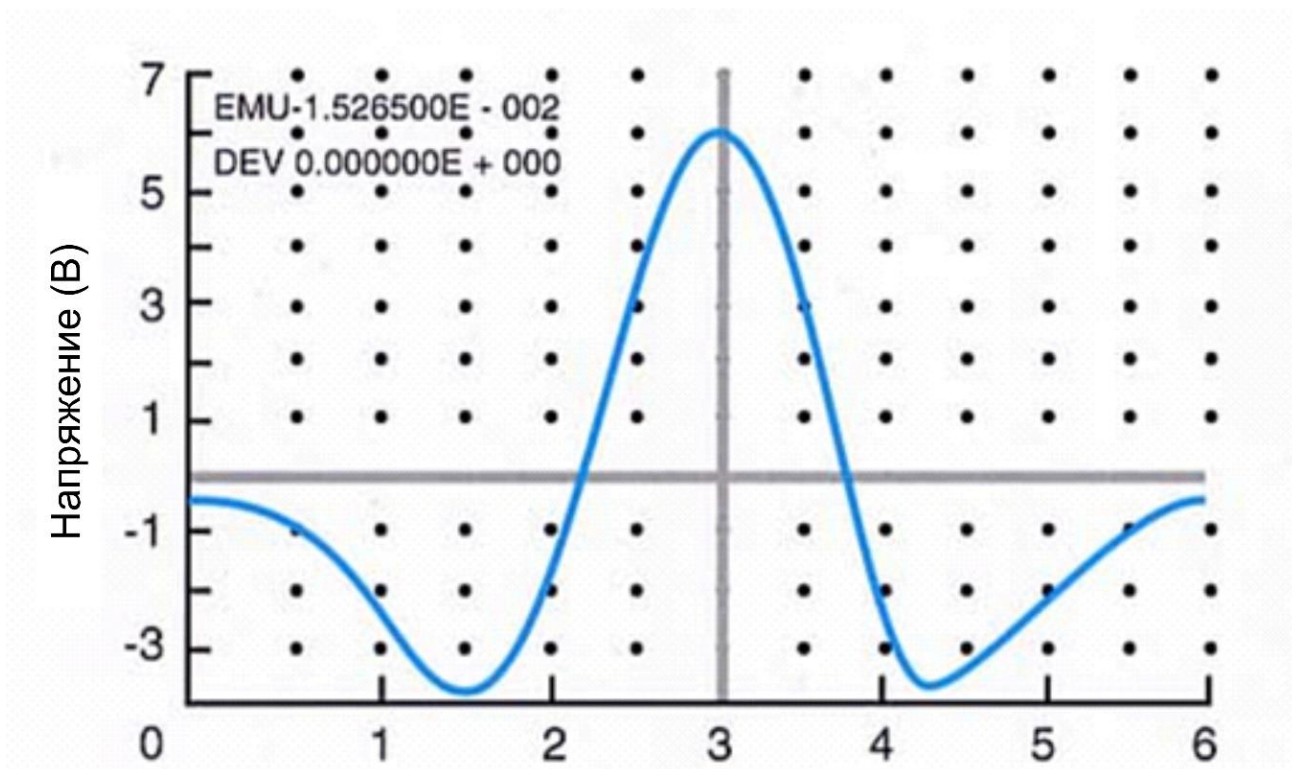


Рисунок 14 – Идеальный выходной сигнал СКВИД-датчика

В режиме «полного сканирования» вычисляется площадь под кривой напряжения. Она пропорциональна магнитному моменту, если образец точно центрирован и проходит большое расстояние сканирования. В методе «линейной регрессии» теоретическая кривая подгоняется под экспериментально полученный сигнал с помощью алгоритма линейной регрессии. Для его работы достаточно небольшой длины сканирования, но центрирование образца так же важно. Программное обеспечение MPMS позволяет корректировать положение образца, если известна точная зависимость размеров измерительного штока от температуры. Метод «итеративной регрессии» помогает приблизить реальный сигнал к идеальному за счет дополнительных переменных, которые могут компенсировать неточность в расположении образца, а также учесть его размеры и форму. Однако этот метод не применим для неоднородно намагниченных образцов и образцов, обладающих малым магнитным моментом. Все три метода возвращают результат в единицах магнитного момента образца.

2.5 МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Установка MPMS-XL дополнена цифровыми приборами: нановольтметром Keithley 2182A и источником тока Keithley 2400 SourceMeter. Эта пара приборов позволяет пропускать через образец стабильный ток от нескольких наноампер и измерять напряжение от 1 нВ. Шток для измерения магнитного момента не подходит для магнитотранспортных исследований. Существует специальная вставка, позволяющая особым образом расположить образец и провести к нему провода от приборов. Она представляет собой трубку с плоской медной площадкой на одном из концов (рисунок 15). На противоположном конце расположен разъем для подключения к измерительным приборам. Провода от разъема пропущены внутри трубки и выведены к клеммам вблизи площадки для образца. Соединение между клеммами и тонкими контактами, идущими к образцу, осуществляется через контактные площадки.

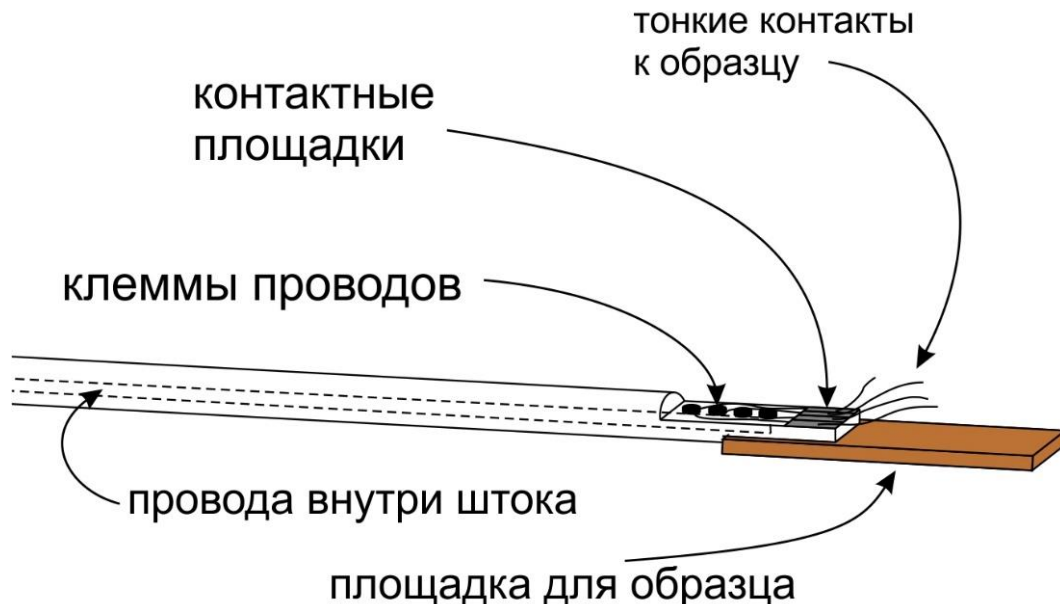


Рисунок 15 – Общий вид специальной вставки для магниторезистивных измерений MPMS-XL

Образец длиной $6 \div 10$ мм и шириной $3 \div 5$ мм помещается на медную площадку с помощью клея. Затем к его поверхности подводятся свободные концы контактов из тонкой проволоки. Для фиксации контактов на поверхности образца использовались два разных материала.

Первый материал, пластичный проводник InGa, наносится небольшим слоем на поверхность пленки в местах контактов. К полученным площадкам прижимаются изогнутые свободные края тонких проводов. Сверху наносится небольшое количество InGa и контакт вновь прижимается к поверхности пленки. В результате тонкая проволока находится в контакте с проводящей поверхностью образца и удерживается в этом положении пластичным проводящим слоем сверху (рисунок 16, слева).

Второй использованный материал – это проводящий двухкомпонентный клей с содержанием серебра. В данном случае, тонкие контакты прямыми свободными концами упираются сразу же в поверхность образца. Далее, две компоненты клея смешиваются в нужных пропорциях до получения пастообразного состава. С помощью тонкого инструмента (иглы) наносится небольшое количество смеси на контакт в месте его упора в поверхность пленки. Контакт должен после этого находиться в «капле», окутывающей его и лежащей на поверхности образца (рисунок 16, справа). После нанесения клея на все контакты происходит его сушка до затвердевания с помощью фена. Длительность зависит от температуры горячего воздуха.

Преимуществом использования InGa является относительная быстрота подготовки образца. Однако двухкомпонентный клей надежнее крепится к поверхности. Кроме того, во втором случае можно гарантировать, что контакт непосредственно прилегает к пленке. Тестовые измерения показали, что хорошо подготовленные образцы и в том и в другом случае дают одинаковые результаты.

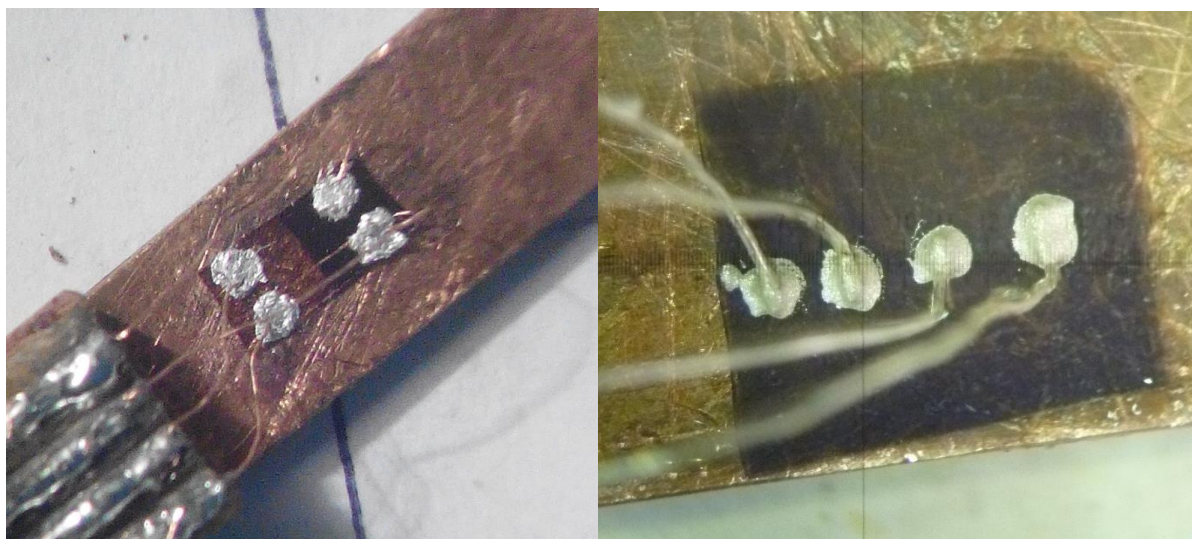


Рисунок 16 – Образец на штоте с контактами, закрепленными с помощью пластичного проводника InGa (слева) и двухкомпонентного клея (справа)

После помещения образца в камеру дальнейшее действия осуществляются с помощью компьютера. Однако подключение к установке MPMS-XL дополнительных приборов усложняет процесс управления экспериментом. Появившиеся трудности были решены с помощью написания специальной программы на языке Microsoft Visual Basic for Applications. Подробное описание этой программы приведено в Приложении 1.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОК NiFe/Bi/NiFe

3.1 ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК

Двух- и трехслойные пленки в системе пермаллой-висмут были получены с помощью термического испарения в вакууме на подложке из покровного стекла по технологии, описанной в [45]. Рабочее давление $P \sim 10^{-5}$ торр. Однако, одинаковые пленки, полученные повторно, могли давать отличные друг от друга результаты, а форма петли гистерезиса иметь искаженную форму (рисунок 17). На рисунке 17 также видно, что петли для образцов с примерно одинаковой толщиной прослойки могут существенно различаться в зависимости от скорости напыления и температуры подложки. Неудовлетворительные результаты указали на необходимость отработки технологии. Был осуществлен поиск оптимального режима напыления. Наиболее качественные образцы, результаты магнитных измерений на которых удавалось повторить, получались при комнатной температуре подложки и скорости напыления 0,5 нм/с.

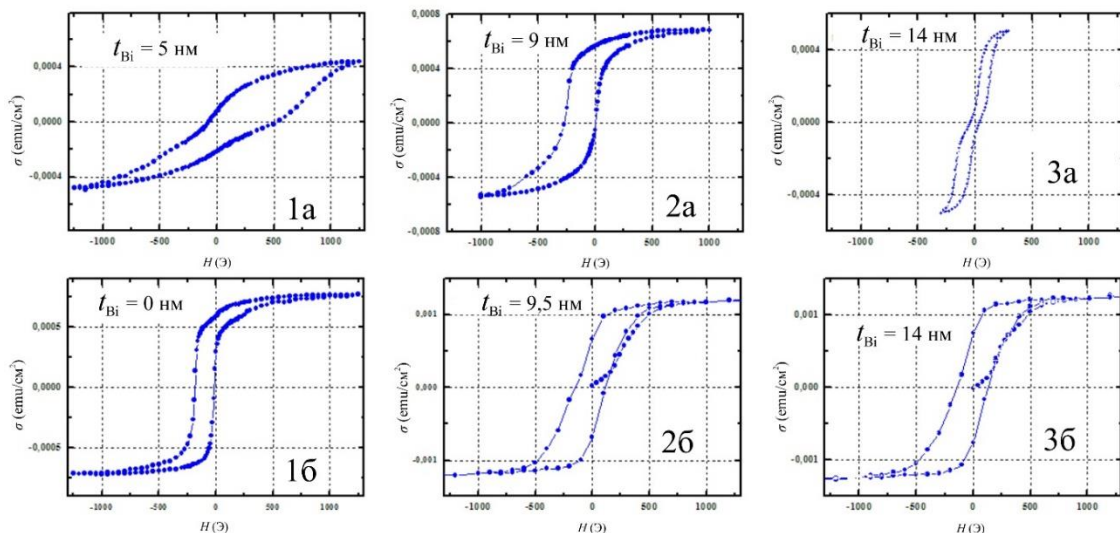


Рисунок 17 – Петли гистерезиса трехслойных пленок из пробных серий, полученных при разных параметрах: а) – скорость напыления 5 нм/с и температура подложки 150 °С и б) – скорость напыления 1 нм/с и температура подложки 50 °С

Материалом магнитных слоев был пермаллой $\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$. Толщина слоев пермаллоя в образцах всех серий составляла 10 нм. Пермаллой является материалом с малой магнитной кристаллографической анизотропией, что позволяет исключить ее влияние на магнитное поведение всей структуры и ясно наблюдать эффекты межслоевого взаимодействия. Толщина слоя NiFe была выбрана из соображений, чтобы она была довольно малой, но в то же самое время достаточной для того, чтобы намагниченность магнитного слоя не менялась при флуктуациях его толщины. Так, например, в функциональной двухслойной структуре NiFe/ZnO [47] отмечено сильное уменьшение намагниченности насыщения при значении толщины слоя пермаллоя (состава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) 5 нм (рисунок 18). В то же время для толщин 10 и 20 нм наблюдается лишь небольшое различие M_s .

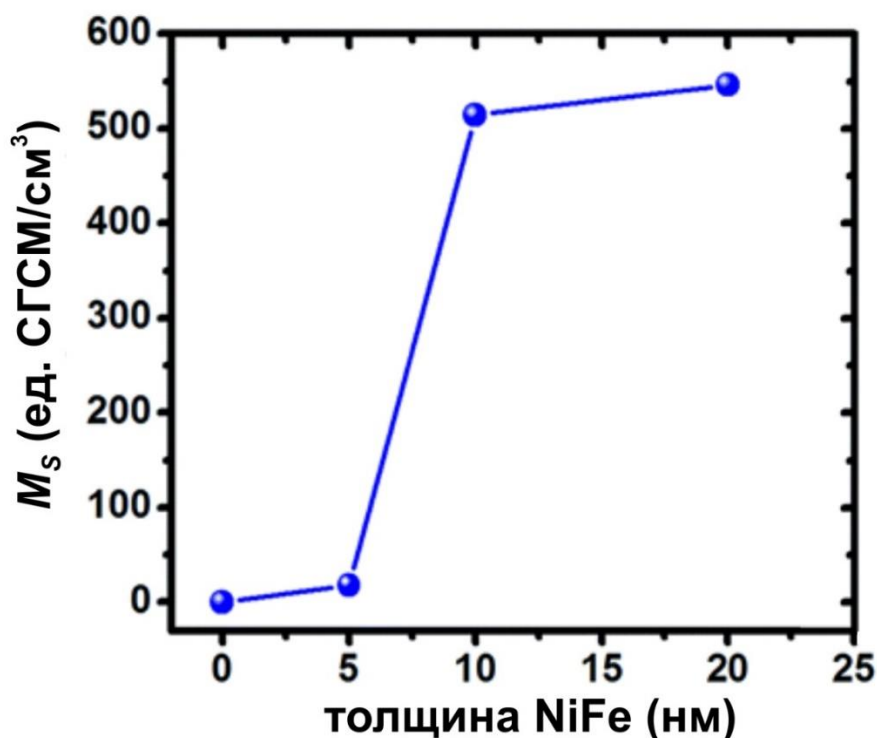


Рисунок 18 – Зависимость намагниченность насыщения M_s двухслойной структуры NiFe/ZnO от толщины слоя NiFe [47]

Толщина полуметаллической прослойки висмута в трехслойных пленках в разных сериях менялась в пределах от 3 до 15 нм (рисунок. 19). В одном цикле возможно напыление нескольких образцов с различной толщиной висмута. В двух последовательных напылениях повторялась пленка из предыдущей серии с большей толщиной висмута. Пленки с одинаковыми толщинами слоев из разных циклов демонстрировали одинаковые результаты, что подтверждает точность и воспроизводимость технологического процесса. Для гарантии идентичности магнитных слоев в дальнейшем исследовались образцы из одной серии (с толщинами прослойки 4, 6, 11 и 15 нм). Также был создан контрольный образец из двух слоев пермаллоя, нанесенных друг на друга (т.е. пленка NiFe толщиной 20 нм).



Рисунок 19 – Общее строение пленок NiFe/Bi/NiFe

Толщина слоев измерялась методами рентгеновской спектроскопии. Электронно-микроскопические исследования показали, что слои являются сплошными по площади и их состав соответствует номинальному. Признаков наличия соединений висмута с железом или никелем не найдено [48].

Чтобы оценить шероховатость и несовершенство поверхности была применена атомно-силовая микроскопия. Получены изображения поверхности пленок NiFe/Bi/NiFe (рисунок 20), на которых видно, что высота шероховатости поверхности не превышает 2.5 нм (см. рисунок 21).

