

На правах рукописи

Банникова Наталья Сергеевна

**СТРУКТУРНЫЕ, МАГНИТНЫЕ И
МАГНИТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХРЕШЁТОК
НА ОСНОВЕ МЕДИ И СПЛАВОВ 3-d МЕТАЛЛОВ**

01.04.11 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН).

Научный руководитель:

Миляев Михаил Анатольевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрических явлений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Официальные оппоненты:

Овчинников Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией пучковых воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург)

Балымов Константин Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела магнетизма твердых тел НИИ ФПМ Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург)

Ведущая организация:

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (г. Красноярск)

Защита состоится «16» декабря 2016 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 004.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН) по адресу: 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФМ УрО РАН и на сайте www.imp.uran.ru

Автореферат разослан « » ноября 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 004.003.01
доктор физико-математических наук

Чарикова Т. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Магнитные металлические сверхрешётки, обладающие гигантским магниторезистивным эффектом (ГМР-эффектом), являются искусственными многослойными наноматериалами и относятся к объектам металлической спинтроники, синтез и активные исследования которых продолжаются уже около 30 лет [1-3].

Интерес к изучению таких наноматериалов сохраняется и в настоящее время благодаря в первую очередь двум причинам. Первая связана с возможностью значительного изменения их функциональных характеристик с помощью выбора технологических режимов приготовления, путём вариации композиции наноструктуры или с помощью внешних воздействий, что обеспечивает разнообразие их физических свойств, представляющих интерес для фундаментальных исследований. Второй причиной является возможность использования магниточувствительных наноструктур в широком спектре практических приложений, в составе сенсорных элементов и для разработки новых изделий микроэлектроники и спинтроники. Следует отметить, что в сравнении с другими активно исследуемыми магниточувствительными наноматериалами (спиновыми клапанами и спинтуннельными наноструктурами) магнитные металлические сверхрешётки отличаются более простой технологией изготовления и не содержат слои антиферромагнитных материалов, используемых для создания наведённой анизотропии в соседнем ферромагнитном слое. При этом они могут обладать высокой температурной стабильностью в сочетании с величиной магнитосопротивления в десятки процентов при комнатной температуре. В связи с этим исследование различных типов сверхрешёток с ГМР-эффектом является актуальной задачей. На основе результатов исследований, выявляющих эффективные способы изменения магниторезистивных свойств сверхрешёток, могут быть предложены научно-обоснованные подходы для оптимизации их функциональных характеристик.

Физические свойства магнитных сверхрешёток в значительной степени зависят от технологии их приготовления. На важность технологических факторов указывает существенное отличие физических свойств аналогичных по составу сверхрешёток, приготовленных в различных зарубежных и отечественных исследовательских лабораториях. Это обстоятельство указывает на необходимость доведения лабораторной технологии до уровня, позволяющего воспроизводимо получать модельные наноструктуры с ГМР-эффектом и характеристиками, сравнимыми с лучшими зарубежными аналогами. Для этих целей могут быть использованы, например, сверхрешётки Co/Cu, в которых ранее были получены наибольшие значения магнитосопротивления.

Для создания многослойных сверхрешёток – системы чередующихся магнитных и немагнитных слоёв, напылённых на подложку, выделяют такие металлы как медь, используемую в качестве немагнитной прослойки, и

некоторые 3-d металлы и их сплавы, используемые в качестве ферромагнитного слоя. К ним относятся, например, Co, Fe, двойные сплавы Co-Fe и тройные сплавы Ni-Fe-Co с различным содержанием отдельных компонентов. Несмотря на схожие составы сверхрешёток, путём изменения толщин слоёв, в них могут быть сформированы различные типы кристаллической структуры слоёв и интерфейсов. Реализованы разнообразные типы магнитного упорядочения как внутри магнитных слоёв, так и между соседними магнитными слоями, что создает основу для поиска новых физических эффектов и подходов для оптимизации их практически значимых свойств.

Одним из активно используемых подходов в задачах оптимизации функциональных характеристик многослойных наноматериалов является выбор эффективного материала буферного слоя, обуславливающего формирование в последующих слоях сверхрешётки совершенной кристаллической структуры и формирование нужной текстуры. Свойства напылённого на аморфную подложку буферного слоя в значительной степени влияют на такие характеристики сверхрешёток как: величина магнитосопротивления, ширина петли магнитного гистерезиса, чувствительность к магнитному полю и температурная стабильность.

В связи с этим, задача по поиску и использованию новых вариантов буферных слоёв для известных типов сверхрешёток с ГМР-эффектом также является актуальной. Следует отметить, что в имеющихся литературных данных отсутствует детальная информация об исследованиях зависимостей физических свойств сверхрешёток от систематически изменяемой толщины различных буферных слоёв. Получение данной информации является одной из задач данной диссертационной работы.

На основе разработанного магниточувствительного материала литографическими методами изготавливаются конкретные изделия микроэлектроники. Их надёжная работа зависит от устойчивости магниторезистивных характеристик сверхрешёток к температурам из интервала 200-360 °С в течение короткого времени и к температурам 150-200 °С при длительном воздействии [3]. Чтобы определить температурный интервал устойчивости функциональных характеристик сверхрешёток, проведены исследования изменения магнитосопротивления, гистерезиса магнитосопротивления и микроструктуры сверхрешёток в зависимости от температуры отжига и его длительности.

Цель диссертационной работы – установление физических закономерностей влияния различных буферных слоёв на структурные, магнитные и магнитотранспортные свойства сверхрешёток на основе меди и сплавов 3-d металлов для получения материалов с большими значениями магнитосопротивления в сочетании с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом.

Основные задачи работы.

1. Разработать технологию получения многослойных наноструктур с гигантским магниторезистивным эффектом при использовании метода магнетронного напыления.
2. Изучить влияние материала подложки, толщины буферного слоя из Cr, Fe, $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ и немагнитного сплава $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ на кристаллическую структуру, магниторезистивные свойства и ширину петли гистерезиса сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$.
3. Исследовать температурную стабильность магниторезистивных характеристик и ширины петли гистерезиса сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ с различным буферным слоем.
4. Изучить возможность получения высокой магниторезистивной чувствительности и слабого гистерезиса в сверхрешётках $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$ и $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$, приготовленных на составном буферном слое $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$.

Научная новизна.

1. Проведены систематические исследования влияния различных типов материалов, используемых в качестве буферного слоя, на структурные и магниторезистивные свойства четырех типов магнитных металлических сверхрешёток: Co/Cu, $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$, $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$ и $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$. Впервые показано, что изменения толщины буферного слоя в несколько атомных монослоёв, могут приводить к смене типа кристаллической структуры в слоях сверхрешётки и к кардинальному изменению магнитных и магниторезистивных свойств.
2. Показана эффективность использования немагнитного сплава $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ в качестве материала буферного слоя, позволяющего получать высокие значения магнитосопротивления, в сверхрешётках $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$, $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$ и $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$ при малом числе пар ферромагнитных слоёв и меди ($n = 8-10$).
3. Предложен способ уменьшения гистерезиса магнитосопротивления и повышения магниторезистивной чувствительности сверхрешёток $\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}$ и $\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}$, основанный на использовании составного буферного слоя $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$. Показано, что добавление подслоя Ta приводит к формированию в последующих слоях сверхрешётки острой аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$.

