Jany)

ЯРИКОВ Станислав Алексеевич

МАГНИТНЫЕ И РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР В СИСТЕМЕ ПЕРМАЛЛОЙ-ВИСМУТ

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: **Патрин Константин Геннадьевич**, директор ООО «Енисейзолотоавтоматика», кандидат физикоматематических наук

Официальные оппоненты: Шалыгина Елена Евгеньевна, доктор физикоматематических наук, профессор, главный научный сотрудник, кафедра магнетизма, физический факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (г. Москва)

Паршин Анатолий Сергеевич, доктор физикоматематических наук, доцент, заведующий кафедрой технической физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева» (г. Красноярск)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Башкирский государственный университет" (г. Уфа)

Защита состоится «17» мая 2019 г. в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.075.01 Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) по адресу: $\underline{660036}$ г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте http://kirensky.ru/

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.075.01 доктор физико-математических наук

1/2

Втюрин А.Н.

Общая характеристика работы

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 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-стекольному.

Однако эффекты спин-зависимого транспорта имеют величины недостаточные для практического применения. И исследования в этом направлении продолжаются 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 NiFe/Bi/NiFe, 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 пермаллойвисмут (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 $t_{\rm Bi} \approx 15$ 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 $t_{\rm Bi}$ 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 $t_{\rm Bi} \approx 15$ 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 ~ 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 «Нанофизика и наноэлектроника». (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 (Ucraine, 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.).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования. Описана научная новизна работы и ее практическая значимость. Поставлены цель и задачи. Также приведен список публикаций с материалами, изложенными в работе.

В первой главе содержится краткий обзор литературы по теме работы. Описаны основные свойства висмута и особенности многослойных структур со слоями Ві. В имеющихся работах отмечается, что ферромагнитные металлы Со и Fe не образуют соединений с висмутом. Однако слоистую структуру получить не всегда легко. При больших скоростях напыления как на интерфейсе 3d-металл/висмут, так и на интерфейсе висмут/3d-металл образуется твердый раствор [2]. Пленочные образцы состава 3d-металл-Ві обладают большой анизотропией, связанной с наличием висмута [3], так же, как и в трехслойных пленках Fe/Bi/Fe [4, 5]. В структурах СоFe/Bi/Co и Со/Bi/Co обнаружен осциллирующий характер зависимости поля насыщения от толщины прослойки висмута [6, 7].

Во второй главе описаны методики получения и исследования пленок NiFe/Bi/NiFe, а также используемое оборудование.

Для исследования поверхности образцов применялся атомный силовой микроскоп Veeco MultiMode с программным обеспечением NanoScope SPM (разрешение ~ 0.3 нм, максимальная область сканирования 100×100 мкм).

Магнитостатические измерения были выполнены с помощью СКВИД-магнетометра MPMS-XL (чувствительность — 10^{-8} э.м.е., температурный диапазон T=2-400 K, диапазон магнитных полей H=0-50 кЭ).

Магниторезистивные исследования проводились на той же установке, но с использованием дополнительного оборудования (источника тока Keithley 2400 SourceMeter и нановольтметра Keithley 2182A). Сопротивление измерялось 4-зондовым методом.

Спектры магнитного резонанса были получены на ЭПР-спектрометре с постоянной частотой СВЧ-излучения $\omega_{\text{UHF}} = 26.7\ \Gamma\Gamma$ ц для трехслойных пленок и с частотой 9.2 $\Gamma\Gamma$ ц для двухслойных пленок.

Третья глава содержит результаты исследования трехслойных пленок NiFe/Bi/NiFe. Обнаружено влияние немагнитной прослойки на магнитные свойства пленочной структуры, а именно периодическое изменение поля насыщения в зависимости от толщины прослойки висмута. Период осцилляции по порядку величины соответствует результатам аналогичных исследований в Со-содержащих

многослойных пленках [6, 7]. Методом магнитного резонанса получены детальные сведения о межслоевом взаимодействии.

Основные сведения о полученных многослойных пленках представлены в первом разделе главы. 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 [8]. Рабочее давление $P \sim 10^{-5}$ торр. Технология нуждалась в отработке, поэтому 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.