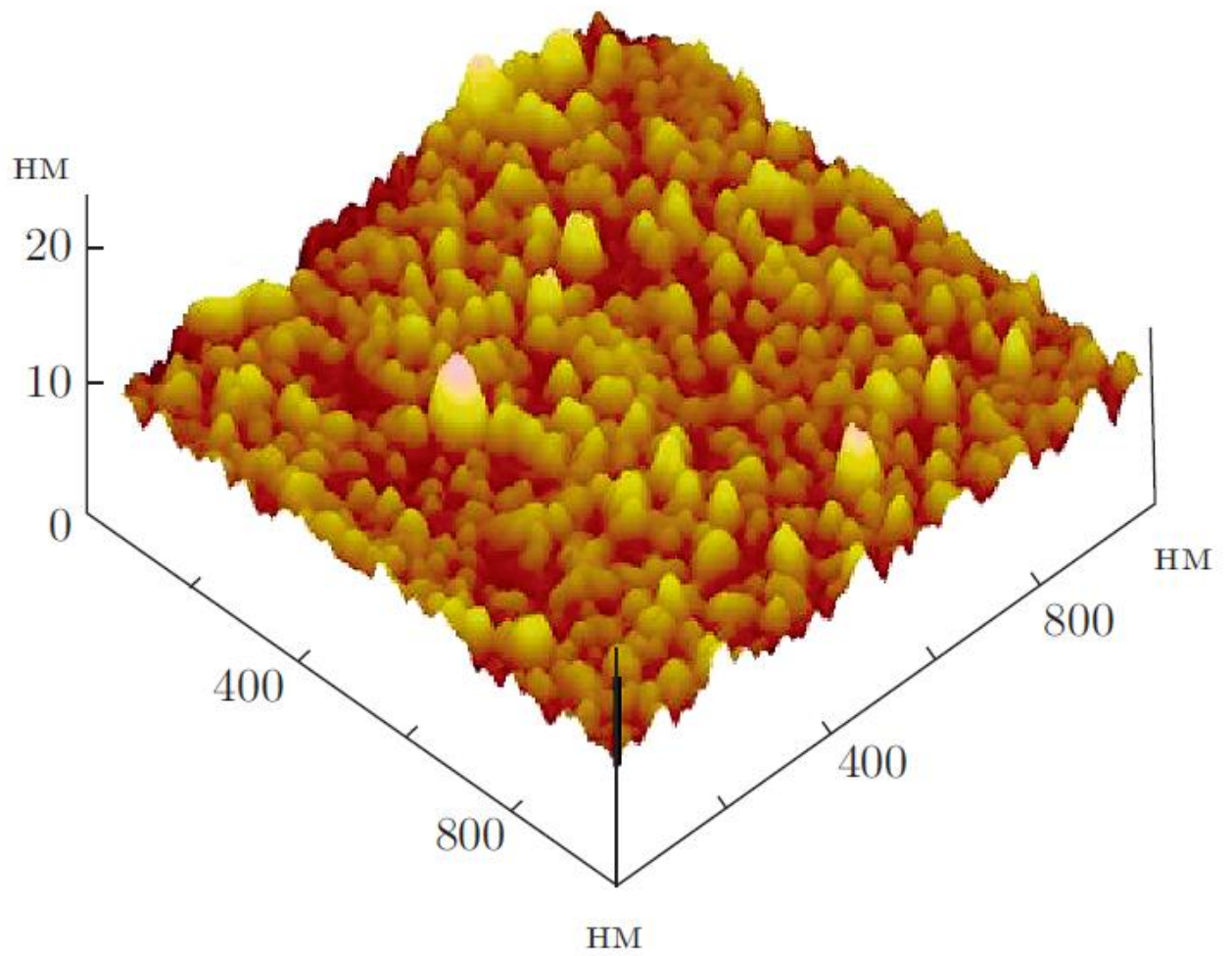


Рисунок 20 – АСМ-изображение поверхности пленки NiFe/Bi/NiFe с толщиной прослойки $t_{\text{Bi}} = 4$ нм [49]

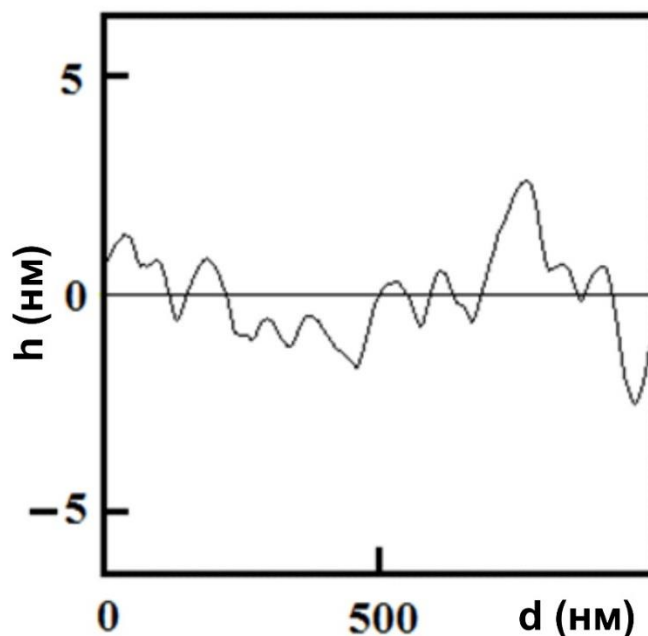


Рисунок 21 – Профиль поверхности пленки NiFe/Bi/NiFe с толщиной прослойки $t_{\text{Bi}} = 4$ нм в одном из разрезов

Известно, что рельеф поверхности пленки задается в основном неровностями подложкой. Каждый последующий слой при нанесении повторяет профиль нижнего слоя. Это означает, что при использованных толщинах прослойки висмута нет вероятности прямого контакта между слоями пермаллоя.

3.2 МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУР В СИСТЕМЕ Bi-NiFe

Прежде чем начать рассмотрение магнитных и магниторезистивных свойств трехслойных пленок NiFe/Bi/NiFe проанализируем изменение поведения номинально чистых слоев пермаллоя в зависимости от очередности нанесения слоев висмута ($t_{\text{NiFe}} \approx 10$ нм, $t_{\text{Bi}} \approx 15$ нм).

Было обнаружено, что от очередности нанесения магнитного и немагнитного слоев зависит процесс намагничивания. На рисунке 22 показаны зависимости $M(H)$ при $T = 300$ К. Видно, что коэрцитивные силы (H_C) петель намагничивания для

пленки NiFe/Bi (рисунок 22, а) меньше (менее чем на 15 Э), чем для пленки Bi/NiFe (рисунок 22, б). Значения намагниченностей насыщения в пределах точности измерений совпадают. Поскольку, как известно [50], $H_C \sim K$, где K – константа магнитной анизотропии, то, по-видимому, в случае структур в системе Bi-NiFe возникает дополнительная магнитная анизотропия на интерфейсе. Причем в случае структуры Bi/NiFe дополнительная анизотропия несколько больше, чем в случае NiFe/Bi.

Для уточнения различий в поведении пленок в зависимости от очередности магнитного и немагнитного слоев мы провели магниторезонансные измерения (частота СВЧ излучения здесь $\omega_{\text{UHF}} = 9.48$ ГГц).

На рисунке 23 приведены температурные зависимости резонансных полей для пленок Bi/NiFe (кривая 1), NiFe/Bi (кривая 2) и для реперной пленки NiFe (кривая 3), полученные в геометрии, когда магнитное поле лежало в плоскости пленки. Видно, что наличие слоя висмута приводит к увеличению величины резонансного поля по сравнению с реперной пленкой чистого пермаллоя. Если за основу взять формулу Киттеля $(\omega_1 / \gamma)^2 = H(H + H_A + H_M)$ [51], то такое поведение возможно при условии, что H_A выводит магнитный момент из плоскости, т.е. мы имеем дополнительную перпендикулярную магнитную анизотропию. Разница магнитных полей для пленок Bi/NiFe и NiFe/Bi составляет около 10 % от максимальной величины.

Полученные данные по интенсивностям линий поглощения разных пленок, определяемым как площадь под резонансной кривой, дают приблизительно близкие значения (расхождения ~ 5 %) (рисунок 24). При этом в окрестности температуры ~ 200 К наблюдается заметное изменение поведения температурной зависимости интенсивности поглощения (I), и при $T > 200$ К различие в поведении I для разных пленок практически исчезает.

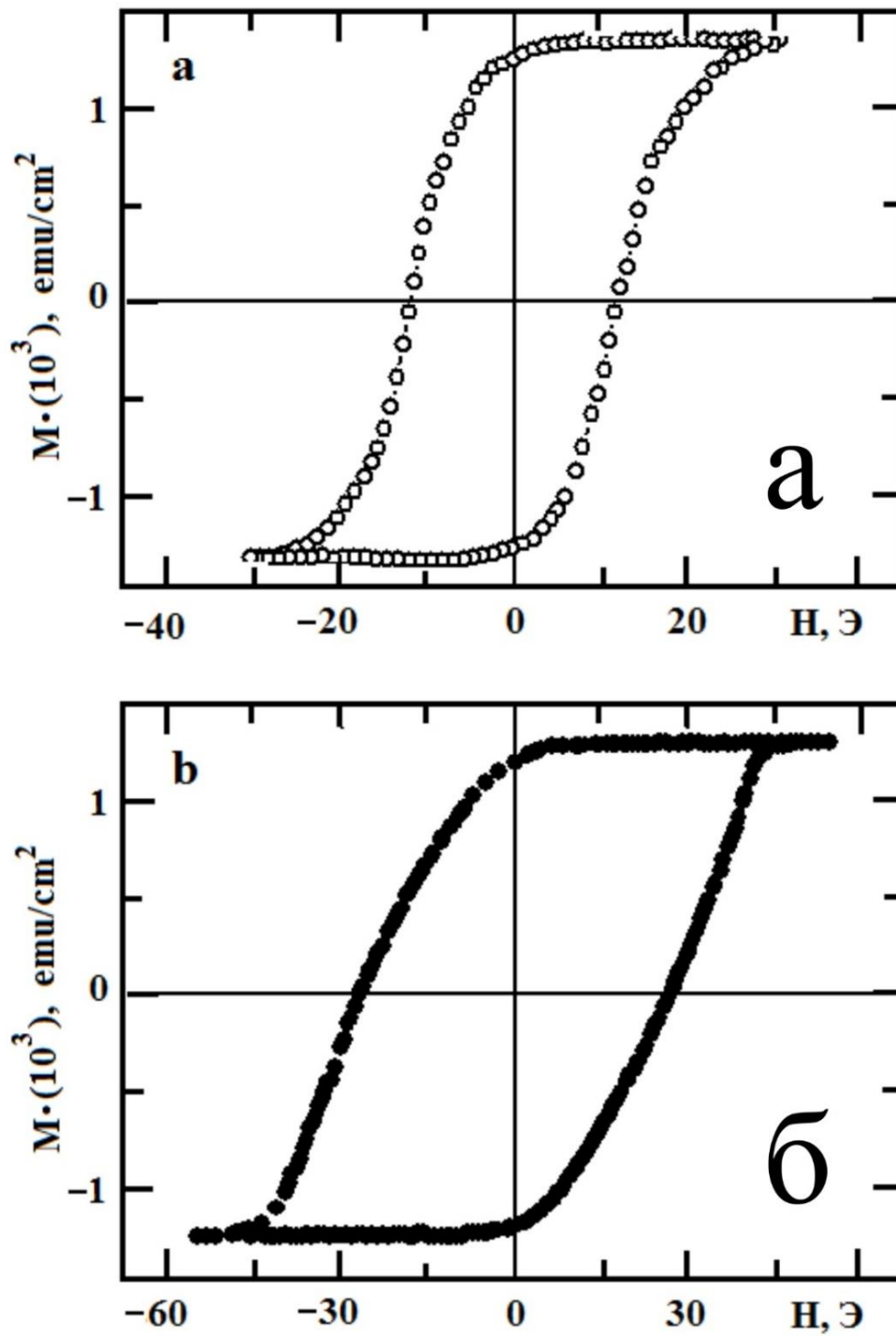


Рисунок 22 – Кривые намагничивания двухслойных пленок NiFe/Vi (а) и Vi/NiFe (б) при $T = 300 \text{ К}$

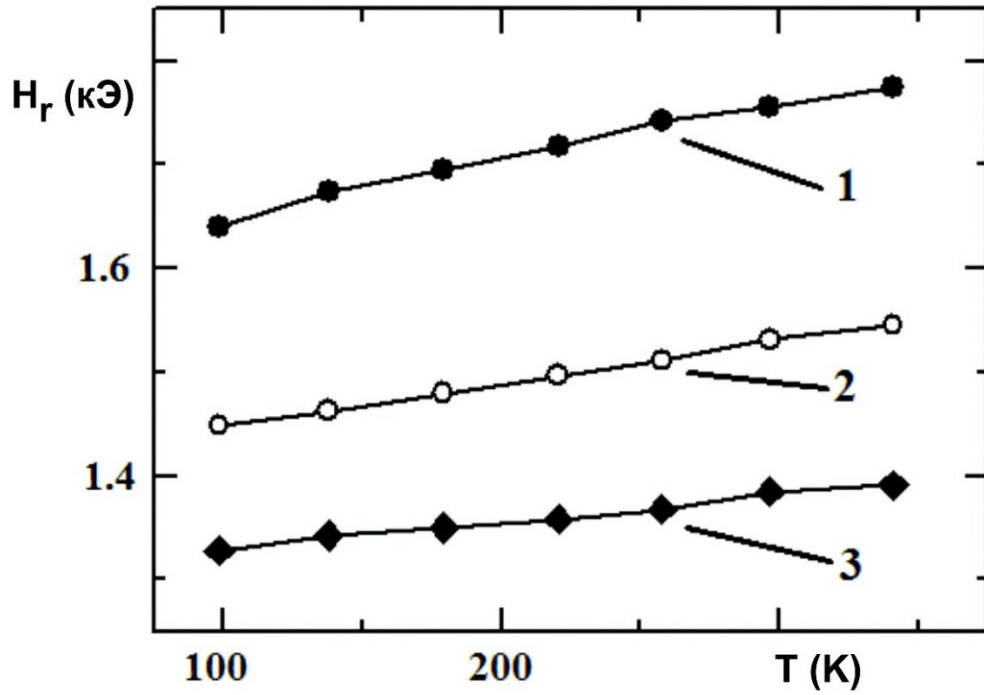


Рисунок 23 – Температурные зависимости резонансных полей для пленок.

1 – Bi/NiFe, 2 – NiFe/Bi, 3 – NiFe

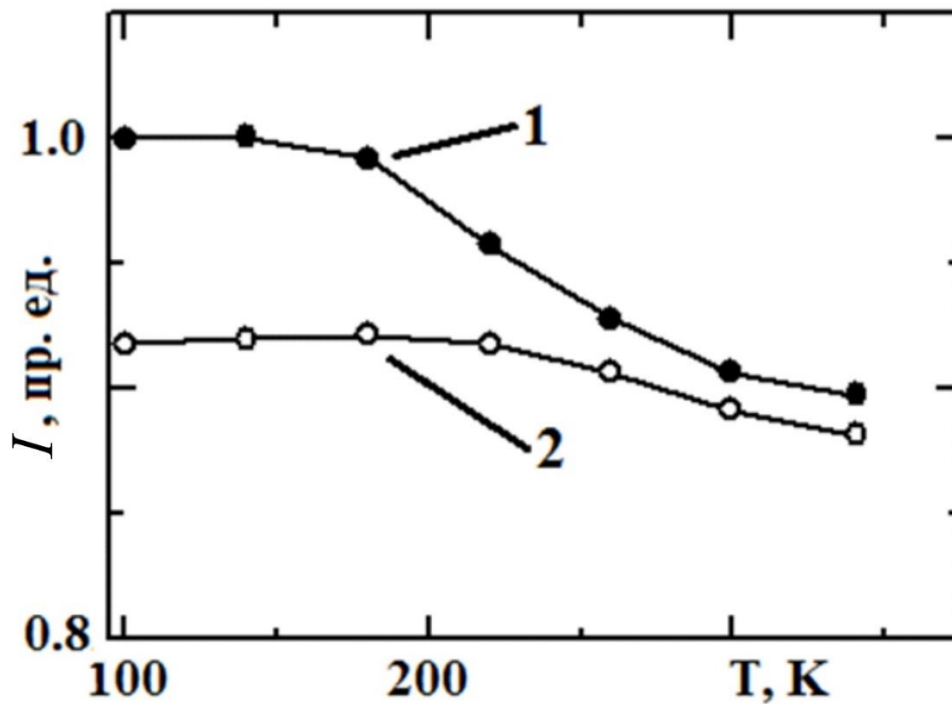


Рисунок 24 – Температурные зависимости интенсивностей линий СВЧ

поглощения. 1 – NiFe/Bi, 2 – Bi/NiFe

Для того, чтобы оценить возможное влияние внутри плоскостной анизотропии на наблюдаемые характеристики в зависимости от толщины висмутовой прослойки в трехслойных пленках мы изучили анизотропное поведение резонансного поля в плоскости пленок двухслойных структур (рисунок 25).

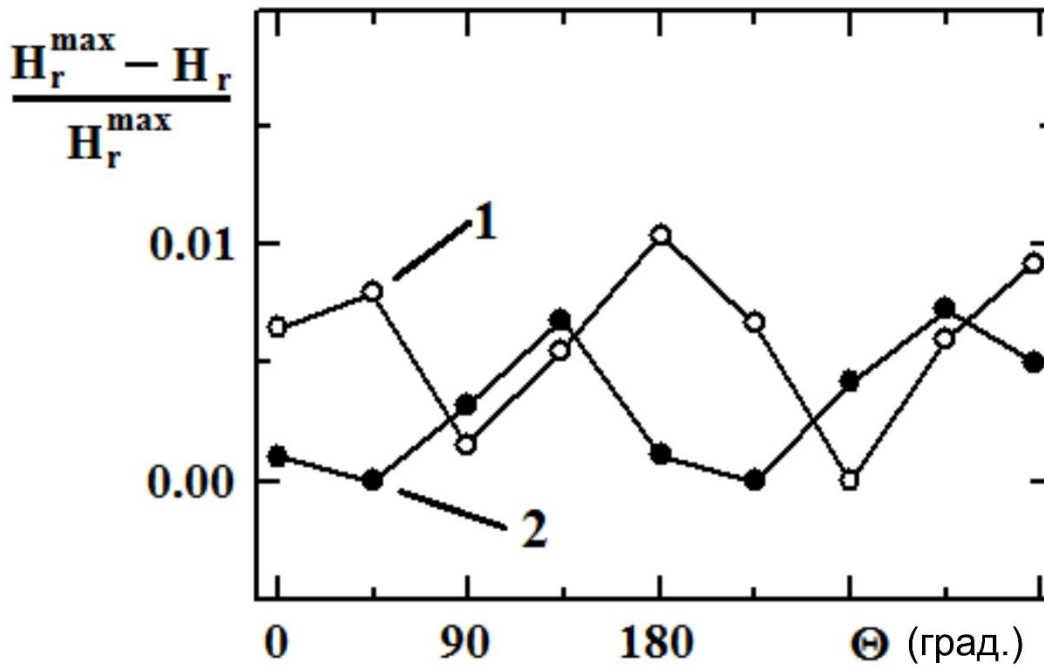


Рисунок 25 – Угловые зависимости относительного изменения резонансного поля в плоскости пленки при $T = 300$ К. 1 – NiFe/Bi, 2 – Bi/NiFe

Получено, что внутри плоскостная анизотропия в двухслойных структурах не носит регулярного характера и разброс резонансных полей имеет малые величины. По-видимому, это является следствием влияния интерфейсной анизотропии на границе раздела NiFe-Bi.

Основные результаты по изучению двухслойных пленочных структур состоят в следующем:

- магнитные свойства пленочных структур в системе Bi-NiFe зависят от очередности нанесения слоев;
- намагниченности насыщения разных пленок имеют одинаковое значение;

- наблюдается небольшое различие анизотропных свойств пленок в зависимости от очередности нанесения слоев.

3.3 МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При изучении петель магнитного гистерезиса пленок NiFe/Bi/NiFe [48, 49, 52, 53, 54] замечено, что присутствие слоя висмута изменяет как коэрцитивную силу, так и поле, при котором намагниченность достигает насыщения (рисунок 26). Для контрольной пленки без прослойки висмута петля гистерезиса является узкой, и кривая намагниченности имеет стандартный вид. При увеличении толщины прослойки висмута происходят изменения в величине поля насыщения и коэрцитивной силы.

Для нахождения поля магнитного насыщения исследованных пленок использовалась часть кривой намагничивания, находящаяся в правом верхнем квадранте полной петли гистерезиса (рисунок 27, кривая 1). Кривая 2 на рисунке 27 соответствует производной от кривой 1. В том случае, когда кривая намагниченности выходит на плато (истинное насыщение) или имеет место затянутый «парапроцесс», на производной этому будет соответствовать прямая линия (не обязательно проходящая через нуль), параллельная оси абсцисс. Поле насыщения определяется как точка пересечения касательной к производной (штриховая линия) с продолжением этой прямой линии (сплошная). На рисунке 27 эта точка обозначена как H_s . В случае затянутого выхода на уровень насыщения этот метод дает хорошие результаты. Если же парапроцесс сильный и для его существования имеются физические причины (например, очень сильная анизотропия), то эту ситуацию необходимо анализировать отдельно.

