На правах рукописи

Jung)

### 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

Красноярск – 2019

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: <u>660036</u> г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38.

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

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 003.075.01 доктор физико-математических наук

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 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-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:

- Результаты магнитостатических исследований трехслойных пленок NiFe/Bi/NiFe, где получена осциллирующая зависимость поля насыщения от t<sub>Bi</sub> с периодом осцилляций 8 нм, что заметно превышает период осцилляций межслоевого обмена для пленок с немагнитными металлическими и полупроводниковыми прослойками.
- 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<sub>Bi</sub> ≈ 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 3dметалл/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 Co/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 100х100 мкм).

Магнитостатические измерения были выполнены с помощью СКВИДмагнетометра 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  $\omega_{UHF} = 26.7 \Gamma \Gamma_{II}$  для трехслойных пленок и с частотой 9.2 ГГ 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 – АСМ-изображение верхней поверхности пленки NiFe/Bi/NiFe с толщиной прослойки *t*<sub>Bi</sub> = 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 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  $(\omega_1/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M)$ , 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 К: 1 – без прослойки висмута; 2 – с прослойкой висмута толщиной *t*<sub>Bi</sub> = 4 нм. 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:

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

где  $H_{S0}$  – поле насыщения контрольной пленки (толщина прослойки  $t_{Bi} = 0$ ), 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<sub>c</sub>* 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  $t_{Bi} = 11$  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. (a)  $-t_{\rm Bi} = 0$  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  $T \approx 200$  К 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:

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

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.  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_H$ . 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<sub>i</sub>* = *K*.

С учетом перечисленных условий резонансные частоты даются выражениями:

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

$$(\omega_2/\gamma)^2 = H(H + H_A + H_M) + 2(2H + H_A + H_M) H_E + 4 H_E^2,$$
(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  $t_{Bi} = 4, 6, 11, 15, 0$  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 полуметаллическую прослойку. В таком случае кривая слоями через 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  $t_{Bi} = 15$  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  $t_{Bi} = 4$ , 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  $t_{Bi} = 4$  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. 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*<sub>Bi</sub> = 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 (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*<sub>Bi</sub> = 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 Bi 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<sub>Bi</sub> является осциллирующей с периодом осцилляций 8 нм, ЧТО заметно превышает период осцилляций обмена межслоевого для пленок немагнитными металлическими с 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*<sub>Bi</sub> = 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.

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. – Т. 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.

 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. – Р. 503.
 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.