Материалом магнитных слоев был пермаллой $Ni_{82}Fe_{18}$. Толщина слоев пермаллоя в образцах всех серий составляла 10 нм. Толщина полуметаллической прослойки висмута в трехслойных пленках в разных сериях менялась в пределах от 3 до 15 нм. В одном цикле возможно напыление нескольких образцов с различной толщиной висмута. 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).

С помощью атомно-силовой микроскопии получено изображение верхней поверхности пленок (рисунок 1, слева) и установлено, что максимальная шероховатость поверхности образца не превышает 2.5 нм (рисунок 1, справа). Это исключает вероятность прямого контакта ферромагнитных слоев при использовании данных толщин.

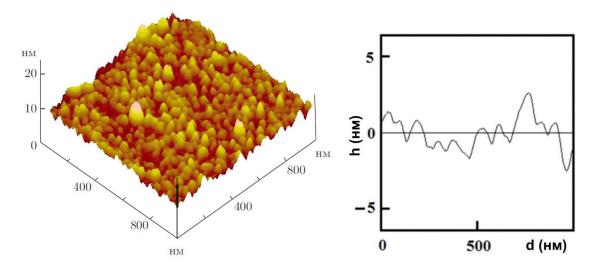


Рисунок 1 — Слева — ACM-изображение верхней поверхности пленки NiFe/Bi/NiFe с толщиной прослойки $t_{\rm Bi}$ = 4 нм. Справа — профиль этой поверхности в одном из разрезов

Второй раздел главы содержит анализ изменения магнитных свойств номинально чистых слоев пермаллоя в двухслойных структурах Bi/NiFe и NiFe/Bi ($t_{\text{NiFe}} \approx 10$ нм, $t_{\text{Bi}} \approx 15$ нм). Обнаружено, что от очередности нанесения магнитного и немагнитного слоев зависит форма петель намагничивания. Коэрцитивная сила для пленки NiFe/Bi меньше, чем для пленки Bi/NiFe (менее чем на 15 Э). Значения намагниченностей насыщения в пределах точности измерений совпадают.

Различие в коэрцитивной силе двухслойных структур Bi/NiFe и NiFe/Bi говорит о том, что, по-видимому, 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 были проведены магниторезонансные измерения.

На рисунке 2 приведены температурные зависимости резонансных полей для пленок Ві/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 $(\omega_1/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M)$, 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.

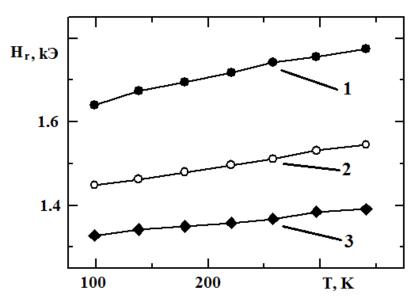


Рисунок 2 — Температурные зависимости резонансных полей для пленок. 1 - Bi/FeNi, 2 - FeNi/Bi, 3 - FeNi

Также установлено, что внутриплоскостная анизотропия в двухслойных структурах Bi/NiFe и NiFe/Bi не носит регулярного характера и разброс резонансных полей имеет малые величины.

В третьем разделе главы приведены результаты магнитостатических исследований. При изучении петель магнитного гистерезиса пленок NiFe/Bi/NiFe замечено, что присутствие слоя висмута изменяет как коэрцитивную силу, так и поле, при котором намагниченность достигает насыщения (рисунок 3).

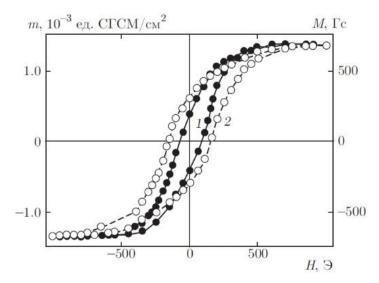


Рисунок 3 — Петли гистерезиса пленок NiFe/Bi/NiFe при $T=4.2~{\rm K}$: 1 — без прослойки висмута; 2 — с прослойкой висмута толщиной $t_{\rm Bi}=4~{\rm Hm}$. Левая шкала — магнитный момент m единицы поверхности, правая шкала — намагниченность M

Поле магнитного насыщения для исследованных пленок было определено с помощью схемы, изображенной на рисунке 4 (а). Кривая 1 соответствует той части кривой намагничивания, которая находится в правом верхнем квадранте полной петли гистерезиса, а кривая 2 — производной от кривой 1. Когда кривая намагниченности выходит на плато (истинное насыщение) или в случае затянутого «парапроцесса», на производной этому будет соответствовать прямая линия (не обязательно проходящая через нуль), параллельная оси абсцисс. Поле насыщения определялось как точка пересечения касательной к производной (штриховая линия) с продолжением этой прямой линии (сплошная).