Полученные таким способом значения полей, при которых достигается насыщение для пленок исследуемой серии с $t_{\text{Bi}} = 0, 4, 11$ и 15 нм, представлены точками на рисунке 28. Зависимость H_s от толщины прослойки оказалась периодической.

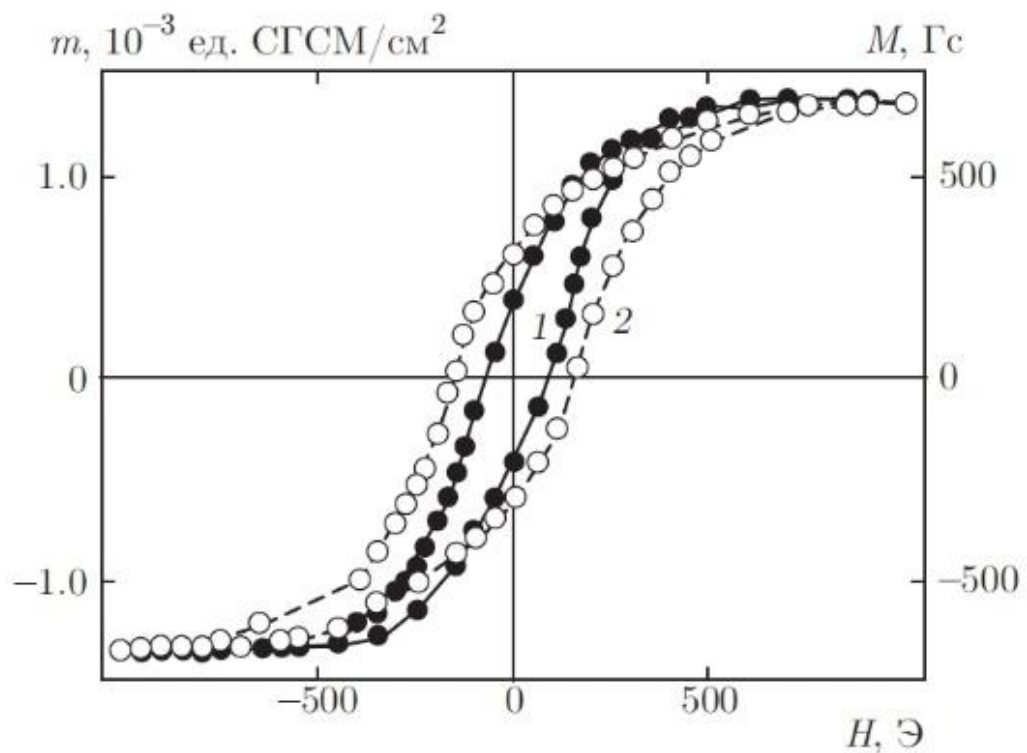


Рисунок 26 – Петли гистерезиса пленок NiFe/Bi/NiFe при $T = 4.2$ К:
 1 – без прослойки висмута; 2 – с прослойкой висмута толщиной $t_{\text{Bi}} = 4$ нм. Левая
 шкала — магнитный момент m единицы поверхности, правая шкала –
 намагниченность M [49]

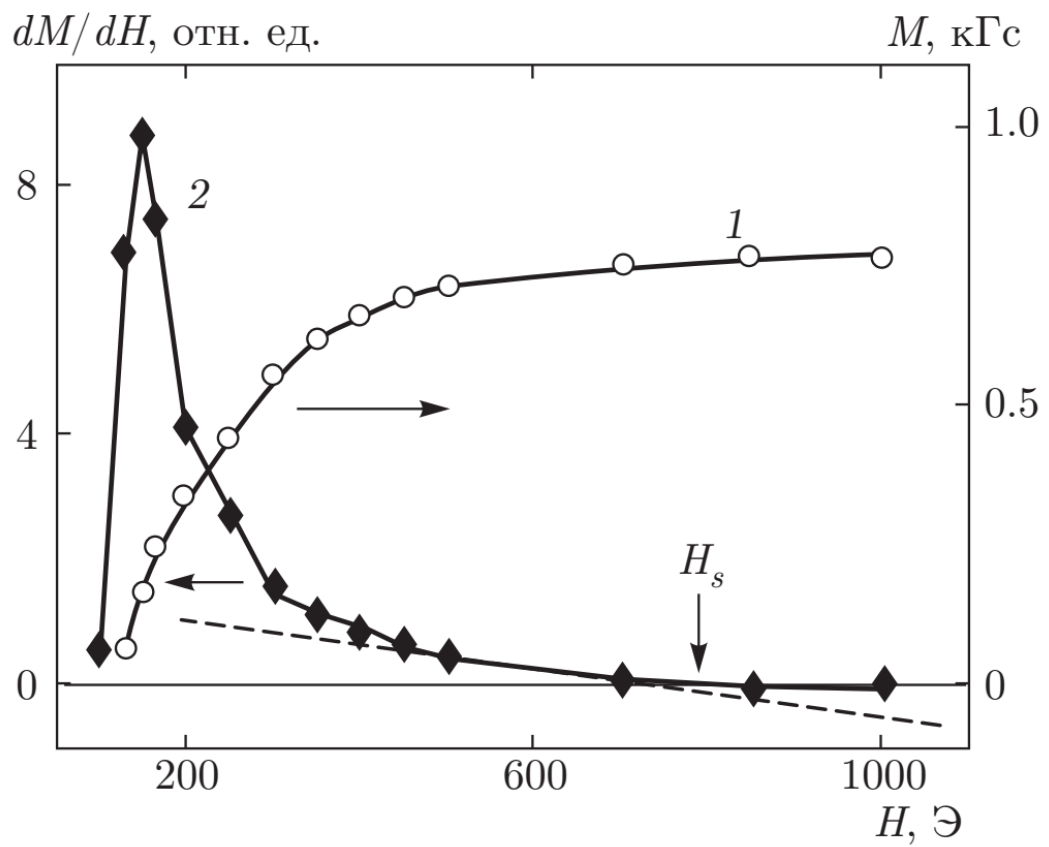


Рисунок 27 – Схема определения поля магнитного насыщения: 1 — восходящая часть кривой намагничивания, 2 — производная этого участка [49]

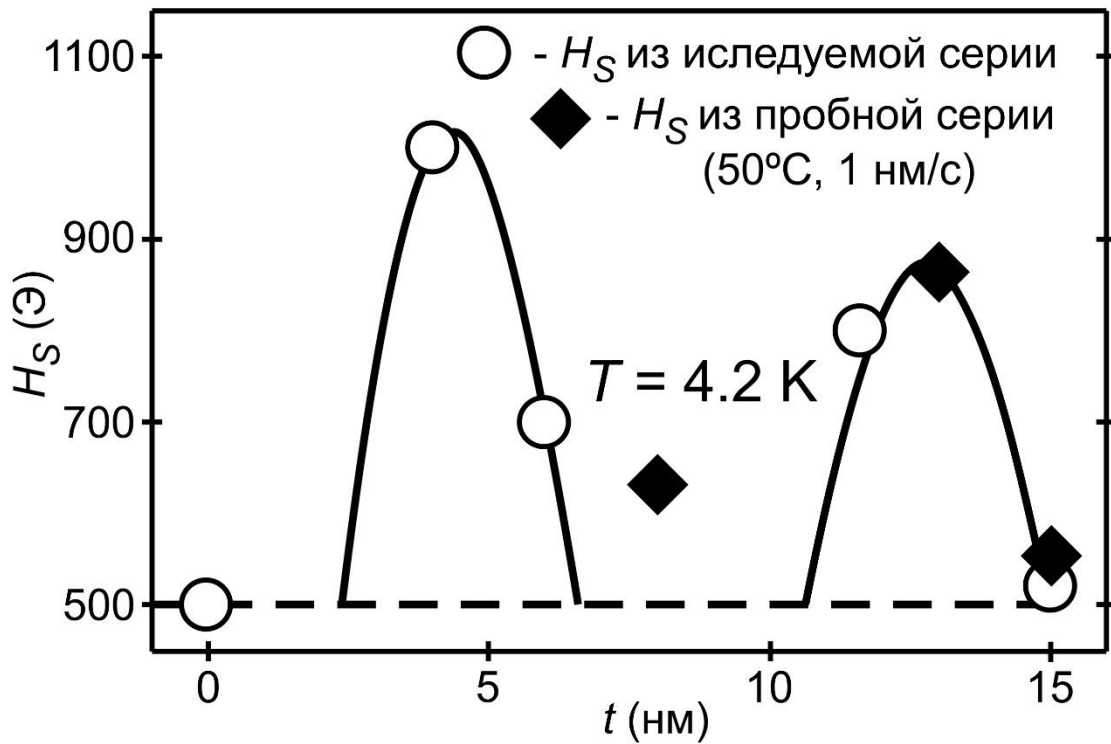


Рисунок 28 – Зависимость поля насыщения H_s от толщины немагнитной прослойки при $T = 4.2$ К. Точки – экспериментальные значения, сплошная линия – кривая, полученная с помощью подгонки. Выколотые точки – исследуемая серия, черные ромбы – пленки из серии, полученной при температуре подложки 50 °С и скорости напыления 1 нм/с

Такое поведение H_S свойственно системам, где имеет место изменение знака межслоевого взаимодействия между ферромагнитными слоями. Как известно, при антиферромагнитном взаимодействии поле магнитного насыщения определяется главным образом межслоевым взаимодействием и задается следующим выражением [55]:

$$H_S = 2H_E \pm H_K, \quad (9)$$

где $H_E = J/t_{FM}M$ – величина поля обменного взаимодействия для области антиферромагнитной связи, $H_K = 2K_{in}/M$ – поле анизотропии в плоскости пленки, J и K_{in} – константы межслоевого обменного взаимодействия и анизотропии, M и t_{FM} – намагниченность и толщина ферромагнитного слоя. Знаки «+» или «-» в (9) относятся к «трудному» или «легкому» направлению магнитного поля в плоскости пленки. Как показали исследования двухслойных структур, в нашем случае NiFe практически не имеет анизотропии в плоскости пленки, поэтому $K_{in} \approx 0$.

Согласно приближению квантовой ямы (одномерный случай переноса заряда), в трехслойных системах зависимость межслоевого обменного взаимодействия от толщины t немагнитной прослойки носит осциллирующий характер и обратно пропорционально ее величине. При обработке экспериментальных данных мы аппроксимировали поле насыщения выражением вида:

$$H_S = H_{S0} + B \sin(\alpha t + \varphi) / t^\beta, \quad (10)$$

где H_{S0} – поле насыщения контрольной пленки (толщина прослойки $t_{Bi} = 0$), и при условии, что $H_S \geq H_{S0}$.

Для образцов исследуемой серии при температуре 4.2 К кривая аппроксимации полученных ранее экспериментальных значений H_S хорошо описывается набором параметров: $H_{S0} = 500$ Э, $B = 814$, $\alpha = 0.747$, $\varphi = 4.507$, $\beta =$

0.304 [49]. Причем два параметра (α и φ) являются взаимозависимыми. По результатам подгонки построена кривая на рисунке 28.

Для сравнения с результатами исследуемой серии пленок было найдено H_s пленок, полученных в ходе отработки технологии и имеющих другие толщины прослойки. На рисунке 28 показано, что точки, соответствующие полю насыщения трехслойных пленок с толщиной прослойки 8, 13 и 15 нм из пробной серии, где напыление происходило при температуре подложки 50 °С со скоростью 1 нм/с, приблизительно ложатся на найденную при подгонке зависимость (10).

Поле насыщения пленок из другой пробной серии (с температурой подложки 150 °С и скоростью напыления 5 нм/с) представлено на рисунке 29. Здесь подгоночная кривая задана параметрами: $H_{s0} = 500$ Э, $B = 1000$, $\alpha = 0.34$, $\varphi = 4.1$, $\beta = 0.25$

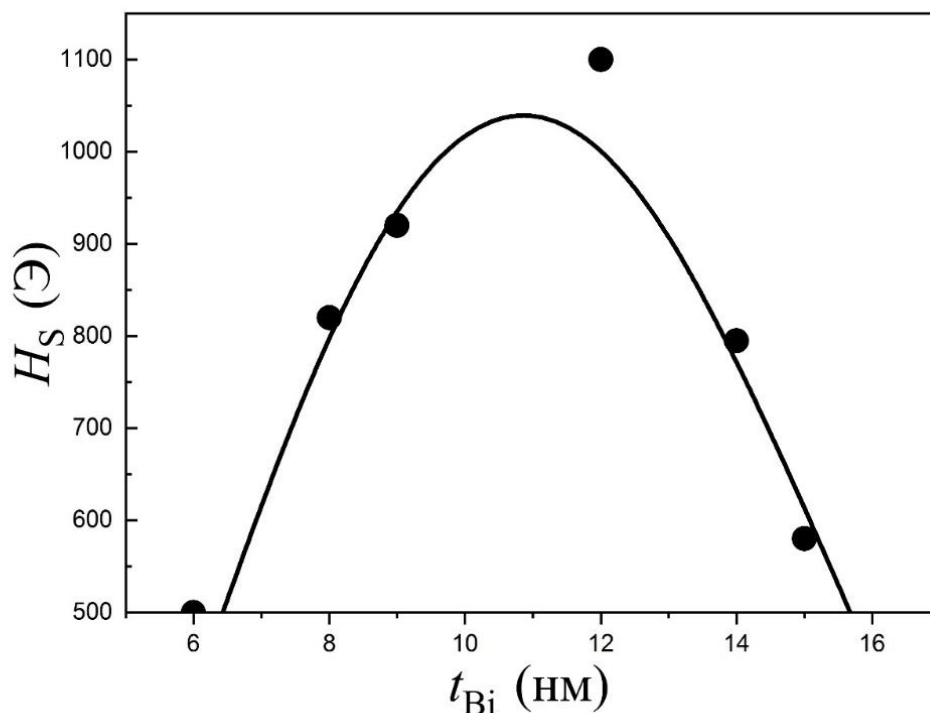


Рисунок 29 – Поле насыщения пленок из серии с температурой подложки 150 °С и скоростью напыления 5 нм/с. Точки – экспериментальные значения, сплошная линия – кривая, полученная с помощью подгонки.

Отличие параметров подгоночной кривой от тех, что найдены ранее для пленок исследуемой серии, связано с тем, что напыление происходило в разных технологических условиях. Неоптимальные условия ведут к ухудшению качества структур. Неоднородность на интерфейсе делает коэффициент отражения сложным. Это влечет за собой изменение периода и фазы.

Полученные нами данные находят согласие с данными исследований образцов CoFe/Bi/Co [41] и Co-содержащих пленок [42]. В системе CoFe/Bi/Co зависимость поля насыщения от толщины пленки проявляет двухпериодный характер ($T_1 = 9$ нм и ...). Периоды осциллирующих зависимостей поля насыщения от толщины прослойки для разных пленок показывают многопериодный характер.

Зависимость коэрцитивной силы от толщины слоя Bi является немонотонной. Для пленок NiFe/Bi/NiFe в исследуемом нами диапазоне наблюдается пик величины коэрцитивной силы при значении $t_{Bi} = 11$ нм (рисунок 30). При высокой температуре становятся менее заметны различия в коэрцитивной силе для пленок с разной толщиной прослойки, однако характер зависимости остается прежним.

Поведение коэрцитивной силы в зависимости от толщины немагнитного слоя приводит к необходимости введения интерфейсной анизотропии. Как известно [56], для металлических многослойных пленок, как правило, зависимость величины анизотропии от толщины магнитного слоя носит линейный характер (при $t < 5-10$ нм). В ряде случаев имеет место смена знака анизотропии, например, в системе Co/Pd [57]. Однако в слоистой структуре Cu/Ni(110) [58] в зависимости от толщины никеля константа анизотропии носит немонотонный характер и имеет максимум в районе $t = 6$ нм. В последнем случае изменения анизотропных свойств связываются с интерфейсным вкладом. Следует также отметить осциллирующее поведение коэрцитивной силы для двуслойных пленок Bi/Co в зависимости от толщины висмутового слоя, период осцилляций в этом случае составляет примерно 22 нм [59].

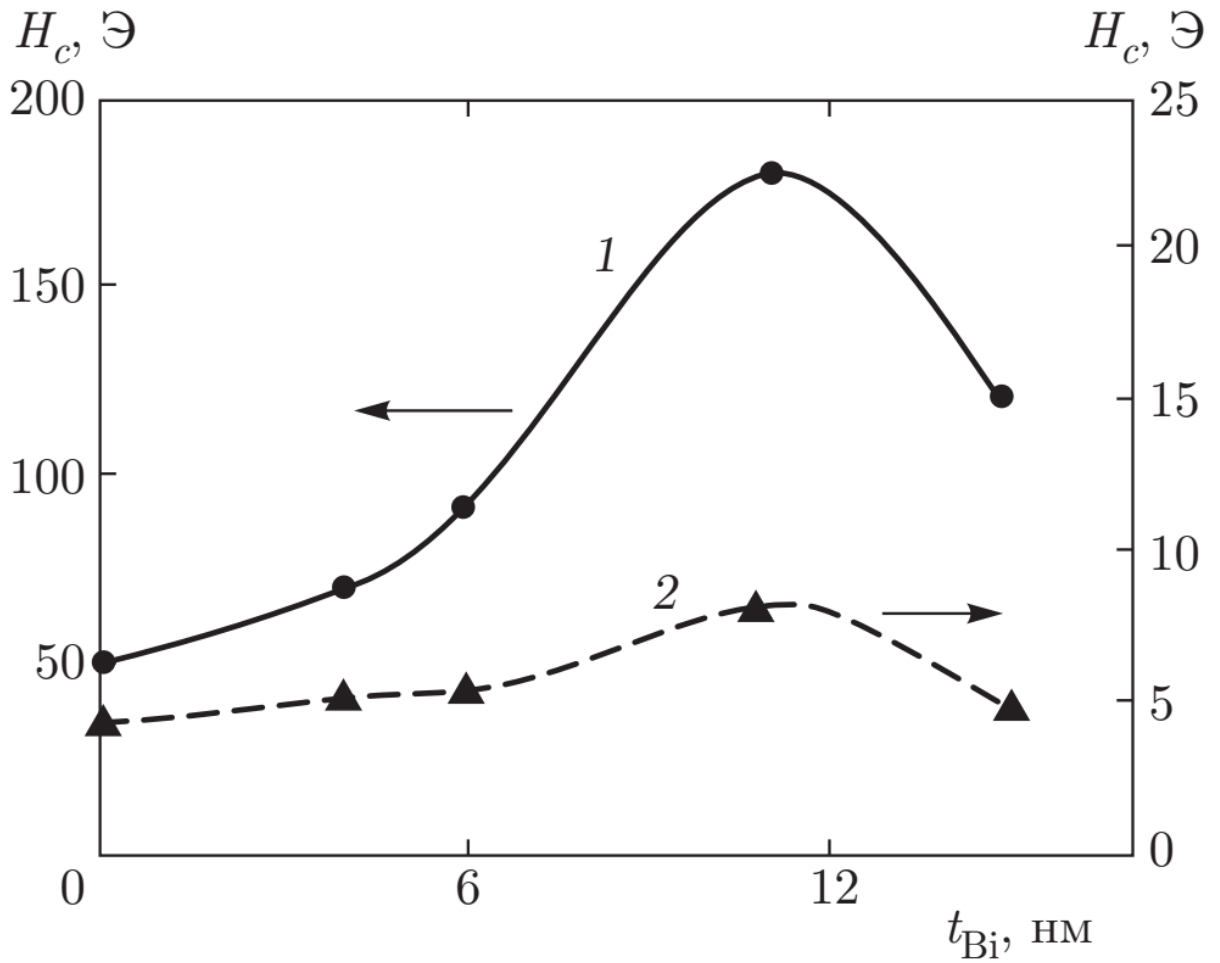


Рисунок 30 – Зависимости коэрцитивной силы H_c от толщины немагнитной прослойки в пленках NiFe/Bi/NiFe: 1 — $T = 4.2$ К; 2 — $T = 300$ К

Также были получены температурные зависимости поля насыщения [60], представленные на рисунке 31. Видно, что при увеличении толщины немагнитной прослойки намагниченность насыщения пленочной структуры уменьшается (кривые 2–4) и перестает изменяться при $t_{Bi} > 11$ нм (кривые 4, 5). Однако, различие M_S незначительное ($\sim 5\%$), что позволяет считать в рамках эксперимента все магнитные слои идентичными.

