

На правах рукописи

АНТРОПОВ Николай Олегович

**КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И МАГНИТНОЕ
УПОРЯДОЧЕНИЕ В СВЕРХРЕШЕТКАХ Dy/Gd**

Специальность 01.04.11 —
физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург — 2018

Диссертационная 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: доктор физико-математических наук
Кравцов Евгений Алексеевич

Официальные оппоненты: **Никитенко Юрий Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
начальник группы РЕМУР сектора нейтронной
оптики Объединенного института ядерных исследова-
ний, г. Дубна;

Сыромятников Владислав Генрихович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Отделения Нейтрон-
ных Исследований Петербургского Института
Ядерной Физики (ПИЯФ), г. Гатчина,
доцент кафедры физики факультета экологии и
физики природной среды Российского Государ-
ственного Гидрометеорологического Университета
(РГГМУ), г. Санкт-Петербург,
доцент кафедры ядерно-физических методов
исследования физического факультета Санкт-
Петербургского государственного университета.

Ведущая организация: Институт физических проблем им. П.Л. Капицы
Российской Академии Наук, г. Москва

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 14⁰⁰ на заседании диссертационного
совета Д 004.003.01 при ИФМ УрО РАН по адресу: 620108, г. Екатеринбург, ул.
С.Ковалевской, 18.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 004.003.01,
доктор физ.-мат. наук

Чарикова Т.Б.

Общая характеристика работы

Ведущие производители микроэлектроники совместно с учеными из научных лабораторий ведут широкие исследования в поисках новых материалов на основе магнитных сверхрешеток для создания новейших элементов спинтроники [1]. Этот новый класс искусственных магнитных наноструктур уникален тем, что в нем проявляются свойства, отличные от объемных материалов. Толщины слоев в сверхрешетках составляют от единиц до сотен нанометров и прецизионно контролируются на атомном уровне. В сверхрешетках, образованных чередующимися ферромагнитными и антиферромагнитными металлами может формироваться магнитное упорядочение с периодом, отличным от периода сверхрешетки.

Особый интерес представляют системы на основе редкоземельных металлов. Было установлено, что в сверхрешетках на основе Dy, например, в системах Dy/Y наблюдается спиральное когерентное магнитное упорядочение в слоях Dy, причем период спирали несоизмерим с постоянной решетки и толщиной слоев Dy. Сравнительно недавно с помощью рефлектометрии поляризованных нейтронов было показано [2], что в сверхрешетках Dy/Y с помощью магнитного поля можно индуцировать спиральное магнитное упорядочение с преобладающей хиральностью. Более перспективными представляются сверхрешетки Dy/Gd, в которых было экспериментально показано [3], что при некоторых толщинах слоев Dy и Gd и низких температурах реализуется когерентное геликоидальное магнитное упорядочение с чередующейся хиральностью внутри слоев Dy. Система Dy/Gd представляется чрезвычайно перспективной как для фундаментальных исследований особенностей косвенного обменного взаимодействия в редкоземельных сверхрешетках, так и с точки зрения поиска новых материалов для устройств наноспинтроники.

Актуальность настоящей работы определена необходимостью исследования структурных и магнитных свойств сверхрешеток Dy/Gd, в которых возможно появление спирального магнитного упорядочения. Данная магнитная структура может быть использована для получения новых материалов спинтроники, в которых будут генерироваться циркулярно-поляризованные спиновые токи. Актуальность данной работы также подтверждается тем, что исследования были выполнены в рамках государственного задания ФАНО России (тема "Спин" АААА-А18-118020290104-2), а также частично поддержаны грантами Минобрнауки № 14 Z 50.31.0025, № 14.616.21.00067; проектом 18-10-2-37 комплексной программы УрО РАН; грантами РФФИ (16-02-00061; 18-32-00197).

Целью настоящей работы является установление корреляции между структурными и магнитными свойствами сверхрешеток Dy/Gd и исследование влияния температуры на магнитное упорядочение в сверхрешетках Dy/Gd.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Отработка технологии роста сверхрешеток Dy/Gd.
2. Рентеноструктурный анализ сверхрешеток Dy/Gd.