Практическая значимость работы. Разработана технология изготовления магнитных металлических сверхрешёток с высокими значениями магнитосопротивления, которые являются перспективными для практических приложений. Оптимизация процесса изготовления позволила получить сверхрешётки Co/Cu и $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ с величинами магнитосопротивления до 54 % при комнатной температуре.

В сверхрешётках $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$ и $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$ при использовании составного буферного слоя $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ получено сочетание высокой магниторезистивной чувствительности (0.1-0.3) %/Э, больших значений магнитосопротивления (12-16) % и относительно малого гистерезиса (≤ 10 Э) при комнатной температуре. Разработанные магниточувствительные материалы, приготовленные на кремниевых пластинах диаметром 100 мм, используются как для создания новых высокочувствительных сенсоров, так и могут быть применены в уже работающих магнито-измерительных устройствах.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Показано, что в сверхрешётках $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ использование хрома в качестве буферного слоя приводит к резкому, более чем на порядок величины, усилению магнитного гистерезиса при изменении толщины слоя Cr в интервале от 15 до 20 Å. Такой эффект обусловлен исчезновением аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$ в слоях сверхрешётки.
2. Определен интервал температурной стабильности магниторезистивных характеристик сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ с использованием отжига при различных температурах длительностью в один час. Показано, что максимальная температура, до которой не изменяется величина магнитосопротивления, зависит от толщины и материала буферного слоя.
3. Установлено, что отжиг сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ с различными толщинами буферного слоя $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ при температурах ниже 370°C позволяет увеличить магнитосопротивление. При температурах выше 370°C начинается перемешивание слоёв, сопровождаемое уменьшением магнитосопротивления и увеличением коэрцитивной силы. При увеличении температур отжига повышается степень совершенства аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$ в слоях сверхрешётки.
4. Впервые показано, что использование буферного слоя из немагнитного сплава $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ приводит к формированию в последующих слоях сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ более совершенной кристаллической структуры по сравнению со сверхрешётками с буферными слоями Cr, Fe или $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$. В оптимизированных сверхрешётках $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_{16}$ получено значение магнитосопротивления 54 % при комнатной температуре. При увеличении толщины буферного слоя возникает коническая текстура $\langle 111 \rangle$, что сопровождается увеличением ширины петли гистерезиса.
5. Для сверхрешёток $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$ и $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$ показано, что использование составного буферного слоя $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ приводит к существенному, в 3–5 раз, уменьшению ширины петли гистерезиса в сравнении с аналогичными сверхрешётками, но с буферным слоем $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$. Этот эффект связан с формированием в слоях сверхрешётки острой аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$. Для сверхрешёток

$[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$ получены высокие значения магниторезистивной чувствительности до 0.3%/Э.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается сертифицированными методиками изготовления образцов и измерения их свойств. В работе используется сертифицированное фирмой-производителем оборудование и установки, прошедшие метрологический контроль в ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия).

Высоковакуумная магнетронная установка MPS-4000-C6 (Ulvac) для синтеза многослойных магнитных наноструктур позволяет напылять слои материала номинальной толщины с точностью до 0.1 Å. Калибровка скоростей напыления материалов по измерению толщины плёнки и определение шероховатости поверхности подложек осуществлялась методом бесконтактной интерферометрии при помощи интерферометра белого света Zygo NewView 7300. Независимый контроль толщины напыляемых слоёв производился методом малоугловой рентгеновской дифракции по измерению периода многослойной наноструктуры.

Элементный состав контролировался при помощи энерго-дисперсионного рентгеновского спектрометра GENESIS APEX 2 EDS с системой APOLLO X SDD на растровом сканирующем электронном микроскопе Inspect F (FEI Company) с полевым автоэмиссионным катодом. Заданный элементный состав магнетронных мишеней гарантировали сертификаты качества от производителя.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: IV, VI Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism: Nanospintronics» (г. Екатеринбург, 28 июня-2 июля, 2010; г. Красноярск, 15-19 августа, 2016); Moscow International Symposium on Magnetism (г. Москва, 21 – 25 августа, 2011); XV Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (г. Нижний Новгород, 14-18 марта 2011 г); XI, XII, XIII и XIV Всероссийская молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (г. Екатеринбург, ноябрь, 2010, 2011, 2012, 2013); 8-th International Symposium on Metallic Multilayers (Kyoto, 19-24 мая, 2013); XIII Международная конференция Дислокационная структура и механические свойства металлов и сплавов (г. Екатеринбург, 7-11 сентября, 2014); International Workshop on Magnonics (Seeon Abbey, 2-6 августа, 2015).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 18 печатных работах. Из них входят в Перечень ВАК – 5 статей, опубликованных в рецензируемых журналах и индексируемых системой цитирования Web of Science. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Постановка задач исследования проводилась Н.С. Банниковой совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. М.А. Миляевым. Автором лично проведено исследование корреляции между структурой и магнитным гистерезисом сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$, напыленных на буферный слой пермаллой-хром. Лично Н.С. Банниковой методом магнетронного напыления изготовлен ряд экспериментальных образцов $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ и $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}/[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ (глава 3, глава 4). Совместно с В.В. Проглядо и к.ф.-м.н. Л.И. Наумовой изготовлены серии образцов $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$, $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_n$ и $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$ (глава 5, глава 6). Термомагнитная обработка образцов (глава 5) и все измерения магнитосопротивления проведены Н.С. Банниковой. Магнитные измерения выполнены Н.С. Банниковой при частичной помощи Т.А. Чернышовой. Исследования микроструктуры методами рентгеновской дифракции проведены к.ф.-м.н. Л.И. Наумовой. Исследования микроструктуры методами просвечивающей электронной микроскопии проведены к.т.н. Т.П. Кринициной.

Результаты исследований неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях. Обсуждение полученных результатов и подготовку публикаций Н.С. Банникова проводила совместно с академиком РАН В.В. Устиновым, к.ф.-м.н. М.А. Миляевым и к.ф.-м.н. Л.И. Наумовой.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 3. «Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств» и содержит исследования общезначимого характера по пункту 5. «Разработка различных магнитных материалов, технологических приёмов, направленных на улучшение их характеристик, приборов и устройств, основанных на использовании магнитных явлений и материалов» паспорта специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка работ автора, списка используемой литературы. Общий объём диссертации составляет 132 страницы, включая 5 таблиц и 72 рисунка. Список используемой литературы включает 75 наименований на 7 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена новизна и показана практическая значимость работы. Описаны основные защищаемые положения и структура диссертации.

В первой главе описаны основные виды магниторезистивных эффектов, определяющие магнитотранспортные свойства ультратонких плёнок с чередующимися ферромагнитными и немагнитными слоями, подробно рассмотрены различные виды взаимодействий между ферромагнитными слоями в многослойных пленках. Кратко описываются физические причины, объясняющие феномен гигантского магнитосопротивления. Приводится краткое изложение основных книг, обзорных и экспериментальных статей, посвященных физическим принципам, объясняющим магнитные и транспортные свойства сверхрешёток, а так же способам получения наноструктур. Проанализированы известные из литературы, данные о корреляции между микроструктурой слоев и магниторезистивными свойствами сверхрешёток.