Полученная из экспериментальных данных зависимость поля насыщения (H_s) от толщины прослойки оказалась периодической (выколотые точки на рисунке 4, б). 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 в приближении квантовой ямы (одномерного случая переноса заряда) для трехслойной структуры его зависимость от толщины t немагнитной прослойки можно записать как:

$$H_S = H_{S0} + B\sin(\alpha t + \varphi) / t^{\beta}, \tag{1}$$

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

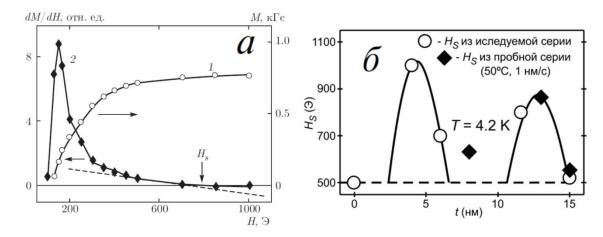


Рисунок 4 — Схема определения поля магнитного насыщения (а): 1 — восходящая часть кривой намагничивания; 2 — производная этого участка. Зависимость поля насыщения H_s от толщины немагнитной прослойки (б): Точки — экспериментальные значения, сплошная линия — кривая, полученная с помощью подгонки. Выколотые точки — исследуемая серия, черные ромбы — пленки из серии, полученной при температуре подложки 50 °C и скорости напыления 1 нм/с

Для образцов исследуемой серии при температуре 4.2 К кривая аппроксимации полученных ранее экспериментальных значений H_S описывается набором параметров: B=814, $\alpha=0.747$, $\varphi=4.507$, $\beta=0.304$, $H_{s0}=500$ Э. По результатам подгонки построена кривая на рисунке 4 (б). Точки, соответствующие полю насыщения пленок с толщиной прослойки 8, 13 и 15 нм из пробной серии, где напыление происходило при температуре подложки 50 °C со скоростью 1 нм/с, приблизительно ложатся на найденную при подгонке зависимость (рисунок 4, б).

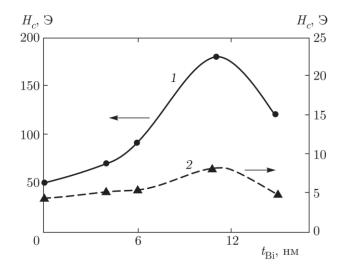
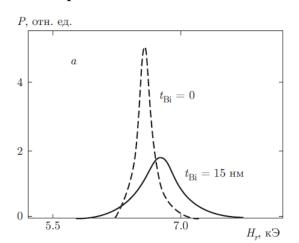


Рисунок 5 — Зависимости коэрцитивной силы H_c от толщины немагнитной прослойки в пленках NiFe/Bi/NiFe: 1-T=4.2 K; 2-T=300 K

Зависимость коэрцитивной силы от толщины прослойки является немонотонной. Для пленок NiFe/Bi/NiFe в исследуемом нами диапазоне наблюдается пик величины коэрцитивной силы при значении $t_{\rm Bi} = 11$ нм (рисунок 5). При высокой температуре различия в коэрцитивной силе для пленок с разной толщиной прослойки становятся менее заметны, однако характер зависимости остается прежним.

В четвертом разделе главы изложены результаты исследования пленок с помощью метода магнитного резонанса. 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 6, а). Для трехслойных пленок с толщинами прослойки висмута 4, 6 и 11 нм наблюдались резонансные спектры, состоящие из двух линий (рисунок 6, б). Это указывает на возможный антиферромагнитный характер межслоевого взаимодействия между слоями пермаллоя.