3. Определение макроскопических магнитных свойств сверхрешёток Dy/Gd.
4. Определение внутрислойной магнитной структуры сверхрешеток Dy/Gd.
5. Определение корреляции структурных и магнитных свойств сверхрешеток Dy/Gd из комплексного анализа рентгеновских и магнитных данных.

Объектами исследования были псевдо-монокристаллические пленки Dy и сверхрешетки Dy/Gd, выращенные на монокристаллических подложках Al_2O_3 .

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально установлено, что в температурном интервале 10 — 170 К, в магнитном поле величиной 100 Э формируется веерное упорядочение магнитных моментов в слоях Dy, которое когерентно распространяется по всей сверхрешетке. Магнитные моменты в слоях Dy при этом лежат в базисной плоскости, а в слоях Gd преимущественно направлены вдоль гексагональной оси c .
2. Экспериментально установлено, что в сверхрешетках Dy/Gd с толщинами слоев Dy от 15 до 180 Å, в температурном интервале 10 — 170 К, в внешнем магнитном поле 100 Э наблюдается подавление фазового перехода Dy из антиферромагнитной в ферромагнитную фазу. Подавление перехода вызвано сжатием ГПУ кристаллической решетки Dy в базисной плоскости.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует пункту 2 ”Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий” и пункту 3 ”Исследование изменений различных физических свойств вещества, связанных с изменением их магнитных состояний и магнитных свойств” паспорта специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным п.14 Положения о присуждении ученых степеней. Текст диссертации представляет собой научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылки на автора и (или) источник заимствования, не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Научная и практическая значимость работы. Научные результаты, полученные в рамках данной работы, позволяют глубже понять механизмы формирования магнитного геликоидального порядка в редкоземельных сверхрешетках, что будет способствовать развитию дальнейших исследований сверхрешеток Dy/Gd, которые могут быть использованы для создания новых материалов наноспинтроники.

Методология и методы исследования. В настоящей работе для исследования структуры и магнитных свойств пленок Dy и сверхрешеток Dy/Gd использовались методики, использующие рентгеновское, синхротронное и нейтронное рассеяние.

Кристаллическая структура сверхрешеток была определена с помощью рентгеновской рефлектометрии, дифракции высокого разрешения, картирования обратного пространства.

Магнитные свойства сверхрешеток определены с помощью низкотемпературной СКВИД – магнитометрии и рентгеновского магнитного кругового дихроизма.

Микроскопическая магнитная структура сверхрешеток была определена рефлектометрией поляризованных нейтронов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное доказательство подавления фазового перехода Dy из антиферромагнитной в ферромагнитную фазу в серии сверхрешеток (0001)Dy/Gd с толщинами слоев Dy и Gd от 15 до 180 Å, в температурном интервале 10 — 170 К, в внешнем магнитном поле 100 Э.
2. Экспериментальное доказательство формирования когерентного веерного магнитного упорядочения магнитных моментов в слоях Dy в сверхрешетках (0001)Dy/Gd, в температурном интервале 10 — 170 К, в внешнем магнитном поле 100 Э.
3. Экспериментальное доказательство формирования в сверхрешетках Dy/Gd упорядочения магнитных моментов Gd вдоль направления [0001].

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач для экспериментальных исследований совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Е. А. Кравцовым. Автор лично провел исследования сверхрешеток Dy/Gd с различными толщинами редкоземельных металлов, используя методы рентгеновской рефлектометрии, дифракции высокого разрешения и картирования обратного пространства. Автор лично выполнил анализ рефлектометрии поляризованных нейтронов и магнитного кругового дихроизма. Результаты, изложенные в диссертации, получены автором в кооперации с сотрудниками лаборатории квантовой наноспинтроники, лаборатории электрических явлений ИФМ УрО РАН, центра коллективного пользования ИФМ УрО РАН; а также ведущих научных центров Германии (BESSY-II, центр Гельмгольца, г. Берлин и N-REX (FRM-II), г. Гархинг). Результаты исследований неоднократно докладывались автором на всероссийских и международных конференциях. Совместно с руководителем д.ф.-м.н. Кравцовым Е.А. автор готовил статьи и тезисы докладов к публикации.