Во второй главе даётся обзор основных экспериментальных методик и оборудования. Описывается лабораторная технология синтеза многослойных магнитных наноструктур на высоковакуумной магнетронной установке. Технология включает в себя предварительные операции: подготовку поверхности подложек, калибровку скоростей напыления материалов и определение шероховатости поверхности подложек и полученных плёнок. Освещаются основные методы измерений: магнитных и транспортных свойств на вибрационном магнитометре АВМ-1 и установке RTF-1, а также проводится изучение структуры методами рентгеновской дифракции на дифрактометрах ДРОН-3М и Empyrean. Данные об элементном составе, микроструктуре и морфологии поверхности плёночных образцов получены с использованием трёх типов микроскопов: растрового электронного, просвечивающего электронного и атомно-силового.

В третьей главе излагается отработка лабораторного магнетронного напыления многослойных наногетероструктур, на примере изготовления сверхрешёток Co/Cu. Сверхрешётки Co/Cu имеют простую композицию и являются наиболее исследуемой модельной наноструктурой. Существует большое число публикаций, посвящённых Co/Cu, однако, в литературе имеется весьма ограниченное количество работ, в которых получены наибольшие значения магнитосопротивления для этой системы. Поэтому сверхрешётки Co/Cu были выбраны для отработки воспроизводимой технологии получения сверхрешёток с ГМР-эффектом при помощи метода магнетронного напыления.

Проведённый поиск оптимальных параметров роста сверхрешёток, оптимизация толщин слоёв и количества пар Co/Cu позволили получить для данного типа сверхрешёток значения магнитосопротивления около 50 % при комнатной температуре, что сравнимо с лучшими зарубежными аналогами.

Следовательно, разработанная лабораторная технология магнетронного напыления может быть применена для изготовления магнитных металлических сверхрешёток другого типа.

В четвертой главе исследуются зависимости структурных, магнитных и магниторезистивных свойств (рис. 1) сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ от типа подложки, материала и толщины буферного слоя (Cr, Fe, Cu, $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$). Определяются оптимальные значения толщин слоев для получения наибольшего значения магнитосопротивления при слабом гистерезисе.

Величина магнитосопротивления $(\Delta R/R)_{\max}$ в данной работе определялась как максимальное значение магнитосопротивления на зависимости магнитосопротивления от магнитного поля $\Delta R/R(H) = [(R(H) - R_s)/R_s] \times 100\%$, где R_s – сопротивление в поле магнитного насыщения. В качестве величины, характеризующей гистерезис, выбрано значение напряженности магнитного поля H_{\max} , соответствующее $(\Delta R/R)_{\max}$. Поле H_{\max} близко или совпадает со значением коэрцитивной силы, определенной по петле магнитного гистерезиса.

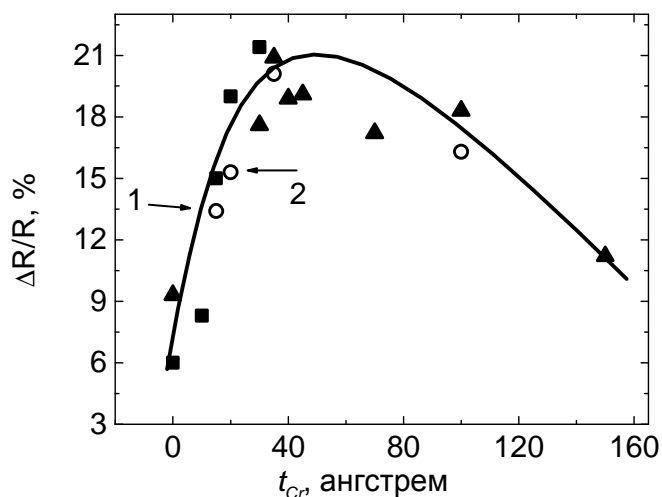


Рис. 1. Зависимость $(\Delta R/R)_{\max}$ от толщины буферного слоя хрома t_{Cr} сверхрешёток $\text{Cr}(t_{\text{Cr}})/[\text{CoFe}(15)/\text{Cu}(23)]_8$ для трех типов подложек: \blacktriangle – (100)Si, \blacksquare – Al_2O_3 , \bullet – стекло

В сверхрешётках $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ при использовании хрома в качестве буферного слоя обнаружено резкое, более чем на порядок величины, увеличение гистерезиса при субнанометровом изменении номинальной толщины слоя хрома (t_{Cr}) в интервале от 15 до 20 Å (рис. 2). Свойства образцов с толщинами буферного слоя $t_{\text{Cr}} = 15$ Å и 20 Å представляют особый интерес. На рис. 1 видно, что различие по величине магнитосопротивления небольшое и составляет 4 %. Результаты малоугловой рентгеновской дифракции для этих сверхрешёток также качественно не отличаются друг от друга, что указывает на отсутствие существенного различия в совершенстве межслойных границ. Главное и принципиальное отличие свойств данных образцов состоит в значительном (почти в 16 раз) изменении ширины петли гистерезиса (рис. 2). Причиной этого является исчезновение текстуры $\langle 111 \rangle$ в слоях сверхрешётки, происходящее при увеличении толщины буферного слоя от $t_{\text{Cr}} = 15$ Å до 20 Å.

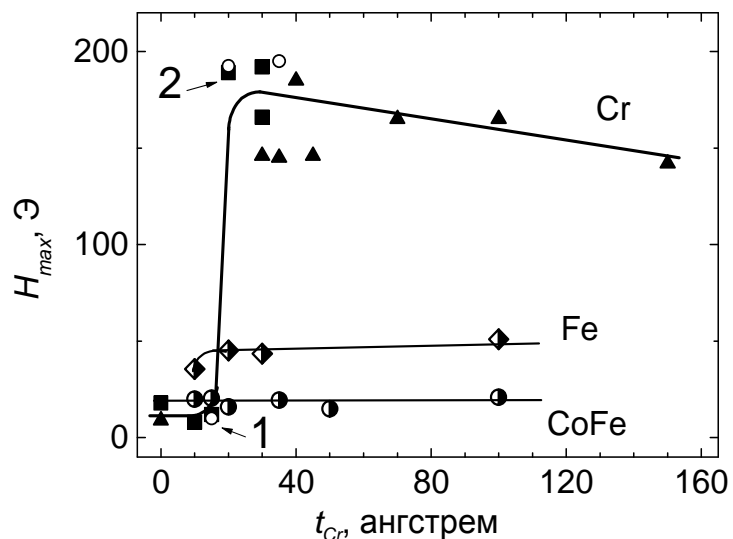


Рис. 2. Зависимость поля H_{\max} от толщины буферных слоёв Cr, $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$, Fe сверхрешёток $[\text{CoFe}(15 \text{ \AA})/\text{Cu}(23 \text{ \AA})]_8$, точка 1 - $t_{\text{Cr}} = 15 \text{ \AA}$, точка 2 - $t_{\text{Cr}} = 20 \text{ \AA}$. Материал подложки: \blacktriangle – (100)Si, \blacksquare – Al_2O_3 , \bullet – стекло. Материал буферного слоя указан

Изменения гистерезиса магнитосопротивления сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ при увеличении толщины буферного слоя показаны на рис. 2. В сверхрешётках с буферным слоем $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ эффект исчезновения текстуры $\langle 111 \rangle$ при $t_{\text{CoFe}} \geq 35 \text{ \AA}$ не сопровождается резким изменением магнитного гистерезиса. Использование сплава $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ в качестве буферного слоя приводит к повышению магниторезистивной чувствительности исследованных сверхрешёток без существенного увеличения гистерезиса. Для образцов, напылённых на буферном слое Fe, наличия текстуры $\langle 111 \rangle$ не обнаружено.