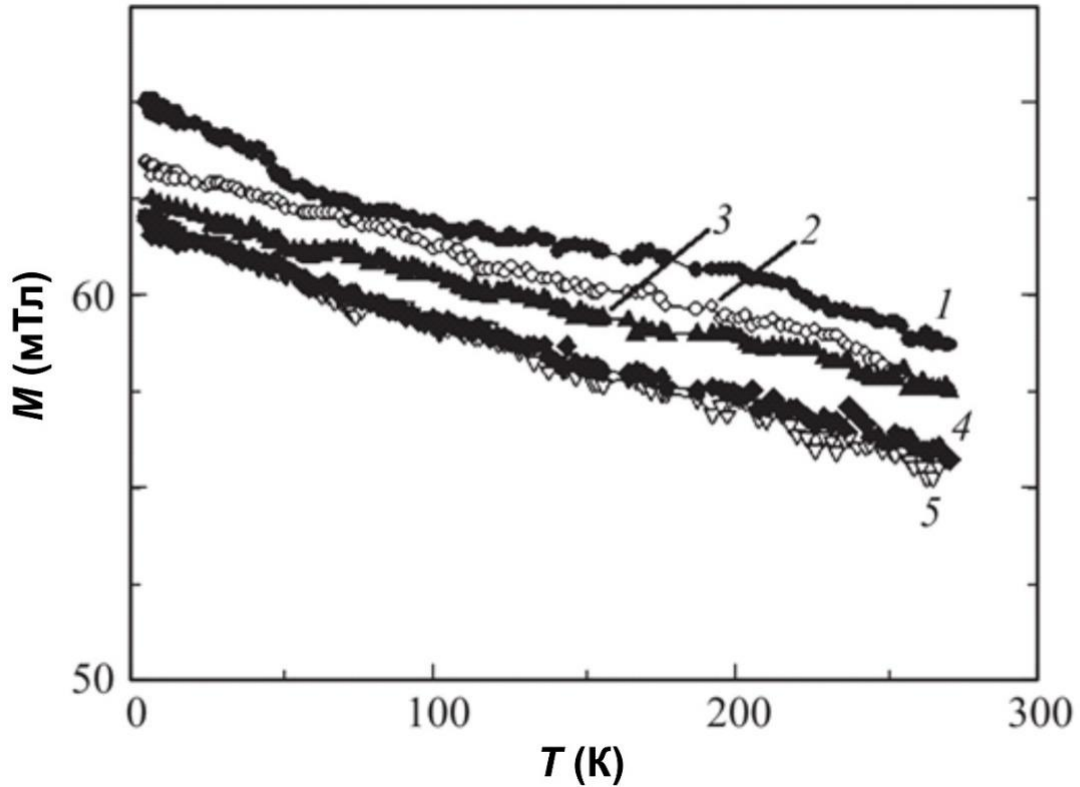


Рисунок 31 – Температурные зависимости намагниченности насыщения пленок NiFe/Bi/NiFe. Кривые 1–5 соответствуют толщинам висмутовой прослойки 0, 4, 6, 11 и 15 нм [60]

Таким образом из магнитостатических измерений трехслойных пленок можно сделать следующие выводы:

1. Прослойка висмута оказывает влияние на процессы намагничивания образцов NiFe/Bi/NiFe;
2. Между магнитными слоями существует обменная связь, которая носит осциллирующий характер по своему типу (ферромагнитная или антиферромагнитная) и величине;
3. Интерфейсы пермаллой/висмут и висмут/пермаллой могут влиять на магнитную анизотропию структуры.

3.4 МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Магнитостатические измерения дают основание считать, что межслоевое взаимодействие в системе NiFe/Bi/NiFe имеет осциллирующий характер в зависимости от толщины прослойки висмута. Чтобы изучить детали изменения межслоевого обмена мы использовали метод электронного магнитного резонанса [49, 60, 61, 62]. Если магнитная система имеет несколько подсистем, то это отразится на резонансном спектре, так как каждая из них будет иметь собственную частоту резонанса (либо, как в нашем случае, резонанс будет иметь место при разных значениях внешнего поля, когда в ходе эксперимента используется фиксированная частота переменного поля).

Опираясь на данные, полученные для двухслойных структур, а именно равные значения намагниченности насыщения, в дальнейшем будем полагать, что намагниченности всех слоев одинаковые. В силу малой разницы анизотропных свойств для разных композиций слоев, для упрощения получения резонансных полей (на частоте 26.7 ГГц) считаем, что интерфейсная анизотропия в обоих случаях примерно одинаковая.

Для контрольной пленки без немагнитной прослойки спектр электронного магнитного резонанса состоит из единичной лоренцевой линии. Для пленки с прослойкой висмута толщиной 15 нм также наблюдается одна линия, но со смещенной резонансной частотой (рисунок 32, а). В данном случае это может свидетельствовать либо о ферромагнитном характере связи между слоями пермаллоя, либо о том, что связь между ними практически отсутствует.

Для трехслойных пленок с толщинами прослойки висмута 4, 6 и 11 нм наблюдались резонансные спектры, состоящие из двух линий (рисунок 32, б). Такой характер зависимости говорит об антиферромагнитной обменной связи между слоями пермаллоя. Наличие двух линий в спектре также возможно при наличии доменной структуры [63]. Однако такой вариант нами не рассматривался в виду того, что поля резонанса значительно превышали H_s , а значит пленки находились в насыщенном состоянии.

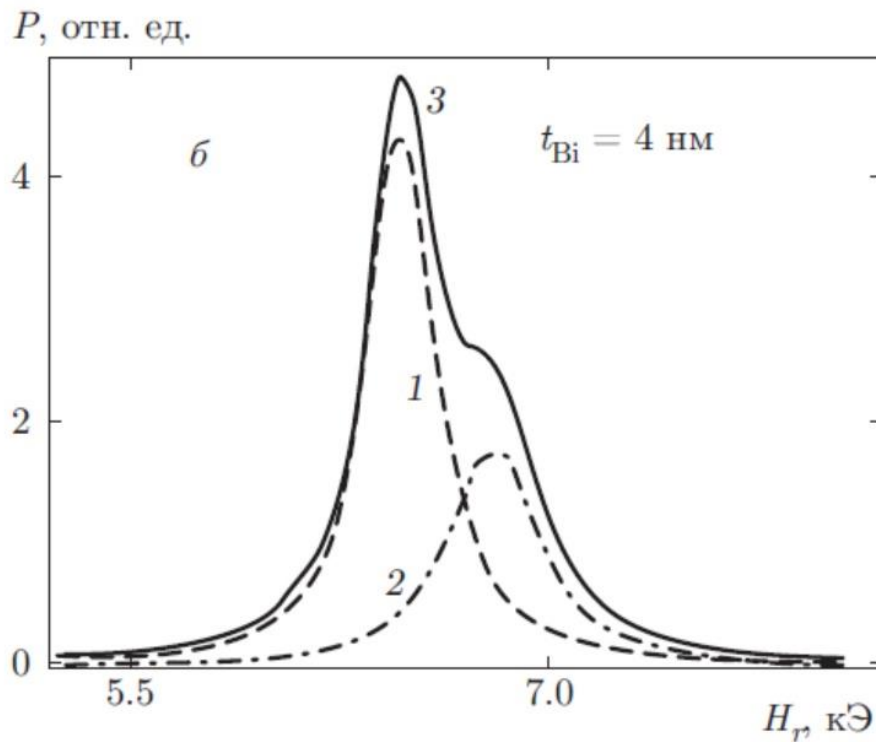
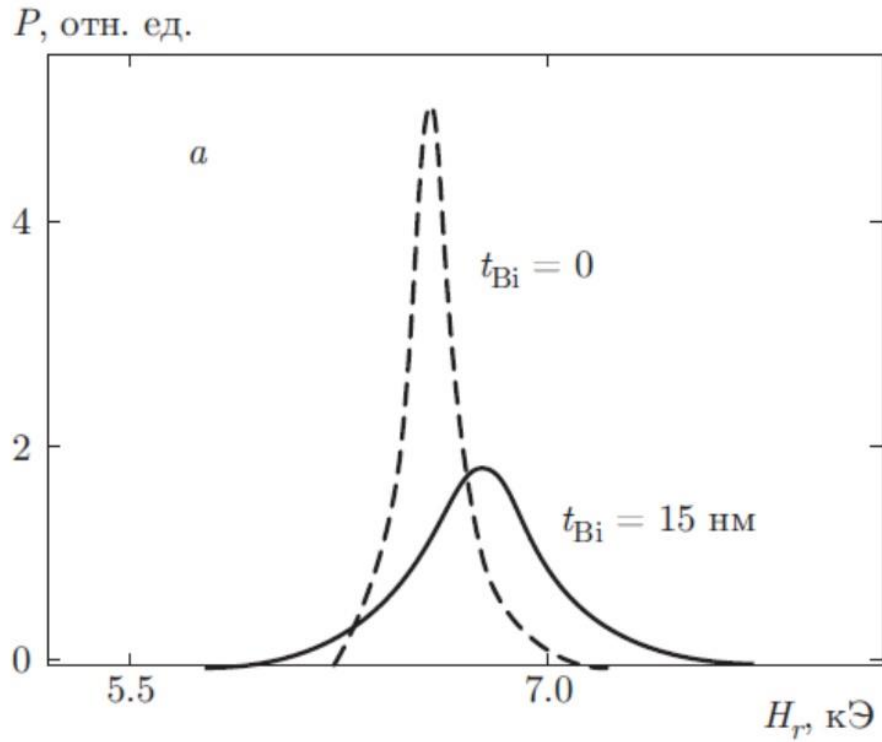


Рисунок 32 – Спектры магнитного резонанса при температуре 228 К для пленок NiFe/Bi/NiFe. (а) – $t_{\text{Bi}} = 0$ нм и 15 нм, (б) – $t_{\text{Bi}} = 4$ нм, кривые 1 и 2 – это низкополевая и высокополевая линии резонанса, соответственно [49]

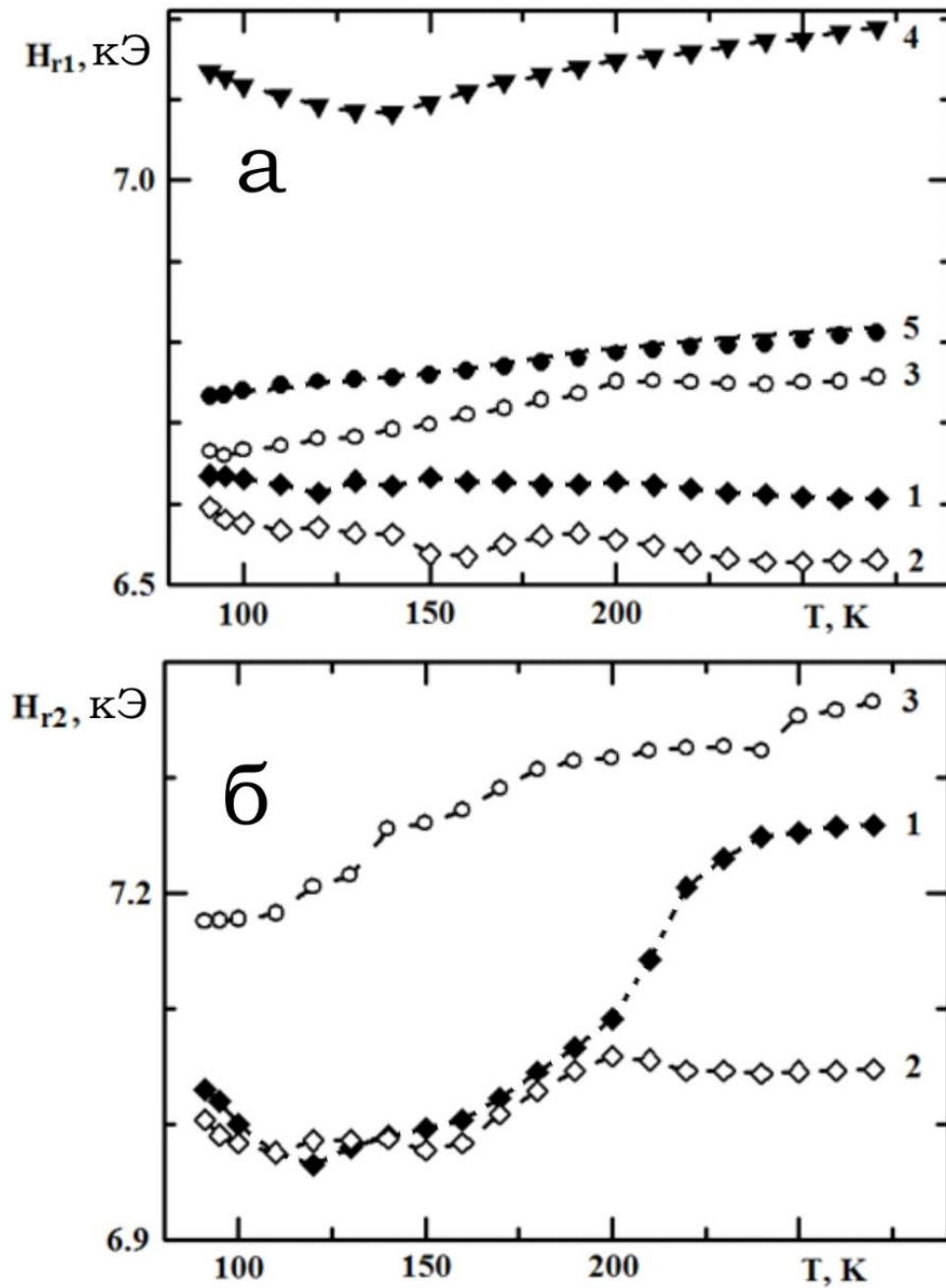


Рисунок 33 – Температурные зависимости резонансного поля для пленок NiFe/Bi/NiFe с толщиной прослойки 4, 6, 11, 15 и 0 нм (кривые 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно). а – низкополевой пик, б – высокополевой пик [49]

Низкополевые и высокополевые линии резонанса ведут себя по-разному при изменении температуры. Как видно из рисунка 33 кривая низкополевой моды близка к линейному виду. В то же время высокополевые моды для образцов с толщиной прослойки 4 и 6 нм имеют заметные особенности вблизи температуры 200 К. Единственные кривые для реперной пленки (кривая 5) и пленки с $t_{\text{Bi}} = 15$ нм (кривая 4) отнесены к низкополевым зависимостям.

По расположению низкополевых линий можно отметить признаки осцилляции анизотропии. При увеличении толщины прослойки величина резонансного поля уменьшается относительно поля реперной пленки для образцов 4 и 6 нм. Однако при дальнейшем увеличении толщины слоя висмута резонансное поле начинает увеличиваться, и кривая для 11 нм проходит рядом с кривой контрольной пленки. Кривая для пленки с толщиной прослойки 15 нм, в отличие от всех остальных, проходит гораздо выше кривой контрольной пленки.

3.5 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные результаты были обработаны с помощью модели в рамках феноменологического подхода [64]. Примем, что внешнее магнитное поле направлено вдоль плоскости пленки, а намагниченности ферромагнитных слоев направлены к нему под углами φ_i (рисунок 34). Индексами $i = 1$ и 2 будет обозначаться номер ферромагнитного слоя.

Для начала нам необходимо получить выражение для свободной энергии, которая является суммой разных вкладов. Мы должны учесть следующие составляющие:

1. Обменная энергия между слоями. В случае трехслойной системы мы имеем только одну константу обменного взаимодействия (J) и два угла (φ_i), описывающие отклонение намагниченности i -ого слоя от направления внешнего поля. Константа J будет иметь положительное значение при ферромагнитной связи и отрицательное при антиферромагнитной. Вклад межслоевого обменного взаимодействия в энергию системы записывается выражением:

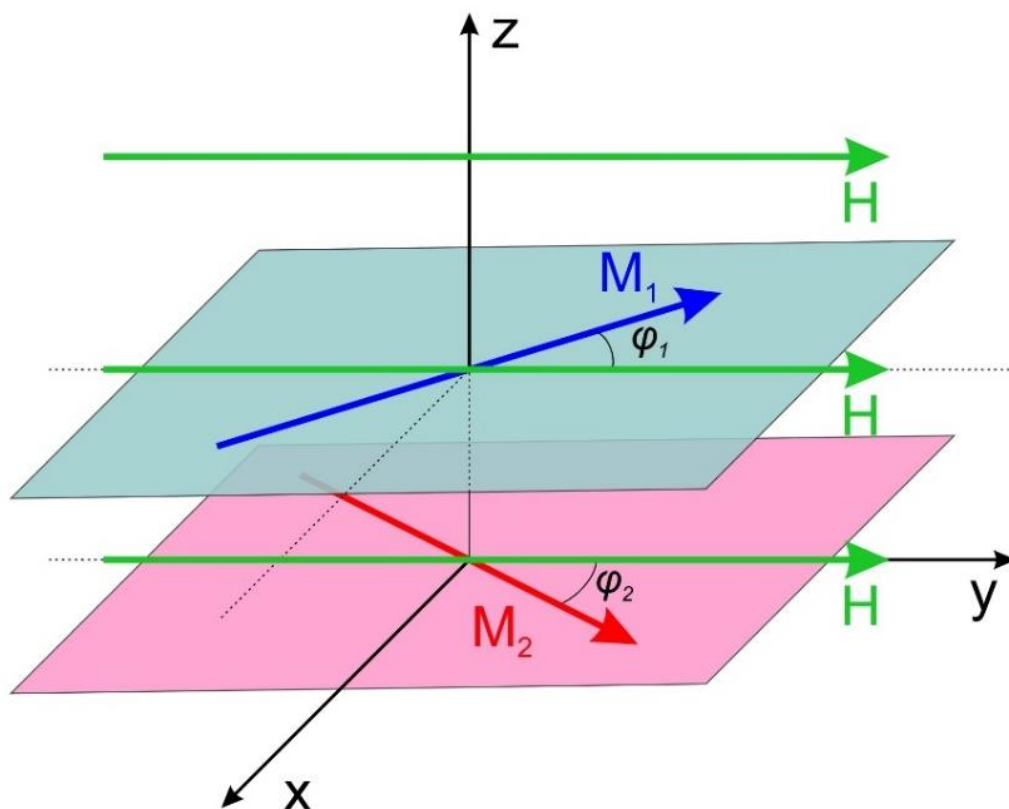


Рисунок 34 – Схематическое представление направлений векторов намагниченности и внешнего поля при исследовании методом магнитного резонанса

$$E_J = -J \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (11)$$

2. Энергия Зеемана. Данный вклад будет зависеть от взаимной ориентации внешнего поля H и намагниченности каждого из слоев M_i , а также от толщины ферромагнитного слоя t_{FM} . Энергия Зеемана отдельного слоя имеет минимальное значение, когда векторы H и M_i параллельны, а максимальное – когда антипараллельны. Выражение для энергии Зеемана записывается следующим образом:

$$E_Z = -t_{FM} H \cdot (M_1 + M_2), \quad (12)$$

3. Энергия анизотропии формы. Так как наши образцы являются квазидвумерными, мы должны использовать выражение для анизотропии плоских образцов:

$$E_N = 2\pi t_{FM} (M_{1z}^2 + M_{2z}^2), \quad (13)$$

где M_{iz} – это проекция вектора намагниченности i -того слоя ферромагнетика на ось, перпендикулярную поверхности образца. Минимальное значение анизотропии формы соответствует ориентации вектора M в любом направлении, параллельном плоскости пленки.