Достоверность результатов обеспечивается использованием аттестованных образцов и апробированных методик экспериментальных исследований, проведением экспериментов с соблюдением идентичности экспериментальных условий. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами, опубликованными ранее.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены на конференциях: Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества СПФКС-17 (Россия, Екатеринбург, 2017); Moscow International Symposium on Magnetism MISM-2017 (Россия, Москва, 2017); Международная конференция по применению эффекта Мессбауэра ICAME 2017 (Россия, Санкт-Петербург, 2017), XXI международный симпозиум «Нанозлектроника» (Россия, Нижний Новгород, 2017), Европейская встреча пользователей XFEL, DESY 2018 (Германия, Гамбург, 2018).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 8 печатных изданиях, 3 из которых изданы в журналах, включённых в Перечень ВАК и индексируемых в Web of Science, 5 — в тезисах докладов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка сокращений, условных обозначений и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 107 страниц, включая 74 рисунка и 4 таблицы. Список литературы содержит 102 наименования.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследования сверхрешеток Dy/Gd, сформулированы цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна и показана практическая значимость полученных результатов, изложены выносимые на защиту положения.

Первая глава является литературным обзором, посвященным атомным и магнитным свойствам металлов Dy и Gd, и сверхрешеток Dy/Gd. В главе описана взаимосвязь кристаллической структуры и магнитных свойств редкоземельных металлов (Dy, Gd), и сверхрешеток Dy/Gd. Описаны основные типы модулированных магнитных структур, изложен основной механизм образования неколлинеарных магнитных упорядочений. Проведен анализ работ, в которых изучались данные системы.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методик, использованных в диссертационной работе. Описаны методики проведения структурной аттестации образцов с помощью рентгеновской рефлектометрии, дифракции высокого разрешения и картирования обратного пространства. А также дано описание методик определения магнитных свойств: рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) и элементарно-чувствительной методики рентгеновского магнитного кругового дихроизма.

Третья глава посвящена описанию синтеза образцов, изучению их атомной структуры методами рентгеновской рефлектометрии, дифракции высокого разрешения и картирования обратного пространства. Серия тонких пленок Dy

и сверхрешеток Dy/Gd с различными толщинами слоев Dy и Gd была синтезирована методом высоковакуумного магнетронного распыления на постоянном токе на установке ULVAC - MPS4000C6 в лаборатории электрических явлений (ИФМ УрО РАН) совместно с Проглядо В. В. Формула образца может быть выражена как: $(11\bar{2}0)Al_2O_3/(110)Nb1000\text{\AA}/(0001)Y500\text{\AA}/(0001)[Dy(t)/Gd(t)] \times 20/Al(100\text{\AA})$ или $Cr(100\text{\AA})$, где t - толщина, которая варьировалась от 15 до 180 Å. Также была выращена пленка Dy с таким же буфером и переходным слоем. Рентгеноструктурный анализ проводился с использованием лабораторного дифрактометра Panalytical Empyrean Series 2. Обработка рефлектограмм была выполнена с помощью коммерческой программы PANalytical X'Pert Reflectivity. Из обработки рефлектограмм были определены толщины отдельных слоев, образующих сверхрешетки, а также среднеквадратичные шероховатости межслойных границ, которые составляют 2–3 атомных монослоя. Толщина слоев отличается от номинальной на 1-2 Å. Никакой систематической зависимости свойств межслойных границ от толщины слоев диспрозия в образцах серии обнаружено не было. Обработка кривых рентгеновской дифракции и карт обратного пространства производилась с помощью коммерческой программы PANalytical X'Pert Epitaxy.