Использование буферного слоя пермаллой-хром состава $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ (обозначается как NiFeCr) приводит к формированию в последующих слоях сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ более совершенной кристаллической структуры по сравнению со сверхрешётками с буферными слоями Cr, Fe или $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$. Выявлена корреляция между изменением степени совершенства текстуры $\langle 111 \rangle$ в зависимости от толщины буферного слоя $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ (рис. 3, 4) и аналогичным нелинейным изменением гистерезиса магнитосопротивления. Резкое увеличение гистерезиса в сверхрешётках с буферным слоем NiFeCr при $t_{\text{NiFeCr}} > 70 \text{ \AA}$ сопровождается структурными изменениями в слоях сверхрешётки – аксиальная текстура $\langle 111 \rangle$ переходит в коническую текстуру.

Выявлено наличие текстуры $\langle 111 \rangle$ с высокой степенью совершенства и интенсивного брегговского рефлекса (111), превышающего на порядок величины интенсивность аналогичных рефлексов, измеренных для сверхрешёток с буферными слоями Cr или CoFe. Выраженная аксиальная текстура $\langle 111 \rangle$ сопутствует высокому значению магнитосопротивления и слабому гистерезису в сверхрешётках (рис. 3), однако наличие аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$ не является гарантией для получения высоких значений

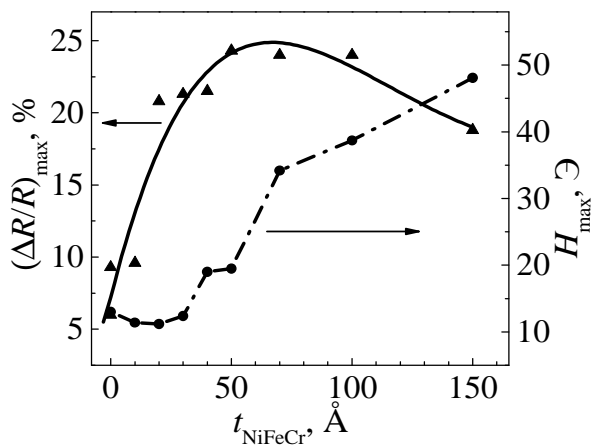


Рис. 3. Зависимость $(\Delta R/R)_{\max}$ и H_{\max} от толщины t_{NiFeCr} для образцов на стекле $\text{NiFeCr}(t_{\text{NiFeCr}})/[\text{CoFe}(14\text{\AA})/\text{Cu}(22\text{\AA})]_8$

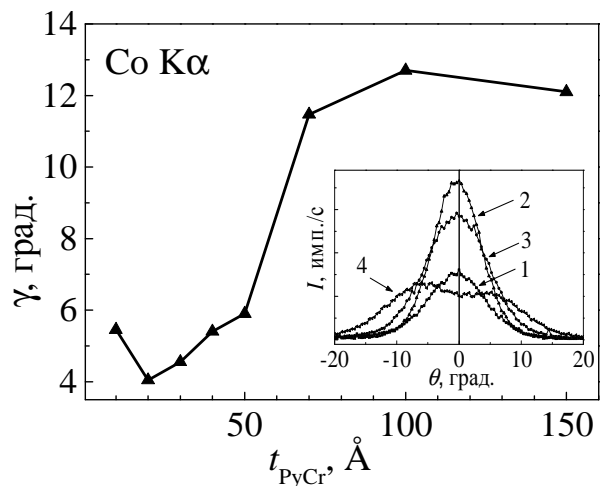


Рис. 4. Зависимость γ от толщины NiFeCr для стекло// $\text{NiFeCr}(t_{\text{NiFeCr}})/[\text{CoFe}(14\text{\AA})/\text{Cu}(22\text{\AA})]_8$. На вставке приведены кривые качания: $t_{\text{NiFeCr}} = 10\text{\AA}$ (1), $t_{\text{NiFeCr}} = 20\text{\AA}$ (2), $t_{\text{NiFeCr}} = 50\text{\AA}$ (3) и $t_{\text{NiFeCr}} = 150\text{\AA}$ (4)

магнитосопротивления. Подбором толщин слоёв, входящих в сверхрешётку $\text{NiFeCr}/[\text{CoFe}/\text{Cu}]_8$ получено значение ГМР-эффекта 54 % (рис. 5), близкое к наибольшим опубликованным значениям магнитосопротивления для сверхрешёток данного типа при комнатной температуре. При понижении температуры до 83 К эта величина возрастает до 95 %. При повышении температуры ГМР-эффект уменьшается, однако, и при $T = 373\text{ К}$ образец обладает высоким значением магнитосопротивления – $(\Delta R/R)_{\max} = 42\%$.

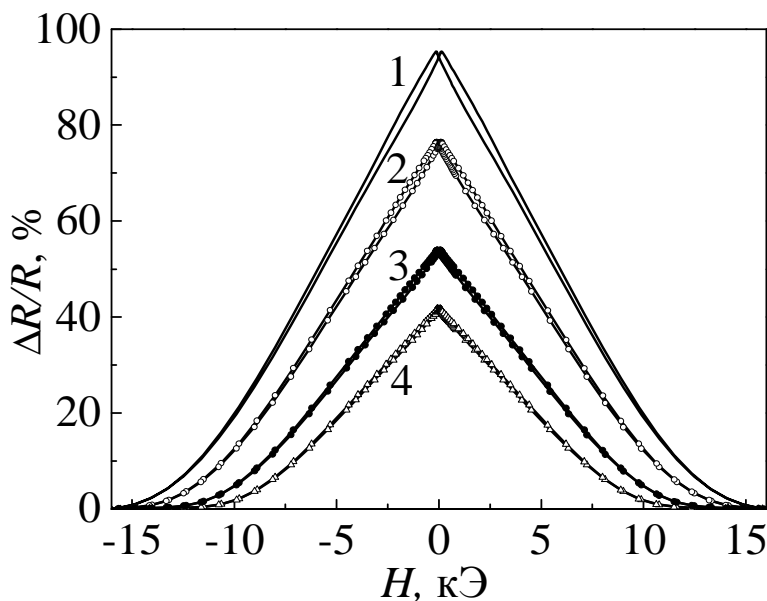


Рис. 5. Зависимости $\Delta R/R(H)$, измеренные при температурах: $T = 83\text{ К}$ (1), $T = 173\text{ К}$ (2), $T = 293\text{ К}$ (3), $T = 373\text{ К}$ (4). Стекло// $\text{NiFeCr}(50\text{\AA})/[\text{CoFe}(14\text{\AA})/\text{Cu}(9.5\text{\AA})]_{16}/\text{Cr}(20\text{\AA})$.