4. Энергия интерфейсной анизотропии. Предполагаемый вклад от границ раздела слоев мы записали с помощью констант анизотропии i -того слоя K_i [56]:

$$E_A = K_1 M_{1z}^2 + K_2 M_{2z}^2, \quad (14)$$

Общее выражение для свободной энергии к единице площади записывается следующим образом:

$$E = E_J + E_Z + E_N + E_A. \quad (15)$$

Поскольку резонансные поля гораздо больше полей насыщения всех пленок, можно считать состояния всех ферромагнитных слоев насыщенными. Это значит, что M_i направлены по полю H , т.е. $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_H$. Таким образом мы избавляемся от всех величин, зависящих от углов. Также следует полагать, что $t_{FM}HM \gg J$.

Полагая, что ферромагнитные слои являются идентичными, считаем равными модули векторов M_1 и M_2 . Также, опираясь на схожие данные для разных композиций двухслойных структур, считаем идентичными границы пермаллой/висмут и висмут/пермаллой для всех образцов, коэффициенты интерфейсной анизотропии принимаем равными друг другу, т.е. $K_i = K$.

С учетом перечисленных условий резонансные частоты даются выражениями:

$$(\omega_1/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M), \quad (16)$$

$$(\omega_2/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M) + 2(2H + H_A + H_M) H_E + 4 H_E^2, \quad (17)$$

где введены новые величины для обозначения поля, связанного с намагниченностью, поля анизотропии, а также введенное ранее поле обменного взаимодействия:

$$H_M = 4\pi M; \quad H_A = 2K/t_{FM}M; \quad H_E = J/t_{FM}M. \quad (18)$$

Из экспериментальных данных нам известны величины внешнего поля (в данном случае ими являются резонансные поля), намагниченности насыщения и толщины ферромагнитных слоев. Также известна частота переменного магнитного поля. Неизвестными в системе двух уравнений остаются лишь константы обменного взаимодействия и интерфейсной анизотропии J и K . Для их определения была выполнена теоретическая подгонка.

Для контрольной пленки в виду отсутствия межслоевого взаимодействия имеется только один резонансный пик, а формулы (16) и (17) в этом случае совпадают. Кривая, проведенная с помощью подгонки для контрольного образца при нулевой анизотропии ($H_A \approx 0$) с высокой точностью проходит через экспериментальные точки (кривая 5 на рисунке 35). Этот результат указывает на то, что материал магнитного слоя практически изотропный и нет никакой магнитной текстуры в плоскости.

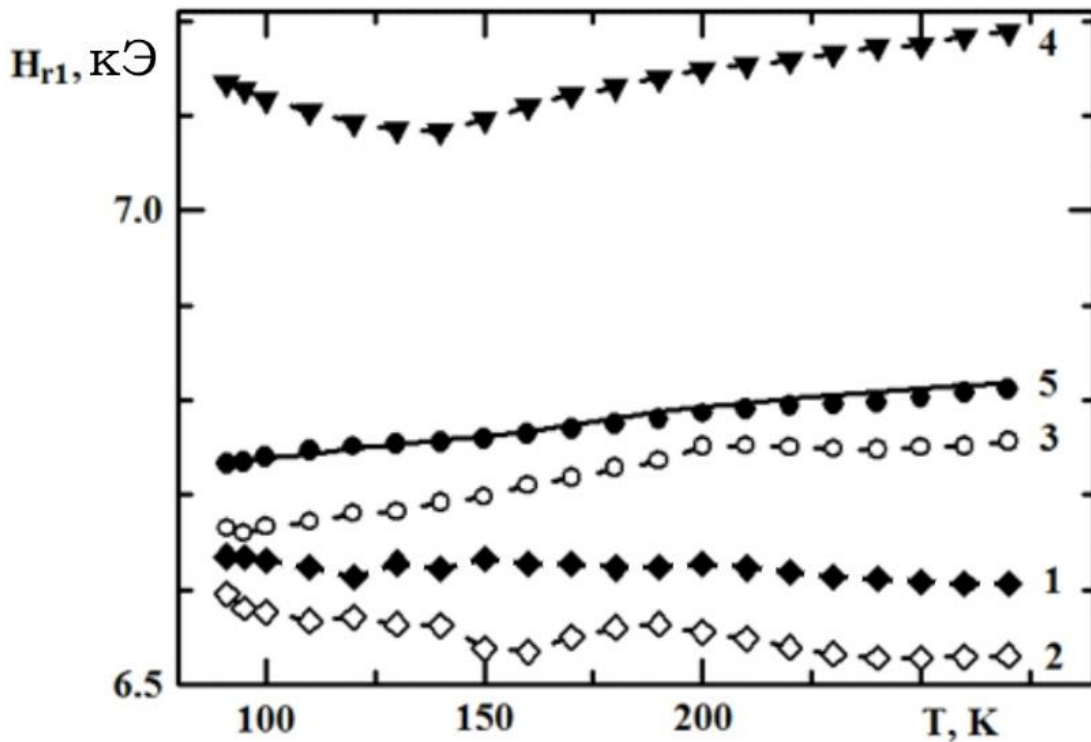


Рисунок 35 – Температурная зависимость низкополевого пика резонансного поля в пленках NiFe/Bi/NiFe. Кривые 1–5 – соответствуют $t_{Bi} = 4, 6, 11, 15, 0$ нм.

Сплошная линия 5 – расчет по формуле (16) при $H_A = 0$ [49]

Однако попытки провести анализ зависимостей резонансных полей для пленок с висмутовой прослойкой без использования дополнительных энергетических вкладов, а с учетом только межслоевого обмена, не приводят к разумным результатам.

Рассмотрим образец с толщиной прослойки 15 нм. Из рисунка 28 видно, что поле насыщения образца с $t_{\text{Bi}} = 15$ нм и контрольного образца (состоящего из двух слоев пермаллоя, нанесенных друг на друга) примерно одинаковые, что является признаком отсутствия связи или наличия слабой ферромагнитной связи между слоями через полуметаллическую прослойку. В таком случае кривая намагничивания должна определяться только свойствами ферромагнитного материала, который является идентичным в двух этих образцах. Но коэрцитивная сила, так же, как и значения резонансного поля, образца с прослойкой 15 нм больше, чем у контрольного образца. Это указывает на анизотропные свойства, связанные с интерфейсами NiFe/Bi и Bi/NiFe, которые есть в образце с прослойкой, но нет в контрольном образце.

Введение интерфейсной анизотропии можно считать полностью обоснованным, так как ее возникновение в пленочных структурах, в дополнение к взаимодействиям, характеризующим материалы слоев, происходит часто [56]. Причем величина интерфейсного вклада может быть сравнима с величиной анизотропии магнитного материала. Причина возникновения интерфейсной анизотропии состоит в том, что на границе раздела материалов имеет место перемешивание элементов и происходит перестройка ближайшего окружения магнитных ионов, что и приводит к вкладу в анизотропию, отличному от того, который наблюдается в объемном состоянии [65]. Ясно, что толщина интерфейса зависит от технологических режимов при напылении и реакционной способности элементов.

Таким образом, в нашем случае пик на рисунке 32, относящийся к пленке с толщиной прослойки $t_{\text{Bi}} = 15$ нм, соответствует вырожденным резонансам каждого из ферромагнитных слоев, а кривая 4 на рисунке 35 соответствует отрицательной

интерфейсной анизотропии, которая стремится вывести вектор намагниченности из плоскости пленки.

В случае образцов с висмутовой прослойкой толщиной 4, 6 и 11 нм имеются два пика. Один из них описывается уравнением (16) и принят за «акустическую» моду колебаний. Второй пик описывается уравнением (17), а соответствующие колебания приняты за оптическую моду.

Первым делом возникает вопрос какой из резонансов соотнести с единственным резонансом контрольной пленки, а какой возникает как следствие межслоевой связи. Если низкополевые пики отнести к акустическим модам, то из кривых на рисунке 35 и выражения (16) следует, что к анизотропии формы добавляется интерфейсная анизотропия типа легкая плоскость, что и ведет к уменьшению резонансных полей. Если предположить, что акустическими модами являются высокополевые резонансы, то интерфейсная анизотропия должна быть перпендикулярна плоскости пленки. Были проанализированы обе возможности.

Считаем, что низкополевые линии в спектре магнитного резонанса являются акустическими модами. Рассчитанные с помощью подгонки зависимости поля анизотропии для пленок с толщиной немагнитной прослойки $t_{Bi} = 4, 6, 11$ нм представлены на рисунке 36. Видно, что величина поля магнитной анизотропии H_A меняется немонотонно в зависимости от толщины немагнитной прослойки. Величина H_A для пленки с $t_{Bi} = 4$ нм меньше, чем для пленки с $t_{Bi} = 6$ нм, но больше чем для пленки с $t_{Bi} = 11$ нм. Поле анизотропии пленки с прослойкой 15 нм имеет противоположный знак и больше всех остальных по абсолютной величине.

Однако еще один факт представляется интересным: рост величины анизотропии при повышении температуры. Такое поведение ранее наблюдалось в соединениях редкая земля–3d-переходный металл [66], например, в PrCo_5 или в металлическом гадолинии. В этих системах эффект обусловлен разным температурным ходом в подсистемах (4f- или 3d-ионы) с конкурирующими анизотропиями или особенностью расположения уровней в энергетической шкале. В пленочных структурах также возможно подобное поведение [67]. Так, для пленочной структуры Co_m/Cu (m — количество слоев) показано [65], что величина

анизотропии, смена знака интерфейсной анизотропии, а также характер температурного поведения зависят от толщины интерфейса. Здесь эффект обусловлен конкуренцией вкладов от анизотропного обмена коллективизированных электронов и одноионной анизотропии. При этом результат зависит от числа m , т. е. от толщины и структуры интерфейса.

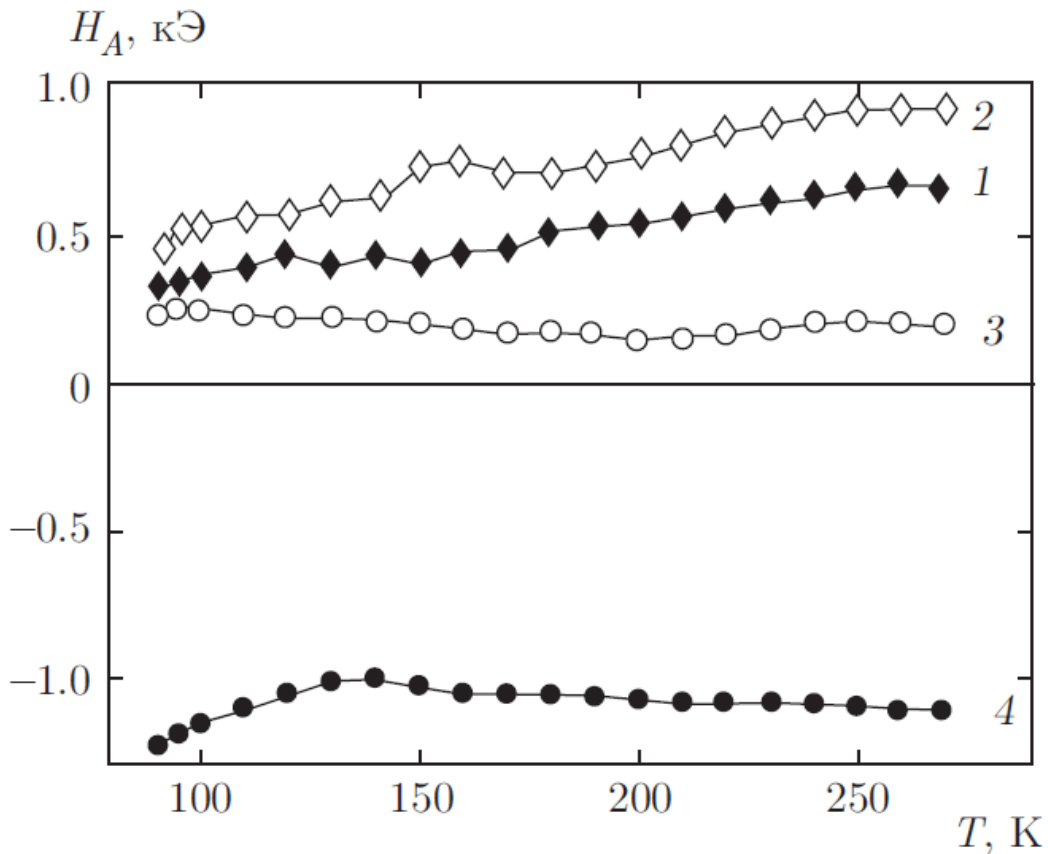


Рисунок 36 – Температурные зависимости поля анизотропии для пленок NiFe/Bi/NiFe: $t_{\text{Bi}} = 4$ нм (1), 6 нм (2), 11 нм (3), 15 нм (4)

С учетом полученных значений интерфейсной анизотропии для пленок с $t_{\text{Bi}} = 4, 6, 11$ нм по формуле (17) были рассчитаны значения обменных полей H_E (рисунок 37), ответственных за межслоевое взаимодействие. Во-первых, для использованных значений H_A знак межслоевого взаимодействия соответствует антиферромагнитному взаимодействию. Во-вторых, как видно на рисунке 37, по мере увеличения температуры абсолютная величина обменного поля растет.

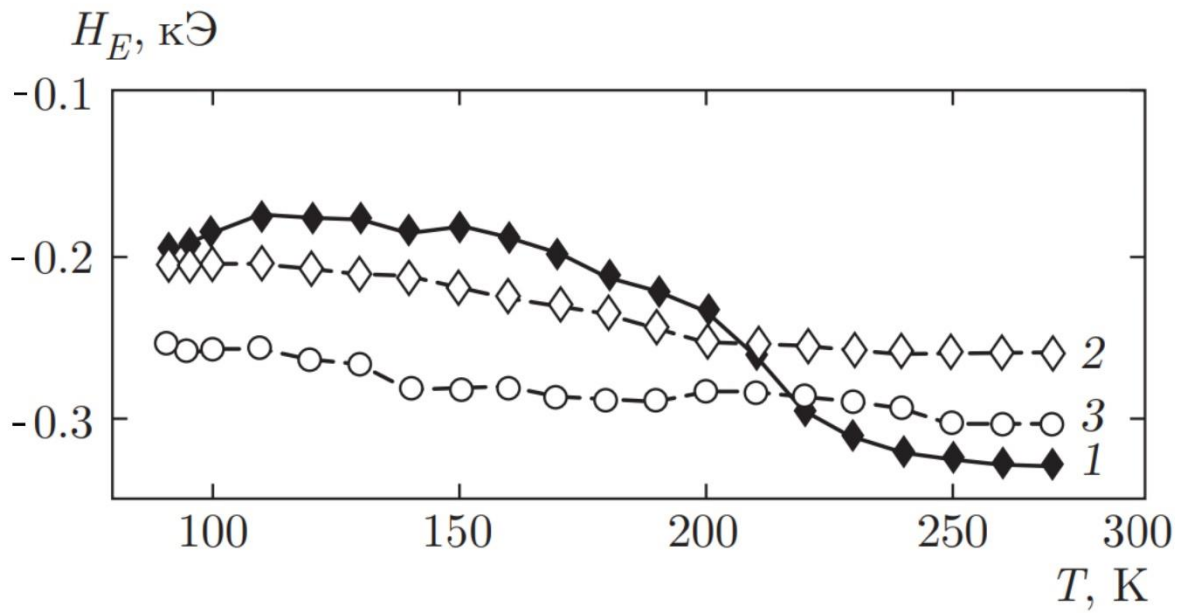


Рисунок 37 – Температурные зависимости обменного поля для пленок NiFe/Bi/NiFe: $t_{\text{Bi}} = 4$ нм (1), 6 нм (2), 11 нм (3)

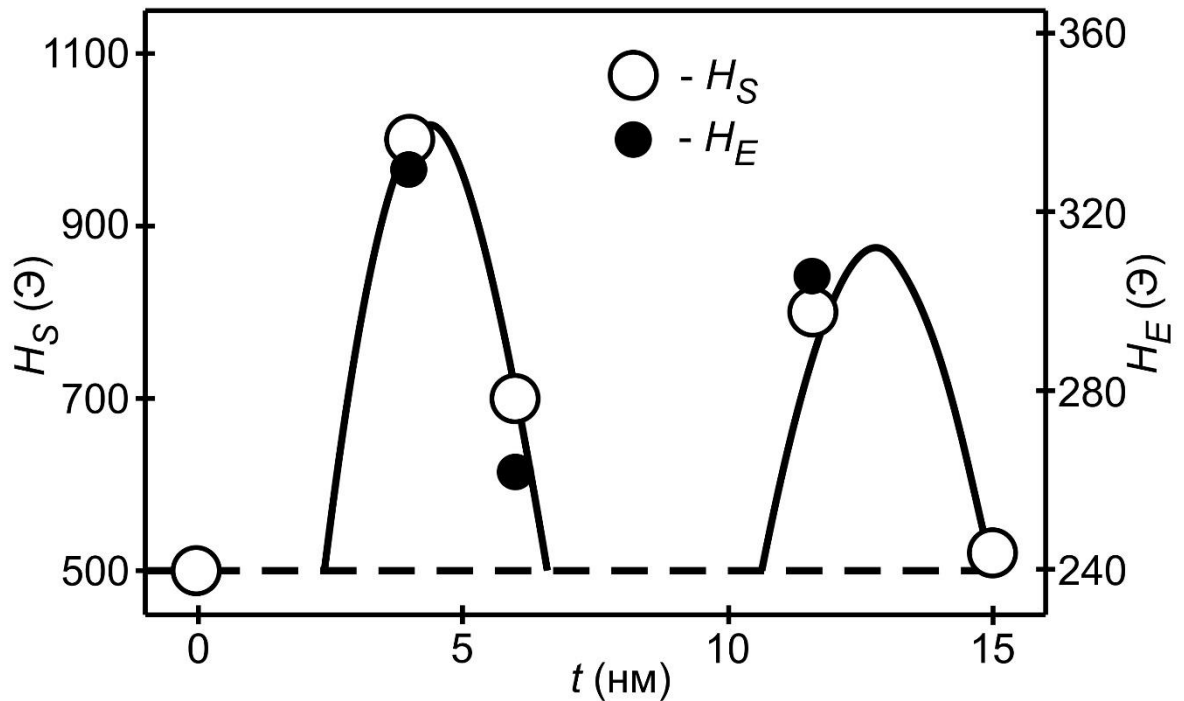


Рисунок 38 – Сравнение зависимостей поля насыщения H_s (левая шкала) из магнитостатических измерений и обменного поля из магниторезонансных измерений (правая шкала) от толщины прослойки висмута

Подобрав подходящий масштаб, можно убедиться, что поле насыщения из магнитостатических измерений и обменное поле (при $T = 260$ К) ведут себя схожим образом в зависимости от толщины прослойки (рисунок 38).

На рисунке 39 приведены частотно-полевые зависимости магнитного резонанса для пленки с $t_{\text{Bi}} = 4$ нм с параметрами H_A и H_E , полученными по формулам (16) и (17) при $T = 150$ К.