На рисунке 1 приведена типичная дифрактограмма, построенная в Q -пространстве для основного образца серии, который измерялся на нейтронных и синхротронных источниках. Анализ данных подтверждает высокое кристаллическое качество, полученных образцов. В результате были получены эпитаксиальные соотношения для отдельных слоев в направлении роста образца: $[11\bar{2}0]Al_2O_3||[011]Nb||[0001]Y||[0001]Dy/Gd$, известные для эпитаксиального роста многослойных наноструктур редкоземельных металлов [4]. На дифрактограммах, полученных от пленки Dy и от сверхрешеток Dy/Gd невозможно увидеть пик от Y. Это объясняется тем, что Y имеет схожие с Dy и Gd значения констант кристаллической решетки. Слой Y наблюдался в данной серии образцов методом электронной микроскопии, данные представлены в работе [5].

Высокое качество кристаллической структуры полученных систем подтверждается измерениями рентгеновской дифракции вблизи асимметричных брегговских рефлексов. На рисунке 2 приведено значение интенсивности асимметричного брегговского рефлекса Dy/Gd ($\bar{1}015$) для образца Dy(60Å)/Gd(60Å) при вращении образца вокруг нормали к поверхности. Наличие оси шестого порядка структуры ГПУ свидетельствует о высоком качестве “псевдо-монокристаллической сверхрешетки”.

Для определения эпитаксиальных соотношений и структурных параметров в плоскости образца было проведено **картирование обратного пространства** вблизи асимметричных брегговских рефлексов ($\bar{1}015$) Dy/Gd, $(31\bar{4}\bar{4})Al_2O_3$ и $(103) Nb$. На рисунке 3 представлена двумерная карта, построенная в обратном пространстве, для образца Dy(60Å)/Gd(60Å). 2θ - угол дифракции, ω - угол падения. Интенсивный рефлекс - отражение от подложки при угле $2\theta = 112.1^\circ$.

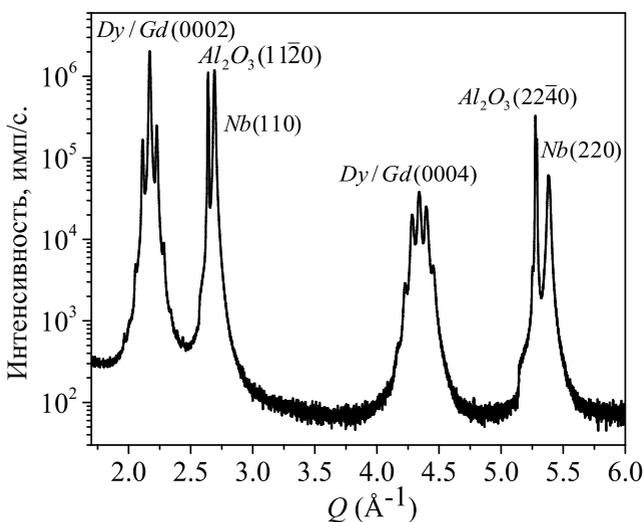


Рис. 1 — Дифрактограмма от образца Dy(60Å)/Gd(60Å), измеренная вдоль направления роста образца, задаваемого ориентацией подложки $[11\bar{2}0]Al_2O_3$.

Два широких рефлекса - один из которых, является пиком от сврхрешетки Dy/Gd ($2\theta = 112.8^\circ$), второй ($2\theta = 118^\circ$) - отражение от буферного слоя Nb. Из анализа двумерной карты и одномерной симметричной дифрактограммы, было выявлено, что для образца Dy(60Å)/Gd(60Å) происходит взаимное согласование кристаллических решеток, таким образом, что решетка Dy подстраивается под Gd, сжимаясь в плоскости образца на 1.2%. Точность определения решеточных констант имеет ошибку не превышающую 0.1%. Параметры кристаллической решетки буферного слоя Nb не изменяются по сравнению с объемными значениями. Угол между атомными плоскостями ($\bar{1}015$) Dy и (103) Nb составляет 6.18° (6.5° - значение для объемных Nb и Dy). Оценки латеральной корреляционной длины составляют 7100 пм для Nb и 700 пм для Dy/Gd. Степень мозаичности Nb составляет 0.5° ; а для Dy/Gd – 5.8° .