В пятой главе исследуется влияние отжига на структуру, магнитный гистерезис и магнитосопротивление сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}(15)/\text{Cu}(23)]_n$ с буферными слоями Cr и CoFe различной толщины. Установлены оптимальные температура и длительность отжига, приводящие к увеличению магнитосопротивления сверхрешёток. На основе полученных данных по рентгеновской рефлектометрии для отожженных сверхрешёток, и с использованием метода, описанного в [4, 5], получены численные значения эффективных коэффициентов межслойной диффузии, обусловленной термическим отжигом.

Определен интервал температурной стабильности магниторезистивных характеристик сверхрешёток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ с использованием отжига длительностью в один час, проведённого при различных температурах. Установлено, что оптимальные параметры отжига (температура и длительность), которые позволяют увеличить магнитосопротивление сверхрешётки, зависят не только от использованного материала буферного слоя, но также и от его толщины.

Для сверхрешёток $[\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}]_n$ с тонким буферным слоем Cr ($t_{\text{Cr}} < 15 \text{ \AA}$) использованные режимы отжига приводят к уменьшению магнитосопротивления и увеличению гистерезиса. Для сверхрешёток с толщинами буферного слоя $t_{\text{Cr}} \geq 20 \text{ \AA}$, соответствующими высококоэрцитивному состоянию, отжиг при температурах $330 - 350^\circ\text{C}$ в течение 1 часа приводит к уменьшению гистерезиса и увеличению магнитосопротивления. Наибольшей температурной стабильностью из исследованных серий обладают сверхрешётки с толщинами буферного слоя хрома $t_{\text{Cr}} \geq 20 \text{ \AA}$, для которых уменьшение магнитосопротивления не наблюдается при температурах отжига вплоть до 420°C .

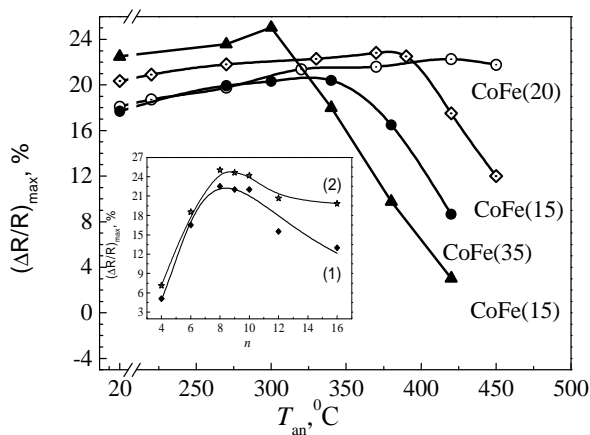


Рис. 6. Зависимости $(\Delta R/R)_{\text{max}}$ от температуры отжига для образцов $\text{CoFe}(t_{\text{CoFe}})/[\text{CoFe}/\text{Cu}]_8$, приготовленных на подложках из стекла – светлые символы и сапфира – тёмные символы. На вставке: зависимости $(\Delta R/R)_{\text{max}}$ от числа пар слоёв (n) в $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{CoFe}(15)/[\text{CoFe}/\text{Cu}]_n$ до отжига – (1) и после 2 ч. отжига при 300°C – (2)

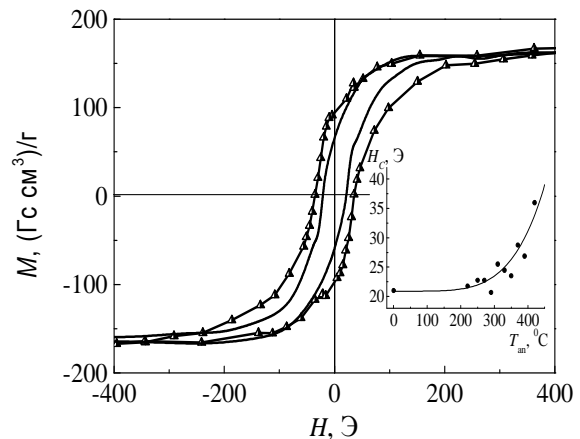


Рис. 7. Петли магнитного гистерезиса стекло//CoFe(15)/[CoFe/Cu]₈ до отжига (сплошная линия) и после отжига 1 час при 420°C (линия с треугольниками). На вставке – зависимость коэрцитивной силы от температуры отжига

Отжиг сверхрешёток с различными толщинами буферного слоя $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$ позволяет увеличить магнитосопротивление при неизменном гистерезисе (рис. 6). Однако существует критическая температура, при превышении которой результатом отжига будет уменьшение магнитосопротивления и увеличение ширины петли гистерезиса. Величина критической температуры отжига зависит от толщины буферного слоя и материала подложки. При сравнительно низких температурах отжига происходит улучшение качества межслойных границ и увеличение магнитосопротивления. При достижении критической температуры отжига наблюдается уменьшение магнитосопротивления и увеличение коэрцитивной силы (рис. 6, 7).

В шестой главе исследуются закономерности влияния буферного слоя $(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$ на микроструктуру и магниторезистивные характеристики обладающих гигантским магниторезистивным эффектом двух типов сверхрешёток $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}/\text{Cu}]_8$ и $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_8$, напыленных в магнитном поле, приложенном в плоскости слоёв 80 Э. Обсуждаются причины возникновения сильного или слабого гистерезиса в таких наноструктурах. Предлагается метод уменьшения гистерезиса магнитосопротивления для сверхрешёток путем использования составного буферного слоя $\text{Ta}/(\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20})_{60}\text{Cr}_{40}$.

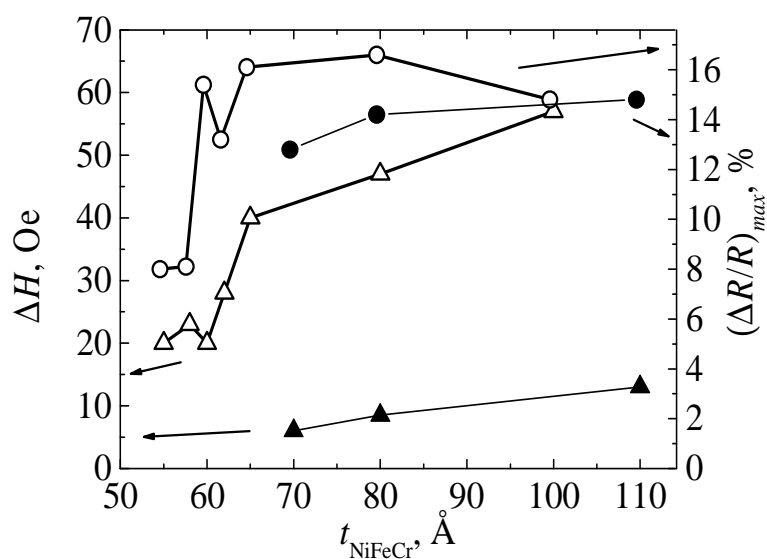


Рис. 8. Зависимость максимального магнитосопротивления (кружки) и ΔH (треугольники) от t_{NiFeCr} в сверхрешётках $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}(15\text{Å})/\text{Cu}(23\text{Å})]_8/\text{Ta}(50\text{Å})$ с буферным слоем $\text{NiFeCr}(t_{\text{NiFeCr}})$ (светлые символы) и $\text{Ta}(50)/\text{NiFeCr}(t_{\text{NiFeCr}})$ (темные символы)

Воспроизводимые значения максимального магнитосопротивления в 14-16 % получены для структур с буферным слоем толщиной $t_{\text{NiFeCr}} \geq 65 \text{Å}$. Использование буферных слоёв NiFeCr с толщинами ниже этого значения приводило к нестабильности величины максимального магнитосопротивления и, при дальнейшем уменьшении толщины NiFeCr , к

уменьшению ГМР-эффекта (рис. 8). Данные по рентгеновской рефлектометрии показывают, что уменьшение толщины буферного слоя приводит к снижению качества слоистой структуры из-за сильного влияния шероховатости подложек.