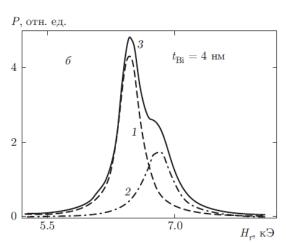


Рисунок 6 — Спектры магнитного резонанса при температуре 228 К для пленок NiFe/Bi/NiFe. (а) $-t_{\rm Bi}$ = 0 нм и 15 нм, (б) $-t_{\rm Bi}$ = 4 нм, кривые 1 и 2 — это низкополевая и высокополевая линии резонанса, соответственно

Были получены температурные зависимости резонансных полей, которые использовались в дальнейшем для установления температурных зависимостей поля анизотропии и обменного поля. На рисунке 7 представлены температурные зависимости резонансных полей для низкополевой и высокополевой мод колебаний. Видно, что зависимости низкополевых линий от температуры являются практически линейными, а высокополевые линии для пленок с $t_{\rm Bi}=4$, 6 нм в области $T\approx 200~{\rm K}$ имеют особенности.

По расположению низкополевых линий на рисунке 7 (а) 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.

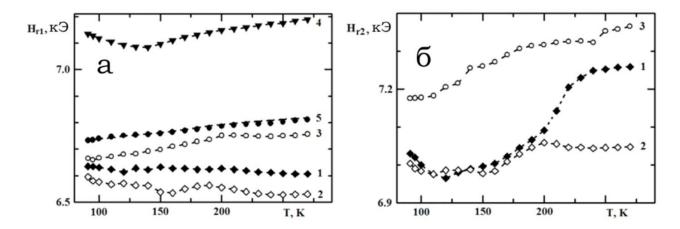


Рисунок 7 — Температурная зависимость резонансного поля для пленок NiFe/Bi/NiFe с толщиной прослойки 4, 6, 11, 15 и 0 нм (кривые 1, 2, 3, 4 и 5, соответственно). (а) — низкополевой пик, (б) — высокополевой пик

Анализ результатов магниторезонансных измерений приведен в пятом разделе третьей главы. Экспериментальные результаты были обработаны с помощью модели в рамках феноменологического подхода [9]. Использовано следующее выражение для свободной энергии, приходящейся на единицу площади:

$$E = E_I + E_Z + E_N + E_A.$$

Оно состоит из следующих вкладов:

- Обменная энергия $E_J = -J\cos(\varphi_1 \varphi_2)$,
- Энергия Зеемана $E_Z = -t_{FM} H \cdot (M_1 + M_2)$,
- Энергия анизотропии формы $E_N = 2\pi t_{\text{FM}} (M_{1z}^2 + M_{2z}^2)$,
- Энергия интерфейсной анизотропии $E_A = K_1 M_{1z}^2 + K_2 M_{2z}^2$.

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. $\varphi_I = \varphi_2 = \varphi_H$. Также следует полагать, что $t_{\text{FM}}HM$ >> J.

Предполагается, что ферромагнитные слои являются идентичными, поэтому считаем равными модули векторов M_1 и M_2 . Это справедливо с учетом того, что намагниченности насыщения всех пленок серии оказались практически одинаковыми. 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:

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

$$(\omega_2/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M) + 2(2H + H_A + H_M)H_E + 4H_E^2,$$
(3)

где введены следующие обозначения:

 $H_M = 4\pi M$ — поле, связанное с намагниченностью, $H_A = 2K/t_{\rm FM}M$ — поле анизотропии, $H_E = J/t_{\rm FM}M$ — поле межслоевого обменного взаимодействия.

С помощью известных из эксперимента данных (резонансные поля, частоты резонанса, намагниченности насыщения и толщины ферромагнитных слоев) можно найти константы межслоевого взаимодействия и интерфейсной анизотропии J и K. Для начала проведена подгонка для контрольного образца при нулевой анизотропии ($H_A \approx 0$). Найденная таким образом кривая с высокой точностью проходит через экспериментальные точки (кривая 5 на рисунке 8).