Таким образом, анализ данных рентгеновских исследований показал, что синтезированные сверхрешетки представляют собой псевдо-трехмерные кристаллы, в которых реализуется искусственная периодичность в направлении роста и согласование кристаллических решеток Dy и Gd. Наличие определенной текстуры в образцах является одним из критически важных условий для реализации сложных магнитных эффектов, которые могут проявляться в выше-описанных системах.

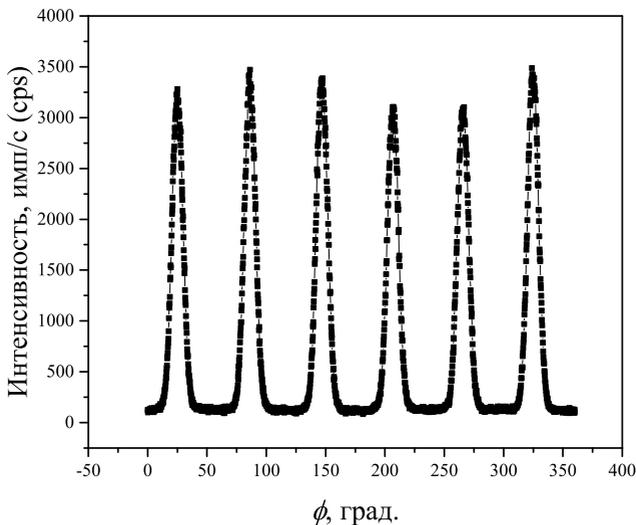


Рис. 2 — Диаграмма интенсивности асимметричного брегговского рефлекса Dy/Gd ($\bar{1}015$) при вращении образца вокруг нормали к поверхности.

В **четвертой главе** приводятся результаты исследования магнитной структуры методами СКВИД-магнитометрии, рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН), элементарно-чувствительной методики рентгеновского магнитного кругового дихроизма. Измерения намагниченности образцов при низких температурах проводились на СКВИД-магнитометре в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН.

Особенное внимание необходимо уделить теме магнитных фазовых переходов. На рисунке 4 приведена температурная зависимость намагниченности сверхрешетки Dy(60\AA)/Gd(60\AA), измеренная при охлаждении образца (FC) в магнитном поле $H = 40$ кЭ и при нагревании (FW) его в поле $H = 100$ Э. Наблюдаемая на графике особенность вблизи $T = 170$ К, скорее всего, связана с магнитным фазовым переходом в Dy из парамагнитного в антиферромагнитное состояние. Никаких особенностей, свидетельствующих о переходе Dy в ферромагнитное состояние, не наблюдается.

Геометрия прикладываемого поля очень важна, так как данную серию планировалось исследовать на нейтронных источниках. Рефлектометрия поляризованных нейтронов, как было описано в главе 2 настоящей работы, чувствительна только к проекции намагниченности, находящейся в плоскости образца.