При $t_{\text{NiFeCr}} = 60 \text{ \AA}$ реализуется оптимальное для магниточувствительного материала сочетание слабого гистерезиса и высокого ГМР-эффекта. Однако, как видно из рис. 8, отклонение на несколько ангстрем от $t_{\text{NiFeCr}} = 60 \text{ \AA}$ в сторону уменьшения толщины приводит к снижению магнитосопротивления почти в два раза, а в сторону увеличения толщины – к резкому возрастанию ΔH .

При малых толщинах буферного слоя, $t_{\text{NiFeCr}} \leq 60 \text{ \AA}$, формируются сверхрешётки со слабым гистерезисом, а при больших, $t_{\text{NiFeCr}} \geq 65 \text{ \AA}$, – с сильным. Важно отметить, что двукратное увеличение ΔH происходит при малом (на 5 \AA) изменении толщины буферного слоя в сторону увеличения его толщины. Далее будем относить область $t_{\text{NiFeCr}} \leq 60 \text{ \AA}$ к «тонким» буферным слоям, а область толщин $t_{\text{NiFeCr}} \geq 65 \text{ \AA}$ – к «толстым».

Обнаружено резкое изменение магниторезистивных и гистерезисных свойств сверхрешёток $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}(15)/\text{Cu}(23)]_8$ при увеличении толщины буферного слоя NiFeCr. Причины изменения гистерезисных свойств были выяснены при проведении структурных исследований.

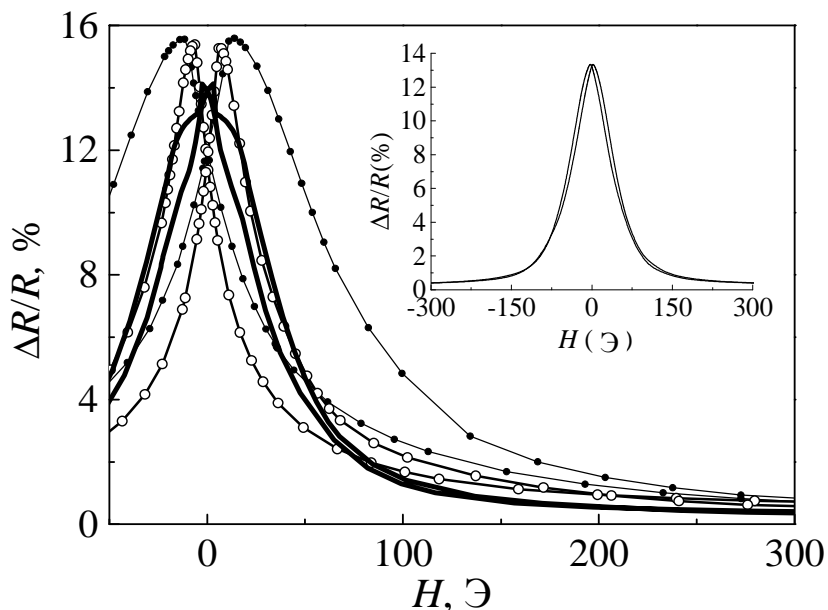


Рис. 9. Полевые зависимости $\Delta R/R$ для $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}(15 \text{ \AA})/\text{Cu}(23 \text{ \AA})]_8$, магнитное поле приложено вдоль оси легкого намагничивания, с буферным слоем NiFeCr(60 \AA) (светлые символы), NiFeCr(80 \AA) (тёмные символы) и Ta(50 \AA)/NiFeCr(80 \AA) (линия). На вставке – $\Delta R/R(H)$ для образца с буферным слоем Ta(50 \AA)/NiFeCr(80 \AA), магнитное поле приложено вдоль оси трудного намагничивания

Сверхрешётки обладают гранцентрированной (ГЦК) кубической структурой. В случае сверхрешёток с тонкими буферными слоями, $t_{\text{NiFeCr}} \leq 60 \text{ \AA}$, формируется острая аксиальная текстура с осью $\langle 111 \rangle$, перпендикулярной

плоскости плёнки. Менее совершенная текстура $\langle 111 \rangle$ формируется при напылении сверхрешётки на толстый буферный слой, $t_{\text{NiFeCr}} \geq 65 \text{ \AA}$. Обнаруженные два максимума на кривой качания являются следствием появления конической текстуры, когда направления $\langle 111 \rangle$ в кристаллитах отклонены от нормали к пленке на некоторый угол и суммарно образуют коническую поверхность.

Исследования текстуры позволяют предположить, что увеличение гистерезиса сверхрешёток связано со снижением совершенства аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$, которое происходит при увеличении толщины буферного слоя NiFeCr. Аналогичная корреляция между совершенством текстуры $\langle 111 \rangle$ и гистерезисом магнитосопротивления была выявлена для сверхрешёток NiFeCr/[CoFe/Cu]₈, что описано в главе 4.

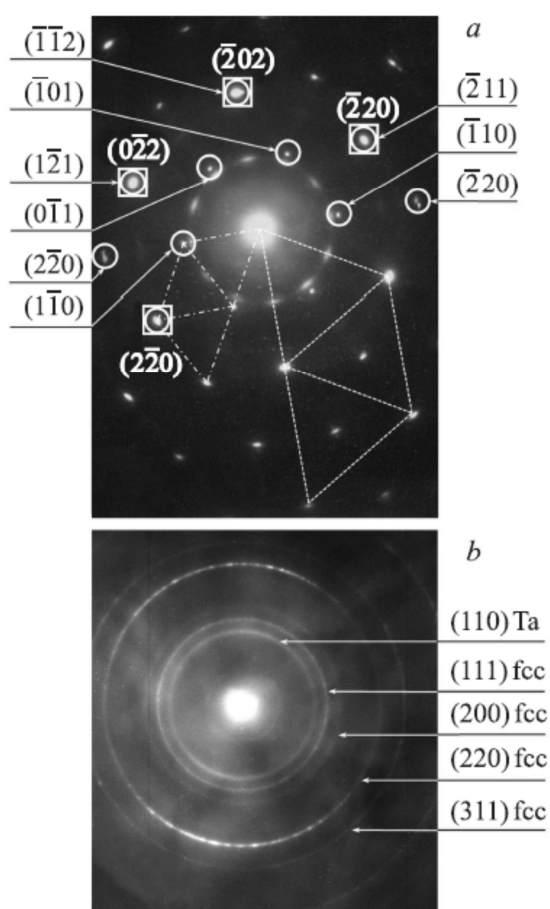


Рис. 10. Электронограммы для сверхрешёток $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}(15)/\text{Cu}(23)]_8$ с буферным слоем NiFeCr(65Å) – (a) и Ta(50Å)/NiFeCr(80Å) – (b).