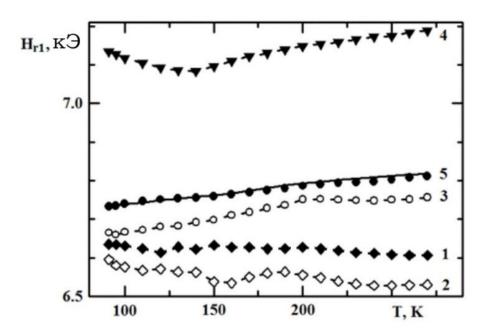


Рисунок 8 — Температурная зависимость низкополевого пика резонансного поля в пленках FeNi/Bi/FeNi. Кривые 1–5 — соответственно $t_{\rm Bi}$ = 4, 6, 11, 15, 0 нм. Сплошная линия 5 — расчет по формуле (2) при H_A = 0

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 4 видно, что поле насыщения образца с $t_{\rm Bi}=15$ 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 [10]. Причем величина интерфейсного вклада может быть сравнима с величиной анизотропии магнитного материала. Таким образом, в нашем случае пик на рисунке 6, относящийся к пленке с толщиной прослойки $t_{\rm Bi} = 15$ нм, соответствует вырожденным резонансам каждого из ферромагнитных слоев, а кривая 4 на рисунке 8 соответствует отрицательной интерфейсной анизотропии.

В случае образцов с висмутовой прослойкой толщиной 4, 6 и 11 нм имеются два пика. Один из них описывается уравнением (2) и принят за «акустическую» моду колебаний. Второй пик описывается уравнением (3), 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 8 и выражения (2) 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 $t_{\rm Bi}=4,\,6,\,11$ нм представлены на рисунке 9. Видно, что величина поля магнитной анизотропии H_A меняется немонотонно в зависимости от толщины немагнитной прослойки. Величина H_A для пленки с $t_{\rm Bi}=4$ нм меньше, чем для пленки с $t_{\rm Bi}=6$ нм, но больше чем для пленки с $t_{\rm Bi}=11$ нм. Поле анизотропии пленки с прослойкой 15 нм имеет

противоположный знак и больше всех остальных по абсолютной величине. Для образцов с толщиной прослойки 4 и 6 нм отмечен интересный факт: рост величины анизотропии при повышении температуры.

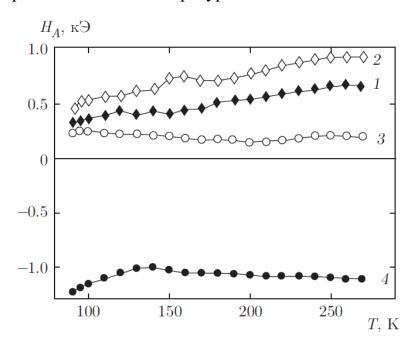


Рисунок 9 — Температурные зависимости поля анизотропии для пленок FeNi/Bi/FeNi: $t_{Bi} = 4$ нм (1), 6 нм (2), 11 нм (3), 15 нм (4)

С учетом полученных значений интерфейсной анизотропии для пленок с $t_{\rm Bi}$ = 4, 6, 11 нм по формуле (3) были рассчитаны значения обменных полей H_E (рисунок 10), ответственных за межслоевое взаимодействие. Во-первых, для использованных значений H_A знак межслоевого взаимодействия соответствует антиферромагнитному взаимодействию. Во-вторых, как видно на рисунке 10, по мере увеличения температуры абсолютная величина обменного поля растет.

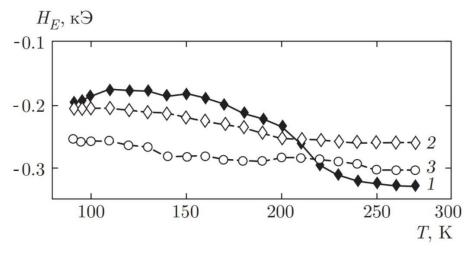


Рисунок 10 — Температурные зависимости обменного поля для пленок FeNi/Bi/FeNi: $t_{Bi} = 4$ нм (1), 6 нм (2), 11 нм (3)

В шестом разделе главы описаны магнитотранспортные свойства пленок NiFe/Bi/NiFe. Было обнаружено, что для контрольной пленки без висмута зависимость сопротивления от приложенного поля ничтожно мала и не достигает десятых долей процента. Но для трехслойных пленок с промежуточным слоем Ві при низких температурах наблюдался эффект магнитосопротивления, более значимый чем в одном слое пермаллоя. Примеры характерных зависимостей приведены на рисунке 11. Максимальная величина эффекта составила около 1,5 %.