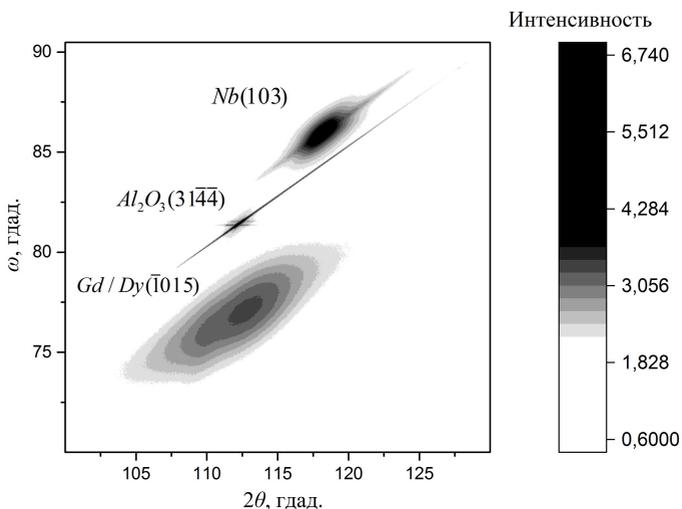


Рис. 3 — Карта обратного пространства для образца $\text{Dy}(60\text{\AA})/\text{Gd}(60\text{\AA})$, захватывающая асимметричные брегговские рефлексы $(\bar{1}015)$ Dy/Gd , $(3144)\text{Al}_2\text{O}_3$ и (103) Nb . Интенсивность на графике приведена в логарифмическом масштабе.

Исследование сверхрешеток Dy/Gd методом элементарно-чувствительной рентгеновской магнитометрии

Для оценки вкладов Dy и Gd в суммарную намагниченность был проведен эксперимент элементарно-чувствительной рентгеновской магнитометрии, основанной на использовании кругового рентгеновского дихроизма (XMCD). Элементарно-чувствительные петли магнитного гистерезиса были измерены автором на станции UE46PGM-1 синхротрона BESSY II в г. Берлин. Для построения кривых $M(H)$ была измерена зависимость сигнала XMCD от энергии вблизи M_5 краев поглощения Dy и Gd в магнитном поле $H = 30$ кЭ на образце $\text{Dy}(60\text{\AA})/\text{Gd}(60\text{\AA})$ и определены значения энергии, при которых наблюдается максимальный сигнал (зависимости и выбранные значения энергии фотонов приведены на рисунке 5).

Далее для этого же образца были измерены зависимости сигнала XMCD от магнитного поля при фиксированных значениях энергии (в относительных единицах они приведены на правой шкале рисунке 6).

Как следует из приведенных данных, значение намагниченности насыщения сверхрешетки Dy/Gd близко к ожидаемому значению для смеси объемных материалов Dy и Gd (2900 Гс для Dy и 2100 Гс для Gd). Намагниченность насыщения сверхрешетки $\text{Dy}(60\text{\AA})/\text{Gd}(60\text{\AA})$ в поле 50 кЭ составляет 2530 Гс, что

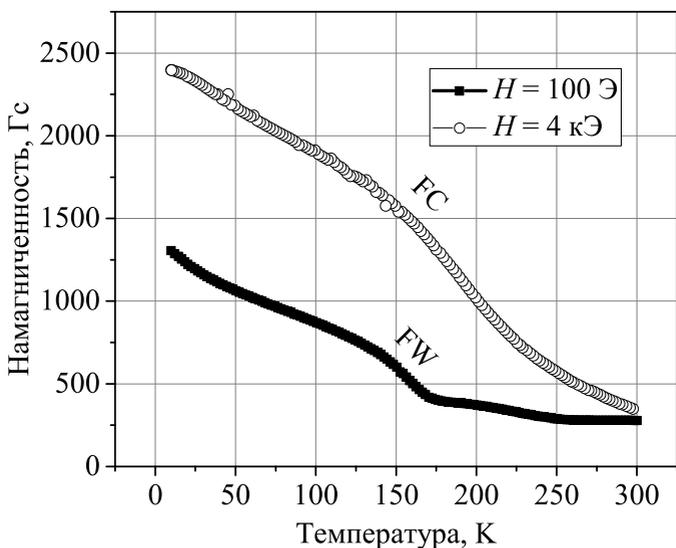


Рис. 4 — Температурная зависимость намагниченности для сверхрешетки Dy(60Å)/Gd(60Å), измеренная при охлаждении в поле 40 кЭ (FC) и при нагревании в поле 100 Э (FW), магнитное поле было приложено в базисной плоскости образца.