величины ΔH от t_{NiFeCr} в составном буферном слое Ta(50Å)/NiFeCr. Видно, что использование подслоя Ta приводит к уменьшению ширины петли гистерезиса магнитосопротивления более чем в 5 раз при незначительном снижении величины ГМР-эффекта.

Как было показано выше, буферный слой NiFeCr, толщиной $t_{\text{NiFeCr}} \geq 65 \text{ \AA}$ приводит к формированию сверхрешёток с высокими значениями магнитосопротивления и с сильным гистерезисом (рис. 8). Отличается также и форма полевых зависимостей магнитосопротивления для сверхрешёток, приготовленных на тонком или толстом буферных слоях NiFeCr. На рис. 9 они отмечены светлыми и тёмными символами, соответственно. Видно, что при большой толщине буферного слоя величина магнитосопротивления выше, однако при этом ширина петли гистерезиса существенно возрастает с 20 до 47 Э.

Для повышения степени совершенства текстуры при сохранении большой толщины буферного слоя в его состав был добавлен подслой тантала. На рис. 8 тёмными символами показаны зависимости магнитосопротивления и

На рис. 9 линией показана полевая зависимость магнитосопротивления, полученная для сверхрешётки с составным буферным слоем Ta(50Å)/NiFeCr(80Å). При измерении магнитосопротивления магнитное поле направлено вдоль оси лёгкого намагничивания, то есть так же, как было направлено при напылении сверхрешётки. В малых полях (менее 10 Э) обнаружены отклонения от линейного хода зависимости $\Delta R/R_s(H)$. Предположительно, причина появления этих искажений состоит в том, что при магнетронном напылении обменно-связанных структур в магнитном поле условия формирования наведённой анизотропии в нижнем и в последующих ферромагнитных слоях различаются [6].

Полученная от образца с буферным слоем $t_{\text{NiFeCr}}=65 \text{ \AA}$ электронограмма с рефлексами в виде пятен (рис. 10а) характерна для блочных монокристаллов с угловой разориентацией блоков приблизительно на 5° . Более яркие рефлекссы, образующие сетку из больших равносторонних треугольников (рис. 10а), получены от сверхрешётки $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}(15\text{ \AA})/\text{Cu}(23\text{ \AA})]_8$. На рисунке 10 эти рефлекссы выборочно отмечены квадратными рамками. Их расположение на электронограмме совпадает со стандартной сеткой, изображающей обратную решетку ГЦК кристалла, ориентированного так, что направление [111] параллельно электронному лучу. Такая ориентация кристаллитов характерна для текстуры $\langle 111 \rangle$ с осью, перпендикулярной к плоскости плёнки.

Яркость рефлекссов, полученных от семейства плоскостей (220) не одинакова, в частности, рефлекссы $(2\bar{2}0)$ и $(\bar{2}20)$ слабее остальных рефлекссов от данного семейства плоскостей. Такое различие в яркости может быть следствием малого отклонения направления [111] в данном кристаллите от нормали к плоскости плёнки, обусловленного выявленной для данного образца конической текстурой $\langle 111 \rangle$. Кроме отражений, полученных от сверхрешётки $[\text{Ni}_{65}\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}(15\text{ \AA})/\text{Cu}(23\text{ \AA})]_8$, на электронограмме имеются более слабые рефлекссы, выборочно отмеченные кружками. Их расположение описывается равносторонними треугольниками меньшего размера и совпадает со стандартной сеткой, соответствующей изображению обратной решётки ОЦК кристалла, в котором направление [111] нормально к плоскости плёнки. Данный набор рефлекссов получен от буферного слоя NiFeCr(65Å), который имеет ОЦК структуру с параметром кристаллической решётки $a = 2.92 \text{ \AA}$. Значение параметра решётки было подтверждено дифрактометрическими измерениями, проведенными на специально напыленной пленке NiFeCr толщиной 1200 Å. Взаимное расположение рефлекссов, полученных от ОЦК и ГЦК структур, позволяет сделать вывод о том, что данные две решётки развернуты друг относительно друга в плоскости плёнки на угол 30° вокруг направления [111].

Для сверхрешётки, приготовленной на составном буферном слое Ta/NiFeCr, были получены электронограммы в виде колец (рис. 10b). Это свидетельствует о меньшем размере кристаллитов, чем для предыдущего образца с NiFeCr(65Å). На электронограмме имеется полный набор колец,

соответствующих ГЦК структуре, и отсутствуют рефлексы (200) и (211), которые относились бы к ОЦК структуре NiFeCr. Эти кольца являются общими для NiFeCr и NiFeCo/Cu, что возможно при одинаковой симметрии и близости параметров решётки данных материалов. Можно предположить, что при использовании подслоя Ta в буферном слое в сплаве NiFeCr формируется не ОЦК, а ГЦК структура с параметром кристаллической решётки $a = 3.58 \text{ \AA}$. Кольцо (220) является самым ярким, что свидетельствует о наличии аксиальной текстуры $\langle 111 \rangle$, ось которой перпендикулярна плоскости плёнки. По результатам измерений микродифракции образцов показано, что повышение совершенства текстуры в сверхрешётках, наблюдаемое при добавлении подслоя Ta к буферному слою, обусловлено принципиальным изменением микроструктуры в слое NiFeCr. В нём вместо ОЦК формируется ГЦК структура, которая, по-видимому, способствует формированию совершенной текстуры $\langle 111 \rangle$ в последующих слоях сверхрешётки и росту столбчатых монокристаллических зёрен с малым разбросом размеров и формы.

Во всех сверхрешётках $[\text{NiFeCo/Cu}]_8$ с составным буферным слоем было обнаружено существенное снижение гистерезиса (рис. 9, 11). На рис. 11 показаны полевые зависимости магнитосопротивления для сверхрешёток $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}(15\text{\AA})/\text{Cu}(23\text{\AA})]_8$, приготовленных с использованием буферного слоя NiFeCr(70\AA) и Ta(40\AA)/NiFeCr(70\AA). Магниторезистивная кривая имеет следующие характеристики: $(\Delta R/R)_{\max} = 12.5 \%$, $\Delta H = 9 \text{ Э}$ и максимальную магниторезистивную чувствительность 0.3 \%/Э в полях до 25 Э . Такие сверхрешётки, приготовленные на подложках из покрытого оксидным слоем кремния, являются удобным для практических приложений магниточувствительным материалом, обладающим высокими значениями магнитосопротивления и слабым гистерезисом.