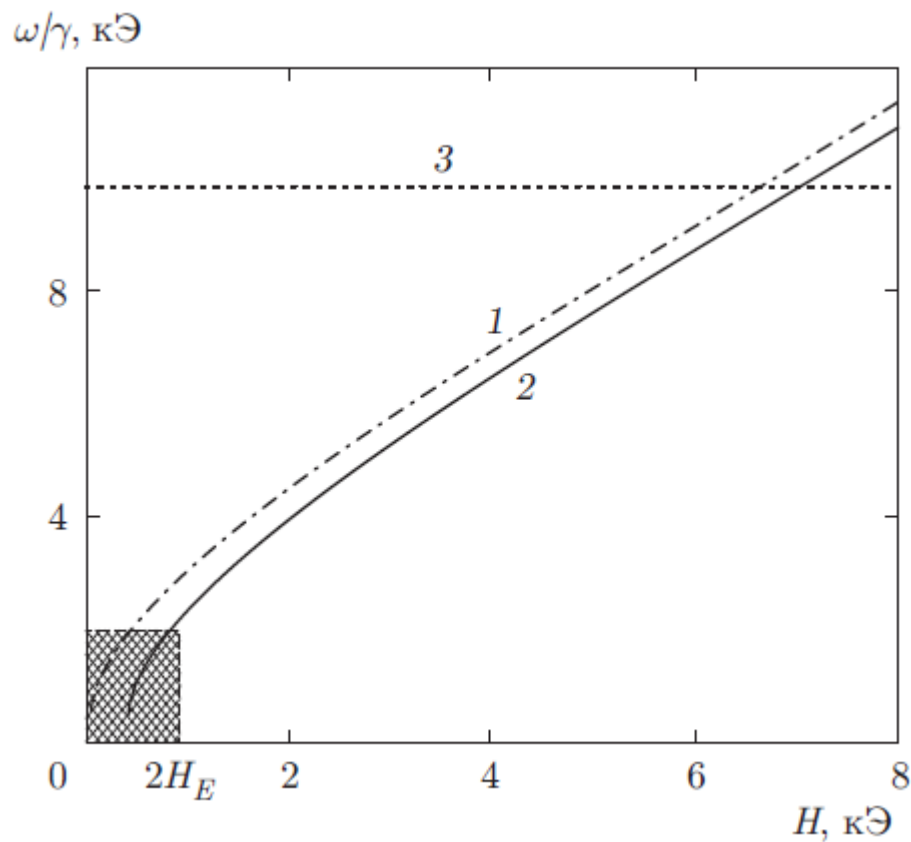


Рисунок 39 – Частотно-полевые зависимости магнитного резонанса в пленке NiFe/Bi/NiFe с $t_{\text{Bi}} = 4$ нм при $T = 150$ К: 1 — акустическая мода; 2 — оптическая мода; 3 — значение, соответствующее резонансной частоте. Заштрихована область ненасыщенного магнитного состояния [49]

Видно, что на использованной частоте внешнее магнитное поле практически подавляет эффекты как анизотропии, так и межслоевого обмена, и функции $\omega(H)$ имеют линейный вид. Заштрихованная область на рисунке 39 соответствует

ненасыщенному магнитному состоянию трехслойной структуры, т. е. когда выполняется условие $H_r < H_s$.

3.6 МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Применительно к нашему случаю важно знать электросопротивление магнитоактивного слоя и его реакцию на магнитное поле. На рисунке 40 приведена зависимости сопротивления пленки пермаллоя от величины магнитного поля [68]. Нетрудно оценить, что в данном случае $[R(H) - R(0)]/R(H) \approx 1\%$. Однако в нашем случае было получено, что для контрольной пленки без висмута (один слой пермаллоя толщиной 10 нм) величина магнитосопротивления не превышает 0.1% [69], что может свидетельствовать о качестве магнитного слоя пермаллоя.

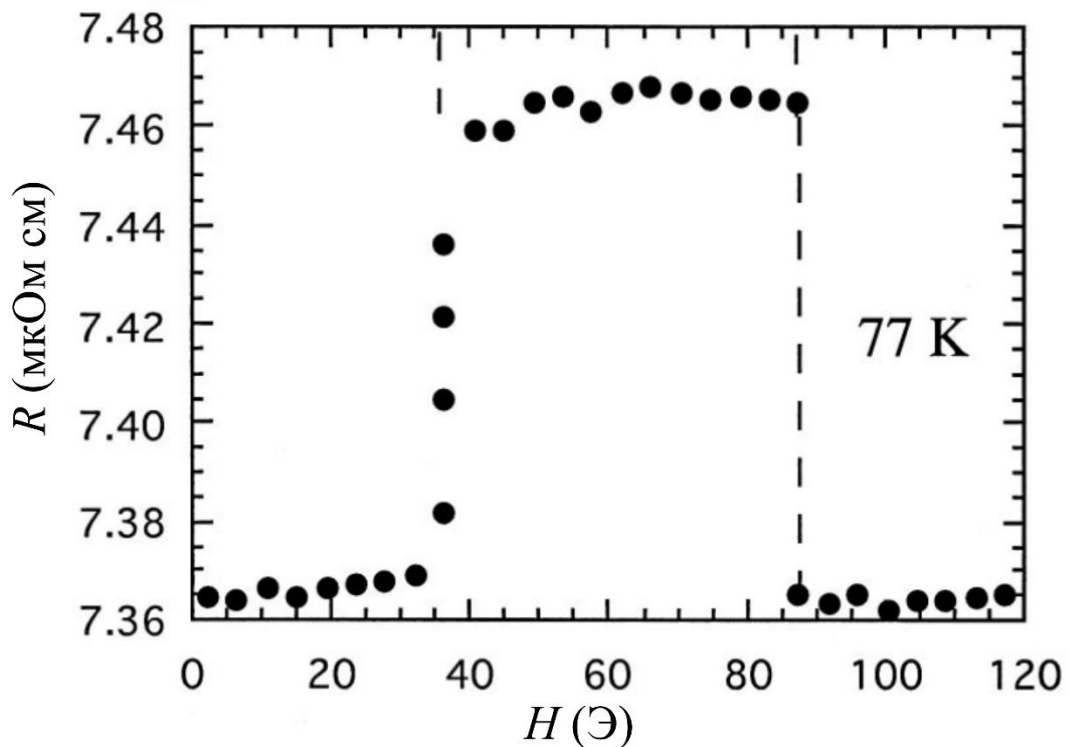


Рисунок 40 – Зависимость электрического сопротивления от магнитного поля для пленки $t_{\text{NiFe}} = 40$ нм при температуре $T = 77$ К [68]

Пермаллой характеризуется не очень высокой степенью спиновой поляризации ($\approx 40\%$) [70]. Это приводит к тому, что экспериментально полученные величины магнитосопротивления в расчете на трехслойный элемент многослойной структуры далеки от рекордных значений. Тем не менее, в силу ряда причин, а именно, малой магнитной анизотропии, температурной стабильности магнитных свойств и малого коэффициента температурного расширения, этот материал получил широкое использование в устройствах спинтроники, где в качестве слоя эмиттера используется материал с высокой степенью поляризации электронов проводимости (например, кобальт).

На рисунке 41 приведена зависимость магнитосопротивления в структуре $[\text{NiFe}(3\text{nm})/\text{Cu}(5\text{ nm})/\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{ nm})]_{15}$ [71]. Здесь если пересчитать на один блок мы получаем $\Delta R/R \approx 0.7\%$.

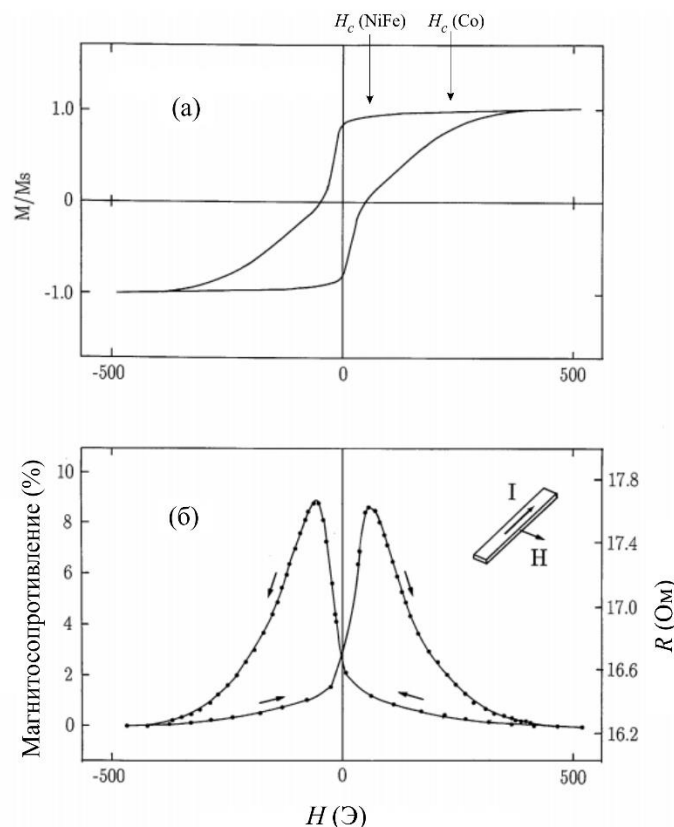


Рисунок 41 – Намагниченность (а) и сопротивление (б) для пленки $[\text{NiFe}(3\text{nm})/\text{Cu}(5\text{nm})/\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(5\text{ nm})]_{15}$ в зависимости от внешнего поля при комнатной температуре [71]

Как было показано в работе [72] зависимость магнитосопротивления от числа блоков в многослойной структуре является практически линейной функцией (см. рисунок 42)

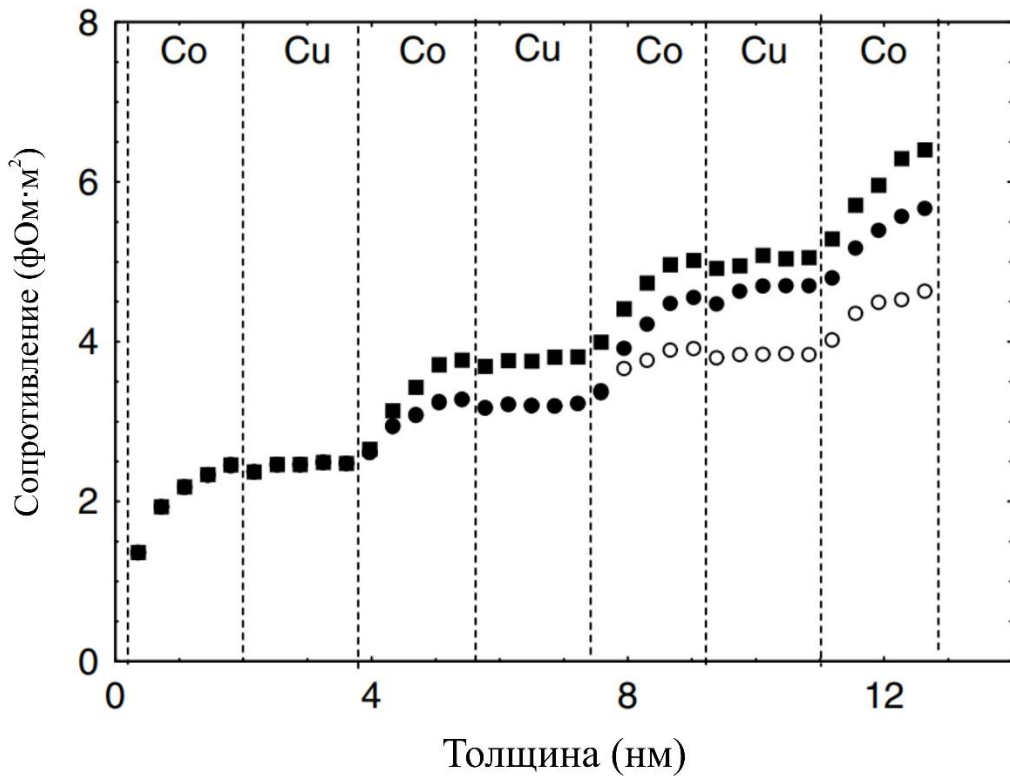


Рисунок 42 – Вычисленное сопротивление в многослойной структуре в зависимости от полной толщины структуры, которая состоит из 10 ML кобальта и 10 ML меди внутри каждого блока [72]

Приведенные выше данные служат той базой, на основе которой мы провели измерения влияния полуметаллической прослойки висмута на спин-зависимый транспорт в структуре NiFe/Bi/NiFe.

Были выполнены измерения магнитосопротивления пленок NiFe/Bi/NiFe при разных температурах и с разной толщиной висмутовой прослойки. Использовалась геометрия «ток в плоскости», где положительное направление магнитного поля выбрано вдоль направления тока.

Измерения проводились четырех-зондовым способом. Четыре контакта размещаются на поверхности пленки в линию так, что два крайних являются токоведущими, а средние используются для измерения напряжения (рисунок 43).

Сила тока при магниторезистивных исследованиях выбиралась исходя из двух предположений. Во-первых, она должна быть как можно меньше, чтобы не разрушать магнитное упорядочение из-за нагрева образца. Во-вторых, сила тока должна быть достаточной для того, чтобы возникающее на образце напряжение было значительно больше термоэлектрического эффекта.

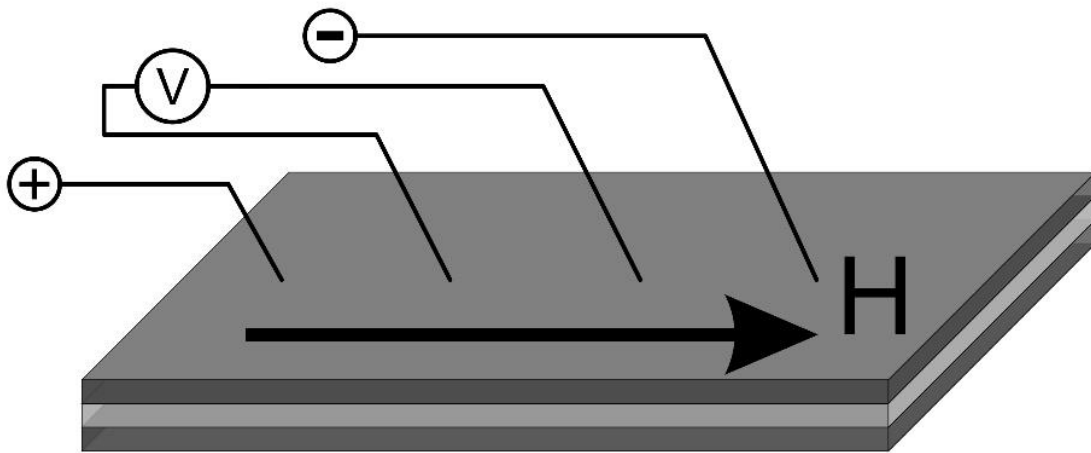


Рисунок 43 – Схема подключения контактов к образцу

Существование напряжения, не зависящего от величины пропускаемого тока, но зависящего от температуры, было обнаружено на разных пленках в ходе пробных измерений. О том, в чем выразалось это явление и о способах исключения его влияния на результаты измерений подробнее рассказано в Приложении 2.

Для трехслойных пленок с промежуточным слоем V_i при низких температурах наблюдался эффект магнитосопротивления, более значимый чем в одном слое пермаллоя [54, 69, 73]. Примеры характерных зависимостей приведены на рисунке 44. Максимальная величина эффекта составила около 1,5 %.

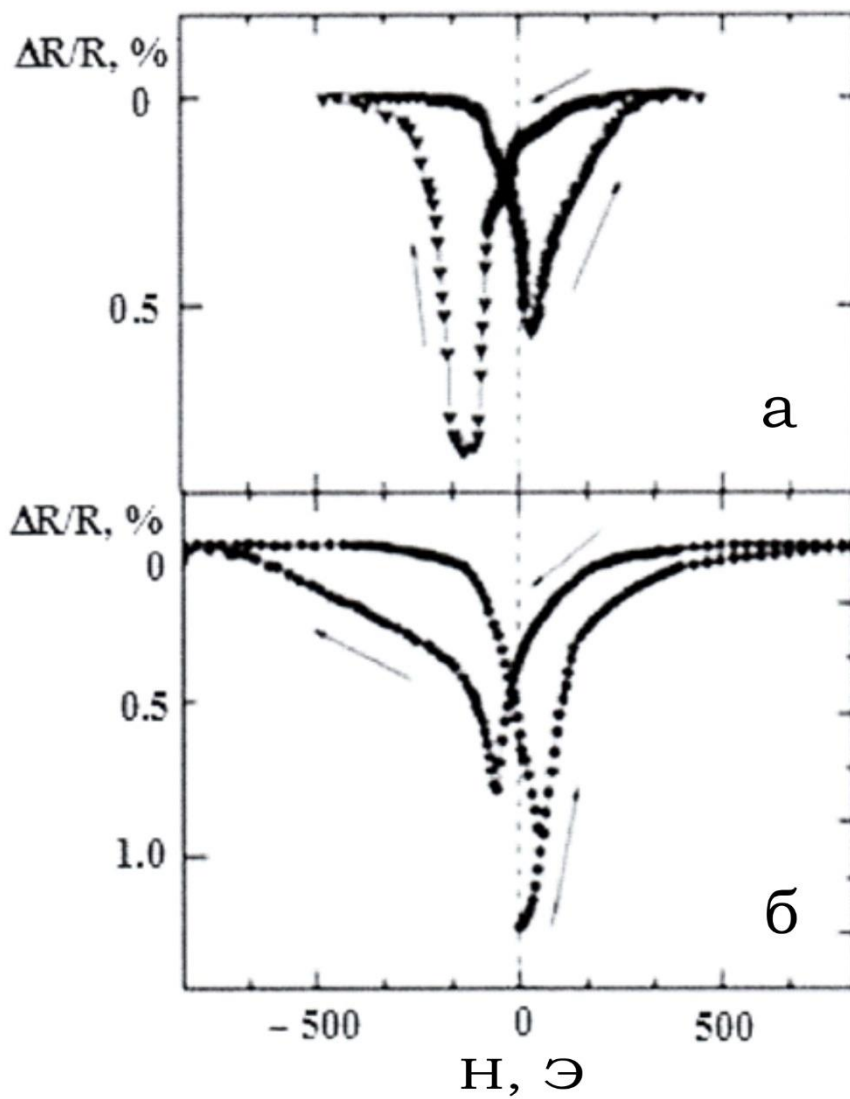


Рисунок 44 – Магнитосопротивление пленок NiFe/Bi/NiFe при температуре 30 К.

(а) – $t_{\text{Bi}} = 6$ нм, (б) – $t_{\text{Bi}} = 14$ нм

Как указывалось в обзорной части, при напылении слоя висмута и другого магнитоактивного материала на интерфейсе формируется слой, состоящий из наноразмерных гранул магнитоактивного материала, погруженных в слой висмута. Поэтому столь небольшая величина эффекта связывается нами с рассеянием электронов на этих магнитных гранулах, в результате чего происходит потеря спиновой поляризации электронов проводимости. При протекании электронов по второму магнитоактивному слою степень поляризации значительно утеряна, что и определяет величину эффекта магнитосопротивления. Также на снижение степени спиновой поляризации заметную роль играет шероховатость интерфейса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы:

1. Отработана технология получения пленок в системе пермаллой-висмут (NiFe/Bi/NiFe, NiFe/Bi, Bi/NiFe) методом термического испарения в вакууме и найден оптимальный режим, при котором достигается воспроизводимость магнитных результатов: комнатная температура подложки и скорость 0,5 нм/с;
2. При магнитостатических исследованиях пленок NiFe/Bi/NiFe обнаружено, что зависимость поля насыщения от t_{Bi} является осциллирующей с периодом осцилляций 8 нм, что заметно превышает период осцилляций межслоевого обмена для пленок с немагнитными металлическими и полупроводниковыми прослойками;
3. Методом электронного магнитного резонанса установлено, что в трехслойных пленках имеет место немонотонная зависимость межслоевого взаимодействия и интерфейсной магнитной анизотропии от толщины висмута и температуры. Для пленок с малой толщиной прослойки висмута (4 и 6 нм) наблюдается рост величины анизотропии с температурой;
4. Для пленок с толщиной прослойки 4, 6, 11 нм имеет место положительный знак интерфейсной анизотропии (легкая плоскость), а для пленки с $t_{\text{Bi}} = 15$ нм – отрицательный знак (легкая ось);
5. Получено, что величина магнитосопротивления в отдельном слое пермаллоя составляет ~ 0.1 %, в то время как величина магнитосопротивления структур NiFe/Bi/NiFe достигает 1.5 %. Невысокие значения магнитосопротивления структур NiFe/Bi/NiFe по сравнению с многослойными пленками с магнитными слоями из пермаллоя и прослойкой из металла можно связать с потерей спиновой поляризации при отражении носителей тока от интерфейса NiFe/Bi.