Как было сказано ранее, при напылении слоя висмута и другого магнитоактивного материала на интерфейсе формируется слой, состоящий их наноразмерных гранул магнитоактивного материала, погруженных в слое висмута. Поэтому столь небольшая величина эффекта связывается нами с рассеянием электронов на этих магнитных гранулах, в результате чего происходит потеря спиновой поляризация электронов проводимости. При протекании электронов по второму магнитоактивному слою степень поляризации значительно утеряна, что и определяет величину эффекта магнитосопротивления.

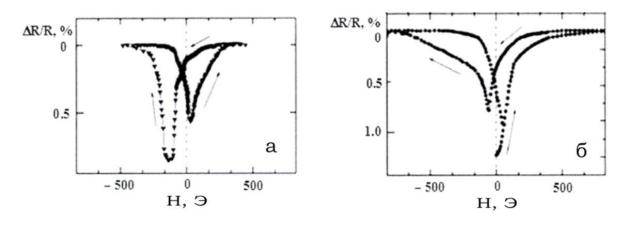


Рисунок 11 — Магнитосопротивление пленок NiFe/Bi/NiFe при температуре 30 К. (а) — пленка с толщиной прослойки 6 нм, (б) — толщиной 14 нм

В заключении сформулированы основные выводы данной 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 NiFe/Bi/NiFe магнитостатических исследованиях пленок обнаружено, что зависимость поля насыщения от $t_{\rm Bi}$ является осциллирующей с периодом осцилляций 8 нм, ЧТО заметно превышает период осцилляций обмена межслоевого ДЛЯ пленок немагнитными металлическими c 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

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК и приравненных к ним:

- 1. 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. Стр. 205-207.
- 2. 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. 439-442.
- 3. 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. Стр. 48-54.
- 4. 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. -T. 151, В. 5. Стр. 919-923.

Публикации в других изданиях

1. 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 «Нанофизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, Россия. 2011. Т. 1. Стр. 81-82.
- 2. 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.
- 3. 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.
- 4. Patrin, K.G. Magnetoresistive properties of NiFe/Bi/NiFe films / K.G. Patrin, V.Yu. Yakovchuk, G.S. Patrin, S.A. Yarikov // Abstracts. International Conference "Functional Materials". Ucraine, Crimea, Partenit. 2011.
- 5. Patrin, K.G. Magnetism and magnetoresistance in NiFe/Bi/NiFe Films / K.G. Patrin, V.Yu. Yakovchuk, G.S. Patrin, S.A. Yarikov // Book of Abstracts. Moscow International Symposium on Magnetism. Moscow, Russia. 2011. P. 105.
- 6. Яриков, С.А. Взаимодействие между магнитными слоями через полуметаллическую прослойку в системе FeNi/Bi/FeNi / С.А. Яриков // Сборник тезисов, материалы Девятнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-19). Архангельск, Россия. 2013. Стр. 153-154.
- 7. 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 «Нанофизика и наноэлектроника». Россия, Нижний Новгород. 2016. Т. 1. Стр. 240-241.
- 8. 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.
- 9. Патрин, К.Г. Магниторезонансные исследования межслоевых взаимодействий в пленках FeNi/Bi/FeNi / К.Г. Патрин, С.А. Яриков, В.Ю. Яковчук, Г.С. Патрин, В.Г. Плеханов // Труды 19-го Международного симпозиума «Упорядочение в минералах и сплавах». Россия, Ростов-на-Дону пос. Южный. 2016.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Patrin, G.S. Magnetism of multilayer films in transition metal/semiconductor system / G.S. Patrin and V.O. Vas'kovskii // Phys. Met. Metallogr. 2006. Vol. 101, Suppl. 1. P. S63–S66.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Johnson, M.T. Magnetic anisotropy in metallic multilayers / M.T. Johnson, P.J.H. Bloemen, F.J.A. den Broeder and J.J. de Vries // Rep. Prog. Phys. 1996. Vol. 59. P. 1409–1458.