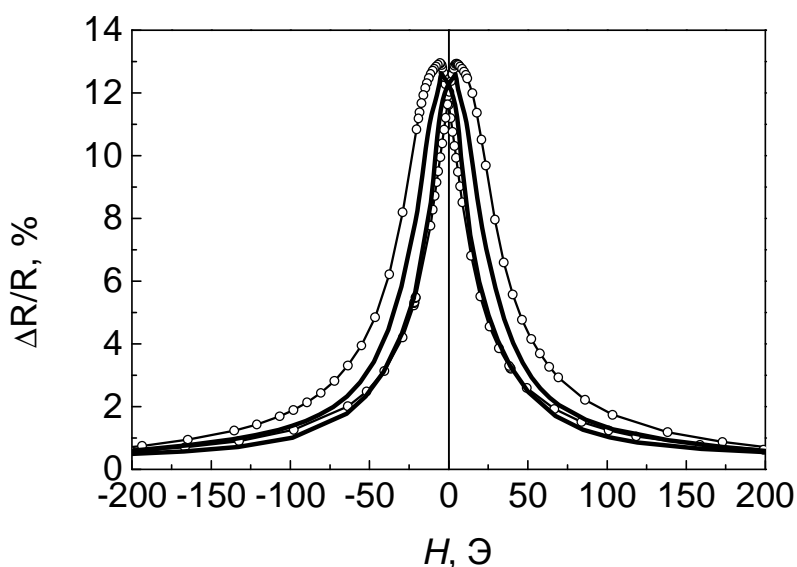


Рис. 11. Полевые зависимости магнитосопротивления, полученные для сверхрешёток $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}(15)/\text{Cu}(23)]_8$ с буферным слоем NiFeCr(70\AA) – (светлые символы) и Ta(40\AA)/NiFeCr(70\AA) – (линия).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана технология получения многослойных наноструктур на основе меди и сплавов 3-d металлов при использовании метода магнетронного напыления. Приготовлены образцы сверхрешёток Co/Cu и Co₉₀Fe₁₀/Cu с величиной магнитосопротивления до 54 % при комнатной температуре.
2. Для сверхрешёток Co₉₀Fe₁₀/Cu показано, что малые изменения толщины буферного слоя хрома на 5 Å в интервале толщин (15–20 Å) приводят к увеличению ширины петли гистерезиса более чем на порядок величины и сопровождается исчезновением аксиальной текстуры <111> в слоях сверхрешётки.
3. Обнаружено, что при термообработке интервал температурной стабильности магниторезистивных характеристик сверхрешёток Co₉₀Fe₁₀/Cu зависит от толщины и материала буферного слоя. Наибольшей температурной стабильностью обладают сверхрешётки с толщинами буферного слоя хрома более 20 Å.
4. Установлено, что отжиг сверхрешёток [Co₉₀Fe₁₀/Cu]_n с различными толщинами буферного слоя Co₉₀Fe₁₀ при температурах ниже 370°C позволяет увеличить магнитосопротивление. При температурах выше 370°C начинается перемешивание слоёв, сопровождаемое уменьшением магнитосопротивления и увеличением коэрцитивной силы в сверхрешётке. При увеличении температур отжига повышается степень совершенства аксиальной текстуры <111>.
5. Установлено, что использование немагнитного буферного слоя (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ приводит к формированию в последующих слоях сверхрешёток Co₉₀Fe₁₀/Cu более совершенной кристаллической структуры по сравнению со сверхрешётками с буферными слоями Cr, Fe или Co₉₀Fe₁₀. В сверхрешётках с толстым, более 70 Å, буферным слоем (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ возникает коническая текстура <111>, что сопровождается увеличением ширины петли гистерезиса. В сверхрешётках (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀/[Co₉₀Fe₁₀/Cu]_n путём выбора буферного слоя и подбора его толщины получено значение магнитосопротивления 54 % при комнатной температуре.
6. Показано, что для сверхрешёток на основе тройных сплавов Ni₆₅Fe₁₅Co₂₀/Cu и Ni₇₆Fe₁₀Co₁₄/Cu при использовании в качестве буферного слоя немагнитного сплава (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ увеличение толщины буферного слоя сопровождается повышением гистерезиса магнитосопротивления. Причиной такого изменения является формирование ОЦК-структуры в буферном слое (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ и конической текстуры <111> в слоях сверхрешётки.
7. Предложен способ значительного уменьшения ширины петли гистерезиса сверхрешёток путём использования составного буферного слоя Ta/(Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀. Данный способ позволяет сформировать острую аксиальную текстуру <111> в слоях сверхрешётки. Для

сверхрешётки $[\text{Ni}_{76}\text{Fe}_{10}\text{Co}_{14}/\text{Cu}]_n$ получены высокие значения магниторезистивной чувствительности до 0.3%/Э.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Миляев, М.А. Гигантские изменения магнитных и магниторезистивных свойств сверхрешёток CoFe/Cu при субнанометровой вариации толщины буферного слоя хрома [Текст] / М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, А.М. Бурханов, Н.С. Банникова, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2011. — Т. 112. — С. 146—154.
2. Milyaev, M.A. Giant drop of magnetic hysteresis with decreasing thickness of Cr-buffer layer of CoFe/Cu superlattices [Текст] / M.A. Milyaev, L.I. Naumova, V.V. Proglyado, T.P. Krinitsina, N.S. Bannikova, V.V. Ustinov // Sol. Stat. Phenomena. — 2011. — V. 168-169. — P. 303—306.
3. Банникова, Н.С. Гигантское магнитосопротивление сверхрешёток CoFe/Cu с буферным слоем (Ni₈₀Fe₂₀)₆₀Cr₄₀ [Текст] / Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, И.Ю. Каменский, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2015. — Т. 116. — С. 1040—1047.
4. Банникова, Н.С. Влияние отжига на магнитосопротивление и микроструктуру многослойных систем CoFe/Cu с различным буферным слоем [Текст] / Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, В.В. Проглядо, Т.П. Криницина, Т.А. Чернышова, В.В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2015. — Т. 116. — С. 165—170.
5. Банникова, Н.С. Сверхрешётки NiFeCo/Cu с высокой магниторезистивной чувствительностью и слабым гистерезисом [Текст] / Н.С. Банникова, М.А. Миляев, Л.И. Наумова, Т.П. Криницина, Е.И. Патраков, В.В. Проглядо, Т.А. Чернышова, В.В. Устинов // Физика твёрдого тела. — 2016. — Т. 58. — № 10. — С. 1940—1946.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Tumanski, S., Thin Film Magnetoresistive Sensors / S. Tumanski. – Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001. – 441 p.
2. Reig, C. Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors From Basis to State-of-the-Art Applications. Smart Sensors, Measurement and Instrumentation. Volume 6. / C. Reig, S. Cardoso de Freitas, S. C. Mukhopadhyay. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. – 299 p.
3. Wetzig, K. Metal Based Thin Films for Electronics / K. Wetzig, C.M. Schneider. – Weinheim: WILEY-VCH, 2003. – 378 p.

4. Svedberg, E.B. Interdiffusion in CoFe/Cu multilayers and its application to spin-valve structures for data storage / E.B. Svedberg, K.J. Howard, M.C. Bønsagerand, B.B. Pant, A.G. Roy, D.E. Laughlin // *J. Appl. Phys.* – 2003. – V. 94. – № 2. – P. 1001–1006.
5. Piecuch, M. Diffusion in multilayers / M. Piecuch // *Revue Phys. Appl.* – 1988. – V. 23. – № 10. – P. 1727–1732.
6. Чеботкевич, Л.А. Коэрцитивная сила и наведенная анизотропия многослойных пленок / Л.А. Чеботкевич, Ю.П. Иванов, А.В. Огнёв. // *Физика твердого тела.* – 2007. – Т. 49. № 11. – С. 2039–2044.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. № 44
Объем 1 печ. л. Формат 60x84 1/16
620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18