Благодарности

Выражаю благодарность своему научному руководителю кандидату физико-математических наук Патрину К.Г. за ценные советы при планировании исследования, внимание и помощь во всех аспектах рабочего процесса.

Автор благодарит сотрудников ИФ СО РАН Яковчука В.Ю., Еремина Е.В., Великанова Д.А. и Шияна Я.Г. за помощь в получении и исследовании пленок NiFe/Bi/NiFe.

Хочу поблагодарить Патрина Г.С., а также коллективы лаборатории магнитодинамики ИФ СО РАН и кафедры общей физики ИИФиРЭ СФУ за поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Patrin, G. S. Magnetism of Multilayer Films in Transition Metal/Semiconductor System / G. S. Patrin and V. O. Vas'kovskii // *Phys. Met. Metallography*. – 2006. – Vol. 101, Suppl. 1. – P. S63.

2 Шик, А.Я. Физика низкоразмерных систем / А. Я. Шик, Л.Т. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков. – СПб.: Наука, 2001.

3 Grünberg, P. Layered magnetic structures: Evidence for antiferromagnetic coupling of Fe layers across Cr interlayers / P. Grünberg, R. Schreiber, Y. Pang, M. B. Brodsky, and H. Sowers // *Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 57. – P. 2442.

4 Baibich, M.N. Giant magnetoresistance of (0 0 1)Fe/(0 0 1)Cr magnetic superlattices / M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet and A. Friederich J. Chazelas // *Phys. Rev. Lett.* – 1988. – Vol. 61. – P. 2472.

5 Binasch, G. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach and W. Zinn // *Phys. Rev. B*. – 1989. – Vol. 39. – P. 4828.

6 Parkin, S.S.P. Oscillations in exchange coupling and magnetoresistance in metallic superlattice structures: Co/Ru, Co/Cr, and Fe/Cr / S.S.P. Parkin, N. More and K.P. Roche // *Phys. Rev. Lett.* – 1990. – Vol. 64. – P. 2304.

7 Bruyere, J.C. On a new coupling mechanism between thin ferromagnetic layers separated by a non-ferromagnetic material / J.C. Bruyere, O. Massenet, R. Montmory and L. Neel // *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* – 1964. – Vol. 258. – P. 841.

8 Bruyere, J.C. Magnetic interactions between two thin ferromagnetic films separated by a thin film of chromium or palladium of thickness less than 300 Å / J.C. Bruyere, O. Massenet, R. Montmory and L. Neel // *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* – 1964. – Vol. 258. – P. 1423.

9 Massenet, O. On the magnetic properties of thin films of complex structure: NiFe–Mn–NiFeCo and NiFe–Mn / O. Massenet and R. Montmory // *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.* – 1964. – Vol. 258. – P. 1752.

10 Neel, L. A magnetostatic problem concerning ferromagnetic films / L. Neel // C. R. Hebd. Seances Acad. Sci. – 1962. – Vol. 255. – P. 1545.

11 Neel, L. A new method of coupling the magnetizations of two thin ferromagnetic films / L. Neel // C. R. Hebd. Seances Acad. Sci. – 1962. – Vol. 255. – P. 1676.

12 Bruno, P. Ruderman-Kittel theory of oscillatory interlayer exchange coupling / P. Bruno and C. Chappert // Phys. Rev. B. – 1992. – Vol. 46. – P. 261.

13 Slonczewski, J.C. Overview of interlayer exchange theory / J.C. Slonczewski // J. Magn. Magn. Mater. – 1995. – Vol. 150. – P. 13-24.

14 Mills, D. L. Nanomagnetism, Ultrathin Films, Multilayers and Nanostructures / D. L. Mills, and J. A. C Bland (eds.). – New York: Elsevier, 2006.

15 Stiles, M. D. Exchange coupling in magnetic heterostructures / M. D. Stiles // Phys. Rev. B. – 1993. – Vol. 48. – P. 7238.

16 Shinjo, T. Nanomagnetism and Spintronics / T. Shinjo (ed.). – Elsevier, 2009.

17 Tsymbal, E.Y. Origin of GMR. In book: Perspective of Giant Magnetoresistance / E.Y. Tsymbal, D.G. Pettifor. – Academic Press, 2001.

18 Tian, C.S. Body-centered-cubic Ni and its magnetic properties / C.S. Tian et al. // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94. – P. 137210.

19 Левицкий, Ю.Т. Полуметаллы, их сплавы и соединения / Ю.Т. Левицкий, В.И. Палажченко, Н.В. Левицкая. – Владивосток: Дальнаука, 2004.

20 Комник, Ю.Ф. Физика металлических пленок / Ю.Ф. Комник. – Москва: Атомиздат, 1979.

21 Денисов, В. М. Висмут-содержащие материалы. Структура и физико-химические свойства / В. М. Денисов, Н. В. Белоусова, Г. С. Моисеев и др. – Екатеринбург: УрО РАН, 2000.

22 Ильин, А.И. Нелинейные вольт-амперные характеристики крестообразных микроструктур из тонких пленок висмута / А.И. Ильин, А.И. Апаршина, С.В. Дубонос, Б.Н. Толкунов // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 10. – Стр. 80.

23 Liu, K. Finite-size effects in bismuth nanowires / K. Liu, C. L. Chien, P. C. Searson // *Phys. Rev. B.* – 1998. – Vol. 58. – P. 14681-14684.

24 Wang, J.W. Giant positive magnetoresistance in non-magnetic bismuth nanoparticles / J.W. Wang, G.H. Cao, Y.D. Li // *Materials Research Bulletin.* – 2003. – Vol. 38. – P. 1645–1651.

25 Yang, F. Y. Large Magnetoresistance and Finite-Size Effects in Electrodeposited Single-Crystal Bi Thin Films / F. Y. Yang, Kai Liu, C. L. Chien, P. C. Searson // *Phys. Rev. Lett.* – 1999. – Vol. 82. – P. 3328.

26 Xiao, S. Thin Film with Insulating Interior but Metallic Surfaces / S. Xiao, D. Wei, and X. Jin // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 109. – P. 166805.

27 Aitani, M. In situ Magnetotransport Measurements in Ultrathin Bi Films: Evidence for Surface-Bulk Coherent Transport/ M. Aitani, T. Hirahara, S. Ichinokura, M. Hanaduka, D. Shin, and S. Hasegawa // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – Vol. 113. – P. 206802.

28 Sweeney, J. Bismuth-Containing Compounds / J. Sweeney, I. P. Marko, S. R. Jin et al. – London: Springer, 2013.

29 Hozumi, T. Magnetic and structural properties of MnBi multilayered thin films / T. Hozumi, P. LeClair, G. Mankey, C. Mewes, H. Sepehri-Amin, K. Hono, and T. Suzuki // *J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 115. – P. 17A737.

30 Honda, S. Magnetic and transport properties of alternately deposited Co-Bi films / S. Honda and Y. Nagata // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 93. – P. 5538.

31 Unger, W.K. Growth of MnBi Films on Mica *Journal of Applied Physics* / W. K. Unger and M. Stolz // *J. Appl. Phys.* – 1971. – Vol. 42. – P. 1085.

32 Yang, G.H. Structural and magnetic investigation of metastable alloy phases in Bi–Co multilayers / G.H. Yang, J.B. Chen, B. Zhao, F. Pan // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2004. – Vol. 365. – P. 43-48.

33 Vorobiova, S.I. The annealing effect on structure, magnetoresistance and magnetic properties of Co/Bi/Co thin films / S.I. Vorobiova, O.V. Shutylieva, I.M. Pazukha, and A.M. Chornous // *Eur. Phys. J. Plus.* – 2016. – Vol. 131. – P. 203.

34 Chen, Q.M. Metastable bismuth-iron alloy films synthesized with ion mixing and magnetron cosputtering / Q.M. Chen, F.Z. Cui, Y.D. Fan, and H.D. Li // *J. Appl. Phys.* – 1988. – Vol. 63. – P. 2452.

35 Hsu, J.H. Atypical time-dependent magnetic behaviors of Fe–Bi films / J.H. Hsu, H.X. Wang, A.C. Sun, and P.C. Kuo // *J. Appl. Phys.* – 2006. – Vol. 99. – P. 08F106.

36 Hsu, J.H. Long magnetic relaxation time of Fe-Bi spin-glass system / J.H. Hsu, J.T. Lee, C.R. Chang, M.T. Lin // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2001. – Vol. 226-230. – P. 502-504.

37 Forester, D.W. A new magnetic amorphous alloy system: (Fe,Co)-bismuth / D.W. Forester, J.H. Schelleng, P. Lubitz, P. D'Antonio, and C. George // *J. Appl. Phys.* – 1982. – Vol. 53. – P. 2240-2242.

38 Zhou, H. Magnetic Properties of superconducting Bi/Ni bilayers / H. Zhou, X. Gong, X. Jin // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2017. – Vol. 422. – P. 73-76.

39 Harada, Y. Structural analysis and magnetic properties of Fe/Bi system / Y. Harada, Y. Nakanishi, N. Yoshimoto, M. Daibo, M. Nakamura, M. Yoshizawa // *Physica B: Condensed Matter.* – 2003. – Vol. 329–333. – P. 1109–1110.

40 Cui, F. Z. A new magnetic multilayer system: Iron- bismuth / F. Z. Cui, Y. D. Fan, Y. Wang, A. M. Vredenberg, H. J. G. Draaisma, and R. Xu // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 68. – P. 701.

41 Hsu, J.H. Interlayer coupling in a trilayer junction having bismuth as spacer layer / Jen-Hwa Hsu and D. R. Sahu // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 86. – P. 192501.

42 Shalygina, E.E. Exchange interaction in Co/Bi/Co thin-film systems with Bi interlayer / E.E. Shalygina, A.M. Kharlamova, G.V. Kurlyandskaya, A.V. Svalov // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2017. – Vol. 440. – P. 136-139.

43 Meikap, A.K. Localization in thin films of Bi with magnetic overlayers / A.K. Meikap, S.K. De, S. Chatterjee // *Phys. Rev. B.* – 1994. – Vol. 49, №2. – P. 1054-1063.

44 MultiMode SPM Instruction Manual. Veeco Instruments Inc.

45 Волков, Н. В. Модернизированный спектрометр электронного магнитного резонанса с твердотельным С.В.Ч. генератором [Препринт № 635Ф] / Н. В. Волков, Г. С. Патрин. – Красноярск: ИФ СО АН СССР, 1990.

46 Patrin, G.S. Influence of semimetal spacer on magnetic properties in NiFe/Bi/NiFe trilayer films / G.S. Patrin., V.Yu. Yakovchuk, D.A. Velikanov // *Phys. Lett. A.* – 2007. – Vol. 363. – P. 164-167.

47 Chi, P. W. Photoluminescence and wettability control of NiFe/ZnO heterostructure bilayer films / P. W. Chi, D. H. Wei, S. H. Wu, Y. Y. Chenc and Y. D. Yao // *RSC Adv.* – 2015. – Vol. 5. – P. 96705-96713.

48 Патрин, Г.С. Исследования межслоевых взаимодействий в трехслойных пленках FeNi/Bi/FeNi / Г.С. Патрин, В.Ю. Яковчук, Д.А. Великанов, К.Г. Патрин, С.А. Яриков // *Известия РАН. Серия физическая.* – 2012. – Т. 76, №2. – С. 205.

49 Патрин, К.Г. Магниторезонансные исследования трехслойных пленок FeNi/Bi/FeNi / К.Г. Патрин, С.А. Яриков, Г.С. Патрин, В.Ю. Яковчук, А.И. Лямкин // *ЖЭТФ.* – 2017. – Т. 151, В. 5. – С. 919

50 Cullity, B.D. Introduction to magnetic materials / B.D. Cullity, C.D. Graham // Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, Inc., 2009.

51 Гуревич, А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках / А.Г. Гуревич. – Москва: Наука, 1973.

52 Патрин, Г.С. Исследование межслоевых взаимодействий в трехслойных пленках FeNi/Bi/FeNi / Г.С. Патрин, В.Ю. Яковчук, Д.А. Великанов, К.Г. Патрин, С.А. Яриков // *Труды XV-го Международного симпозиума «Нанозифика и наноэлектроника».* Нижний Новгород, Россия. – 2011. – Т. 1. – Стр. 81-82.

53 Яриков, С.А. Исследование межслоевых взаимодействий в трехслойных пленках FeNi/Bi/FeNi / С.А. Яриков // *Материалы Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-17).* Екатеринбург, Россия. – 2011. – Стр. 167-168.

54 Яриков, С.А. Взаимодействие между магнитными слоями через полуметаллическую прослойку в системе FeNi/Bi/FeNi / С.А. Яриков // *Материалы Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-19).* Архангельск, Россия. – 2013. – Стр. 153-154.

55 Pettit, K. Strong biquadratic coupling and antiferromagnetic-ferromagnetic crossover in NiFe/Cu multilayers / K. Pettit, S. Gider, S. S. P. Parkin, and M. B. Salamon // *Phys. Rev. B.* – 1997. – Vol. 56. – P. 7819.

56 Johnson, M. T. Magnetic anisotropy in metallic multilayers / M.T. Johnson, P.J.H. Bloemen, F.J.A. den Broeder, and J.J. DeVrist // *Rep. Prog. Phys.* – 1996. – Vol. 59, – P. 1409.

57 Purcell, S.T. Spatially resolved magneto-optical investigation of the perpendicular anisotropy in a wedge-shaped ultrathin epitaxial Co layer on Pd(111) / S.T. Purcell, M.T. Johnson, N.W.E. McGee, W.B. Zeper and W. Hoving // *J. Magn. Mater.* – 1992. – Vol. 113. – P. 257-263.

58 Jungblut, R. Orientational and structural dependence of magnetic anisotropy of Cu/Ni/Cu sandwiches: Misfit interface anisotropy / R. Jungblut, M. T. Johnson, J. aan de Stegge, A. Reinders, and F. J. A. den Broeder // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 75. – P. 6424.

59 Hsu, J.H. Oscillatory behavior of coercivity in Bi/Co bilayers / J.H. Hsu, Z.L. Xue, T.C. Huang, Z.H. Wei, M.F. Lai // *J. Magn. Mater.* – 2007. – Vol. 310. – P. 2239–2241.

60 Патрин, К.Г. Магнитный резонанс в пленках FeNi/Bi/FeNi / К.Г. Патрин, С.А. Яриков, В.Ю. Яковчук, Г.С. Патрин, Ю.П. Соломатов, В.Г. Плеханов // *Письма в ЖТФ.* – 2015. – Т. 41, В. 22. – С. 48.

61 Патрин, Г.С. Исследование межслоевых взаимодействий в пленках FeNi/Bi/FeNi методом магнитного резонанса / Г.С. Патрин, С.А. Яриков, В.Ю. Яковчук, К.Г. Патрин, В.Г. Плеханов // *Материалы XX Международного симпозиума «Нанозифика и нанозлектроника».* Россия, Нижний Новгород. – 2016. – Т. 1. – Стр. 240-241.

62 Patrin, K.G. Magnetic resonance study of the interlayer coupling in FeNi/Bi/FeNi films / K.G. Patrin, S.A. Yarikov, V.Yu. Yakovchuk, G.S. Patrin, V.G. Plekhanov // *VI Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism".* Красноярск, Россия. – 2016. – P. 503.

63 Morrish, A.H. *The Physical Principles of Magnetism* / A.H. Morrish. – New York: Wiley, 2001.

64 Layadi, A. Effect of biquadratic coupling and in-plane anisotropy on the resonance modes of a trilayer system / A. Layadi // *Phys. Rev. B.* – 2002. – Vol. 65. – P. 104422.

65 Weinberg, P. *Magnetic Anisotropies in Nanostructured Matter* / P. Weinberg. – New York: Taylor & Francis Group, 2009.

66 Белов, К.П. Ориентационные переходы в редкоземельных магнетиках / К. П. Белов, А. К. Звездин, А. М. Кадомцева, Р. З. Левитин. – Москва: Наука, 1973.

67 Skomski, R. *Nanomagnetics* / R. Skomski // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2003. – Vol. 15. – P. R841.

68 Ono, T. Propagation of the magnetic domain wall in submicron magnetic wire investigated by using giant magnetoresistance effect / T. Ono, H. Miyajima, K. Shigeto, K. Mibu, N. Hosoi, T. Shinjo. // *J. Appl. Phys.* – 1999. – Vol. 85. – P. 6181.

69 Patrin, K.G. *Magnetism and Magnetoresistance in NiFe/Bi/NiFe Films* / K.G. Patrin, V.Yu. Yakovchuk, G.S. Patrin, S.A. Yarikov // *Solid State Phenomena.* – 2012. – V. 190. – P. 439.

70 Bass, J. *Magnetotransport (Experimental)*. In book: *Magnetic Interactions and Spin Transport* / A. Chtchelkanova, S. Wolf, Y. Idzerda. (Eds.). – New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.

71 Shinjo T. Large Magnetoresistance of Field-Induced Giant Ferrimagnetic Multilayers / T. Shijio and H. Yamamoto // *J. Phys. Soc. Jap.* – 1990. – Vol. 59. – P. 3061.

72 Bose, D. Mean Free Path Effects on the Current Perpendicular to the Plane Magnetoresistance of Magnetic Multilayers / D. Bose, M.A. Howson, D.J. Hickey, S. Shatz, N. Wiser, E.Y. Tsybal, D.G. Pettifor // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 85. – P. 1314.

73 Patrin, K.G. Magnetic, resonance and magnetoresistive properties of NiFe/Bi/NiFe films / K.G. Patrin, V.Yu. Yakovchuk, D.A. Velikanov, G.S. Patrin, S.A. Yarikov // *Program & Abstracts. International Symposium on Spin Waves. Saint Petersburg, Russia.* – 2011. – P. 114.

74 Low Level Measurements Handbook. Precision DC Current, Voltage, and Resistance Measurements. – Keithley Instruments, Inc., 2004.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рабочая программа в MPMS задается в виде файла из последовательных текстовых команд. Существует список команд для управления основными системами MPMS. Среди них есть специальные команды, несущие в себе целый алгоритм. Например, для снятия зависимости магнитного момента образца от магнитного поля достаточно ввести одну команду с указанием диапазона измерений и шага. Но команды для работы с нановольтметром Keithley 2182A и источником тока Keithley 2400 SourceMeter в программном обеспечении MPMS не предусмотрены по умолчанию. Существует DLL-библиотека, содержащая список возможных операций с данными приборами. Поэтому последовательность команд для измерения зависимости сопротивления от температуры или магнитного поля необходимо создавать вручную, программируя каждое действие.

Например, блок команд для снятия одной экспериментальной точки выглядит следующим образом:

```
TMP TEMP 265.000 1.000  
WAI WAITFOR 15 0 1 167.4026 0 0  
EDCX EDCEXEC "C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll" "2 0.00001"  
EDCX EDCEXEC "C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll" "4"  
EDCX EDCEXEC "C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll" "2 0"
```

Первая строка здесь отвечает за установку температуры (265 К со скоростью 1 К/мин), вторая – за стабилизацию заданной температуры. Третья, четвертая и пятая строки открывают библиотеку управления измерительными приборами «EDCPrgm.dll» и выполняют указанную команду из ее списка. В данном примере это: подача тока 10 мкА, запись всех измеряемых величин (ток, напряжение на образце, актуальную температуру и величину магнитного поля) в файл данных и установка нулевого тока (отключение тока).

При составлении последовательности для измерения температурной зависимости напряжения необходимо скопировать этот блок столько раз, сколько экспериментальных точек необходимо получить. Далее в первой строке каждого блока вручную заменяется число 265 на нужное значение температуры в Кельвинах.

Если в ход эксперимента необходимо добавить изменение магнитного поля, то к каждому блоку добавляются две новые строки. Как и в случае с температурой первая строка устанавливает величину магнитного поля в эрстедах, а вторая – его стабилизацию:

```
FLD FIELD 110.0 1 0
```

```
WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0
```

Для уменьшения трудоемкости процесса создания рабочей последовательности была написана программа на языке Microsoft Visual Basic for Applications на базе программного пакета Microsoft Excel. Текстовый файл последовательности команд составляется не вручную, а с помощью специального интерфейса, который позволяет указать необходимые диапазоны, шаг и условия для каждой операции (рисунок 45). При нажатии необходимой кнопки в текстовый файл добавляется последовательность команд для требуемой операции, после чего можно нажать эту же или другую кнопку операции, дописав в текущий файл еще одну последовательность и т.д. После составления файла остается лишь изменить его формат с «.txt» на требуемый в MPMS «.seq» и запустить.

Всего было запрограммировано 4 вида операций для магнитотранспортных исследований: снятие вольт-амперной характеристики, снятие температурной зависимости при нагреве, снятие температурной зависимости при охлаждении, снятие развертки напряжения по полю. Температурные измерения в нашем исследовании носили однотипный характер с постоянными диапазонами и шагом, поэтому их изменение сводилось к заданию внешнего магнитного поля и подаваемого на образец тока. Развертка по полю может состоять из 3 диапазонов,

например, для случая, когда нужно более подробно исследовать магнитосопротивление в малых полях и увеличить шаг при больших значениях магнитного поля.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K							
1	Название последовательности	AgCo100Ge80_2_0 директори C:\USERS\Yarikov\2015_NiFe\B					стандартное охлаждение											
2		Вставить разделитель в файл!					файл данных	3_CoolZF_025mkA										
3							при поле (Э)	0					Добавить охлаждение					
4							при токе (А)	0.00000025										
5	Задать единичные параметры установки:						стандартный нагрев											
6	Температура (К) //только целые числа	300	Добавить установку T			файл данных	4_Heat10kOe_025mkA											
7	Скорость (К/мин)	2				при поле (Э)	5000					Добавить нагрев						
8	Ожидание (сек)	15				при токе (А)	0.00000025											
9	Поле (Э)	0	Задать поле			развертка по полю файл данных 5_FS_300K_CurMinu Добавить развертку												
10	Ожидание (сек)	15										от до шаг						
11	ВАХ											диапазон1, Oe 0 300 50						
12	файл данных	newVA										диапазон2, Oe 400 1000 100						
13	от тока (А)	-0.0000005				диапазон3, Oe 1250 3000 250												
14	до тока (А)	0.0000005				при темпер. (К) 300												
15	количество точек	21				при токе (А) -0.0000005												
16							скорость ожидания (сек) 2 15											
17																		
18																		
19																		

Рисунок 45 – Интерфейс программы для создания последовательности

Также в данной программе для каждой отдельной операции можно создать свой файл данных (имя которого можно указать с помощью интерфейса), что позволяет оптимизировать процесс обработки результатов. Полный текст программы приведен далее:

```

Sub Температура()
Dim Direct As String, FName As String
Direct = ActiveWorkbook.Path
FName = Range("B1").Value
MyFile = Direct & "\" & FName & ".txt"
Dim Temp As String, Rate As String, WaitT As String
Temp = Range("B6").Value
Rate = Range("B7").Value
WaitT = Range("B8").Value
stroka1 = "TMP TEMP " & Temp & ".000 " & Rate & ".000"
stroka2 = "WAI WAITFOR " & WaitT & " 0 1 167.4026 0 0"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1 & vbNewLine & stroka2
Close #1

```



```
MsgBox ("Установка температуры добавлена!")
End Sub
```

```
Sub Поле()
Dim Direct As String, FName As String
Direct = ActiveWorkbook.Path
FName = Range("B1").Value
MyFile = Direct & "\" & FName & ".txt"
Dim Field As String, WaitF As String
Field = Range("B9").Value
WaitF = Range("B10").Value
stroka1 = "FLD FIELD " & Field & ".0 1 0"
stroka2 = "WAI WAITFOR " & WaitF & " 0 0 147.7417 1 0"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1 & vbNewLine & stroka2
Close #1
MsgBox ("Установка поля добавлена!")
End Sub
```

```
Sub BAX()
Dim Direct As String, FName As String
Direct = ActiveWorkbook.Path
FName = Range("B1").Value
MyFile = Direct & "\" & FName & ".txt"
Dim IVA1 As String, IVA2 As String, NVAI As String, VAFile As String
VADir = Range("D1").Value
VAFile = Range("H2").Value
IVA1 = Range("H3").Value
IVA2 = Range("H4").Value
NVAI = Range("H5").Value
stroka1 = "EDCINIT EDCINIT ""C:\programs\work_program\EDCPrm.dll""""
stroka2 = "DAT DATAFILE """" & VADir & "\" & VAFile & """"
stroka3 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrm.dll"" ""5 " & IVA1 & " " &
IVA2 & " " & NVAI & """"
stroka4 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrm.dll"" ""2 0""""
stroka5 = "ENDEDC EOS"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1 & vbNewLine & stroka2 & vbNewLine & stroka3 & vbNewLine & stroka4 &
vbNewLine & stroka5
Close #1
MsgBox ("Измерение BAX добавлено!")
End Sub
```

```
Sub СтандОхлаждение()
'файл послед-ти (Общий)
Dim Direct As String, FName As String
Direct = ActiveWorkbook.Path
FName = Range("B1").Value
MyFile = Direct & "\" & FName & ".txt"
'файл данных
Dim SCFile As String
```

```

SCDir = Range("D1").Value
SCFile = Range("H8").Value
'первые строки
stroka1SC = "EDCINIT EDCINIT ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll""
stroka2SC = "DAT DATAFILE "" & SCDir & ""\ & SCFile & """"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SC & vbNewLine & stroka2SC
Close #1
'задание тока и поля
Dim ISC As String, FSC As String
ISC = Range("H10").Value
FSC = Range("H9").Value
stroka1SCF = "FLD FIELD " & FSC & ".0 1 0"
stroka2SCF = "WAI WAITFOR 15 0 0 147.7417 1 0"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SCF & vbNewLine & stroka2SCF
Close #1
'от 300 до 25 через 5K
For NSC1 = 300 To 25 Step -5
stroka1SCBT = "TMP TEMP " & NSC1 & ".000 1.000"
stroka2SCBT = "WAI WAITFOR 15 0 1 167.4026 0 0"
stroka3SCBT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & ISC & """"
stroka4SCBT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5SCBT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SCBT & vbNewLine & stroka2SCBT & vbNewLine & stroka3SCBT & vbNewLine
& stroka4SCBT & vbNewLine & stroka5SCBT
Close #1
Next NSC1
'продувка
stroka1SCP = "ANN -----"
stroka2SCP = "AFV FLUSHVALVE 1"
stroka3SCP = "WAI WAITFOR 50 0 0 300.0440 0 0"
stroka4SCP = "AFV FLUSHVALVE 0"
stroka5SCP = "WAI WAITFOR 5 0 0 300.0440 0 0"
stroka6SCP = "ANN -----"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SCP & vbNewLine & stroka2SCP & vbNewLine & stroka3SCP & vbNewLine &
stroka4SCP & vbNewLine & stroka5SCP & vbNewLine & stroka6SCP
Close #1
'20K
stroka1SC20 = "TMP TEMP 20.000 1.000"
stroka2SC20 = "WAI WAITFOR 15 0 1 167.4026 0 0"
stroka3SC20 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & ISC & """"
stroka4SC20 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5SC20 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SC20 & vbNewLine & stroka2SC20 & vbNewLine & stroka3SC20 & vbNewLine &
stroka4SC20 & vbNewLine & stroka5SC20
Close #1
'От 16 до 4 через 2

```

```

For NSC2 = 16 To 4 Step -2
stroka1SCNT = "TMP TEMP " & NSC2 & ".000 0.300"
stroka2SCNT = "WAI WAITFOR 15 0 1 167.4026 0 0"
stroka3SCNT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & ISC &
""""
stroka4SCNT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5SCNT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SCNT & vbNewLine & stroka2SCNT & vbNewLine & stroka3SCNT & vbNewLine
& stroka4SCNT & vbNewLine & stroka5SCNT
Close #1
Next NSC2
'концовка EOC
strokaFSC = "ENDEDC EOS"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, strokaFSC
Close #1

MsgBox ("Стандартный процесс охлаждения при токе " & ISC & "[A] и поле " & FSC & "[Э]
добавлен!")
End Sub

```

```

Sub СтандНагрев()
'файл послед-ти (Общий)
Dim Direct As String, FName As String
Direct = ActiveWorkbook.Path
FName = Range("B1").Value
MyFile = Direct & "\" & FName & ".txt"
'файл данных
Dim SHFile As String
SHDir = Range("D1").Value
SHFile = Range("H12").Value
'первые строки
stroka1SH = "EDCINIT EDCINIT ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll""
stroka2SH = "DAT DATAFILE "" & SHDir & "\" & SHFile & """"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SH & vbNewLine & stroka2SH
Close #1
'задание тока и поля
Dim ISH As String, FSH As String
ISH = Range("H14").Value
FSH = Range("H13").Value
stroka1SHF = "FLD FIELD " & FSH & ".0 1 0"
stroka2SHF = "WAI WAITFOR 15 0 0 147.7417 1 0"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SHF & vbNewLine & stroka2SHF
Close #1
'От 4 до 16 через 2
For NSH1 = 4 To 16 Step 2
stroka1SHNT = "TMP TEMP " & NSH1 & ".000 2.000"
stroka2SHNT = "WAI WAITFOR 15 0 1 167.4026 0 0"

```

```

stroka3SHNT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & ISH &
""""
stroka4SHNT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5SHNT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SHNT & vbNewLine & stroka2SHNT & vbNewLine & stroka3SHNT & vbNewLine
& stroka4SHNT & vbNewLine & stroka5SHNT
Close #1
Next NSH1
'от 20 до 300 через 5K
For NSH2 = 20 To 300 Step 5
stroka1SHBT = "TMP TEMP " & NSH2 & ".000 2.000"
stroka2SHBT = "WAI WAITFOR 15 0 1 167.4026 0 0"
stroka3SHBT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & ISH &
""""
stroka4SHBT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5SHBT = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1SHBT & vbNewLine & stroka2SHBT & vbNewLine & stroka3SHBT & vbNewLine
& stroka4SHBT & vbNewLine & stroka5SHBT
Close #1
Next NSH2
'концовка EOC
strokaFSH = "ENDEDC EOS"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, strokaFSH
Close #1

MsgBox ("Стандартный процесс нагрева при токе " & ISH & "[A] и поле " & FSH & "[Э]
добавлен!")
End Sub

Sub Развертка()
'файл послед-ти (Общий)
Dim Direct As String, FName As String
Direct = ActiveWorkbook.Path
FName = Range("B1").Value
MyFile = Direct & "\" & FName & ".txt"
'файл данных
Dim FFile As String
FDir = Range("D1").Value
FFile = Range("N6").Value
'первые строки
stroka1F = "EDCINIT EDCINIT ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll""
stroka2F = "DAT DATAFILE "" & FDir & "\" & FFile & """"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1F & vbNewLine & stroka2F
Close #1
'задание тока, температуры и нулевого поля
TempF = Range("N12").Value
RateTF = Range("O12").Value

```

```

WaitTF = Range("P12").Value
CurrentF = Range("N13").Value
stroka1FTemp = "TMP TEMP " & TempF & ".000 " & RateTF & ".000"
stroka2FTemp = "WAI WAITFOR " & WaitTF & " 0 1 167.4026 0 0"
stroka1FPole = "FLD FIELD 0.0 1 0"
stroka2FPole = "WAI WAITFOR 15 0 0 147.7417 1 0"
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1FTemp & vbNewLine & stroka2FTemp & vbNewLine & stroka1FPole & vbNewLine
& stroka2FPole
Close #1
'положительное поле Диапзон1 увеличение
D11ot = CLng(Range("N8").Value)
D11do = CLng(Range("O8").Value)
D11sh = CInt(Range("P8").Value)
For N = D11ot To D11do Step D11sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'положительное поле Диапзон2 увеличение
D21ot = CLng(Range("N9").Value)
D21do = CLng(Range("O9").Value)
D21sh = CInt(Range("P9").Value)
For N = D21ot To D21do Step D21sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'положительное поле Диапзон3 увеличение
D31ot = CLng(Range("N10").Value)
D31do = CLng(Range("O10").Value)
D31sh = CInt(Range("P10").Value)
For N = D31ot To D31do Step D31sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""

```

```

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'положительное поле Диапзон3 уменьшение
D32ot = CLng(Range("O10").Value)
D32do = CLng(Range("N10").Value)
D32sh = -CInt(Range("P10").Value)
For N = D32ot To D32do Step D32sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'положительное поле Диапзон2 уменьшение
D22ot = CLng(Range("O9").Value)
D22do = CLng(Range("N9").Value)
D22sh = -CInt(Range("P9").Value)
For N = D22ot To D22do Step D22sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'положительное поле Диапзон1 уменьшение
D12ot = CLng(Range("O8").Value)
D12do = CLng(Range("N8").Value)
D12sh = -CInt(Range("P8").Value)
For N = D12ot To D12do Step D12sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1

```

```

Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'отрицательное поле Диапзон1 увеличение
D13ot = -CLng(Range("N8").Value)
D13do = -CLng(Range("O8").Value)
D13sh = -CInt(Range("P8").Value)
For N = D13ot To D13do Step D13sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""
stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'отрицательное поле Диапзон2 увеличение
D23ot = -CLng(Range("N9").Value)
D23do = -CLng(Range("O9").Value)
D23sh = -CInt(Range("P9").Value)
For N = D23ot To D23do Step D23sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""
stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1
Next N
'отрицательное поле Диапзон3 увеличение
D33ot = -CLng(Range("N10").Value)
D33do = -CLng(Range("O10").Value)
D33sh = -CInt(Range("P10").Value)
For N = D33ot To D33do Step D33sh
stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"
stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"
stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF &
""""
stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""
stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""
Open MyFile For Append As #1
Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine &
stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1
Close #1

```

Next N

'отрицательное поле Диапзон3 уменьшение

D34ot = -CLng(Range("O10").Value)

D34do = -CLng(Range("N10").Value)

D34sh = CInt(Range("P10").Value)

For N = D34ot To D34do Step D34sh

stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"

stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"

stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF & """"

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""

stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""

Open MyFile For Append As #1

Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine & stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1

Close #1

Next N

'отрицательное поле Диапзон2 уменьшение

D24ot = -CLng(Range("O9").Value)

D24do = -CLng(Range("N9").Value)

D24sh = CInt(Range("P9").Value)

For N = D24ot To D24do Step D24sh

stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"

stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"

stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF & """"

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""

stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""

Open MyFile For Append As #1

Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine & stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1

Close #1

Next N

'отрицательное поле Диапзон1 уменьшение

D14ot = -CLng(Range("O8").Value)

D14do = -CLng(Range("N8").Value)

D14sh = CInt(Range("P8").Value)

For N = D14ot To D14do Step D14sh

stroka1NPF1 = "FLD FIELD " & N & ".0 1 0"

stroka2NPF1 = "WAI WAITFOR 10 0 0 147.7417 1 0"

stroka3NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 " & CurrentF & """"

stroka4NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""4""

stroka5NPF1 = "EDCX EDCEXEC ""C:\programs\work_program\EDCPrgm.dll"" ""2 0""

Open MyFile For Append As #1

Print #1, stroka1NPF1 & vbNewLine & stroka2NPF1 & vbNewLine & stroka3NPF1 & vbNewLine & stroka4NPF1 & vbNewLine & stroka5NPF1

Close #1

Next N

'концовка EOC

strokaFSH = "ENDEDC EOS"


```
Open MyFile For Append As #1  
Print #1, strokaFSH  
Close #1
```

```
MsgBox ("Полевая развертка при токе " & CurrentF & "[А] и температуре " & TempF & "[К]  
добавлена!")  
End Sub
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

При очень малом токе для всех образцов наблюдалась схожая температурная зависимость напряжения (рисунок 46). При этом кривая для положительного направления тока была приподнята относительно кривой, соответствующей отрицательному направлению тока, как при охлаждении образца, так и при его нагреве.

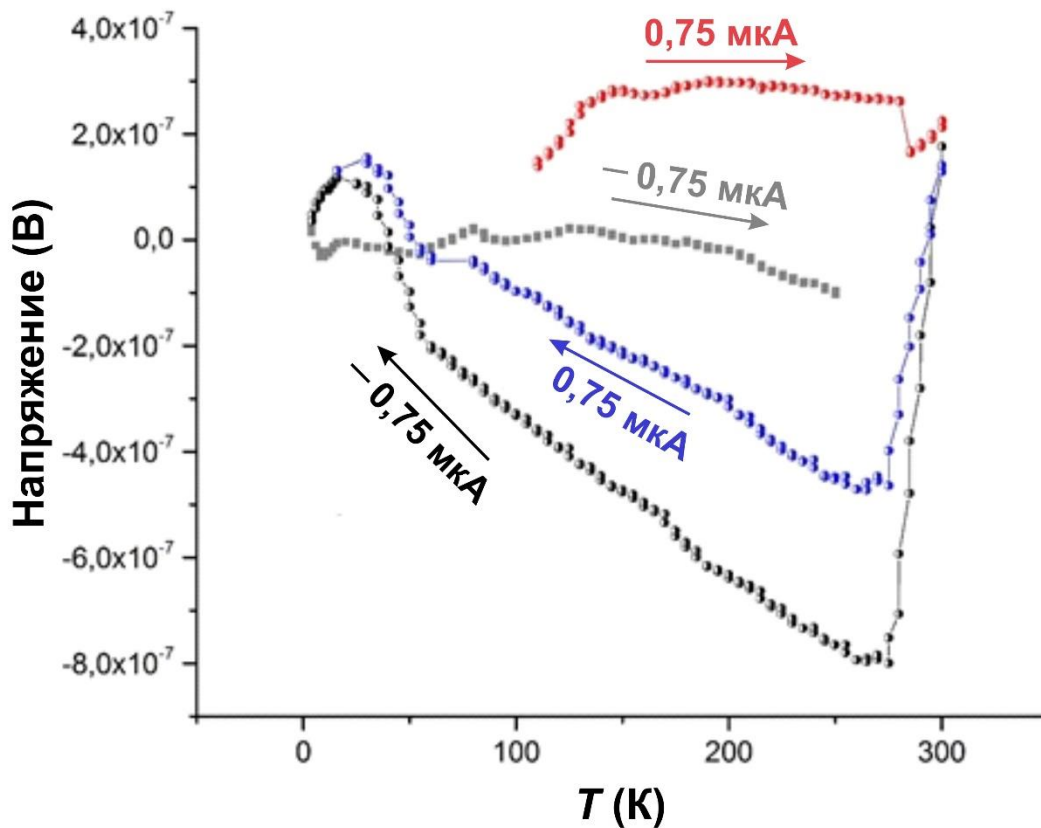


Рисунок 46 – Температурная зависимость напряжения на тестовом образце при прямом и обратном направлении тока величиной 0,75 мкА. Стрелками указано направление изменения температуры (нагрев или охлаждение)

Таким образом, к напряжению в каждой точке добавляется термо-ЭДС, одинаковая по знаку при любом направлении тока [74]. Зная величину напряжения

для прямого и обратного токов (V^+ и V^-) можно исключить влияние термоэлектрического эффекта, вычислив истинное значение напряжения на пленки по формуле:

$$V = (V^+ + V^-) / 2 \quad (19)$$

Более эффективным является «дельта-метод», при котором в каждой точке производится три последовательных измерения напряжения: на прямом токе (V_1^+), на обратном токе (V^-) и снова на прямом (V_2^+). Если интервалы времени между этими измерениями малы, то можно исключить влияние дрейфующего напряжения, приняв его изменение в этом промежутке за линейное. В этом случае формула для вычисления истинного напряжения на поверхности образца выглядит так:

$$V^{ист} = (V_1^+ + V_2^+ - 2V^-) / 4 \quad (20)$$