соответствует среднему значению приведенных выше величин для объемных монокристаллов. Косвенным образом это еще раз свидетельствует о высоком структурном качестве сверхрешеток, поскольку структурные несовершенства, как правило, почти всегда приводят к уменьшению намагниченности насыщения образцов. В реманентном состоянии основной вклад в намагниченность дает Dy, а Gd, скорее всего, намагничен вдоль оси с перпендикулярно поверхности образца. Большая коэрцитивность сверхрешетки обусловлена, главным образом, также вкладом от Dy.

Исследование сверхрешеток Dy/Gd методом рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН)

Эксперимент был проведен с целью определения магнитных свойств сверхрешеток Dy/Gd с разрешением по глубине. Длина волны нейтронного излучения составляла 4.3 Å. Длина волны излучения крайне важна, так как плотность длины рассеяния Dy и Gd меняется в зависимости от длины волны нейтронного излучения [6].

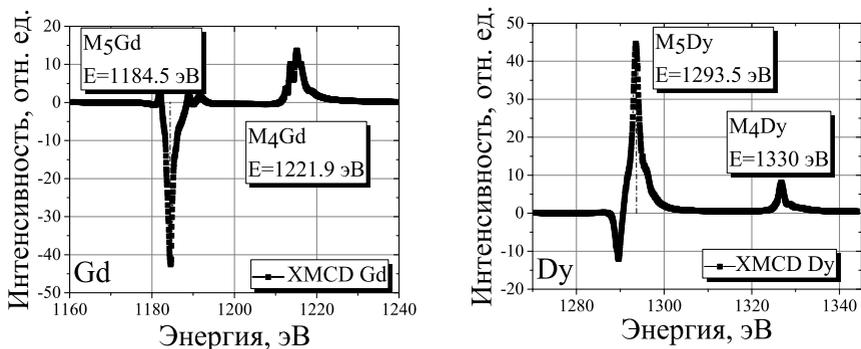


Рис. 5 — Зависимость XMCD сигнала от энергии вблизи $M_{4,5}$ краев поглощения Gd и Dy.

Образец серии сверхрешеток Dy/Gd с одинаковыми толщинами Dy и Gd - Dy(60\AA)/Gd(60\AA), который был выбран из всей серии сверхрешеток, как наиболее перспективный, показывает ряд уникальных магнитных свойств. На рисунке 7 приведены нейтронные рефлектограммы для сверхрешетки Dy(60\AA)/Gd(60\AA), которые измерялись при температурах от 10 до 170 К в внешнем магнитном поле 100 Э. Измерения выполнялись с использованием полного поляризационного анализа, который захватывал все компоненты, включая "спин-флип". Но в настоящей работе будут приведены данные для рассеяния нейтронов без переворота спина R_{++} и R_{--} , по той причине, что рассеяние R_{-+} и R_{+-} было незначительно. В результате анализа нейтронных данных были получены результаты, которые приведены на рисунке 8.

Полученные в результате обработки рефлектометрических кривых профили намагниченности схематически представлены на рисунке 8.

Известно, что в сверхрешетках с периодом, образованным слоями равной толщины, на рентгенографических рефлектограммах будут подавлены пики четных порядков. Этот эффект хорошо виден в случае с образцом Dy(60\AA)/Gd(60\AA). На рисунке 7 на кривой рентгеновской рефлектометрии пик второго порядка отсутствует. На графике присутствует только сверхрешеточный брегговский пик первого порядка. В случае нейтронных рефлектограмм сверхрешеточные рефлексы четных порядков будут отсутствовать, если, помимо отмеченного выше равенства толщин слоев, будут совпадать периоды ядерной и магнитной структуры. Это и наблюдается на рефлектограмме, измеренной при температуре 170 К. Отсутствие разницы между кривыми R_{++} и R_{--} показывает отсутствие магнитного контраста в плоскости образца (нейтроны, как известно не чувствительны к компоненте намагниченности, перпендикулярной к поверхности образца): Dy парамагнитен, а магнитные моменты в слоях Gd ориентированы нормально к поверхности образца.

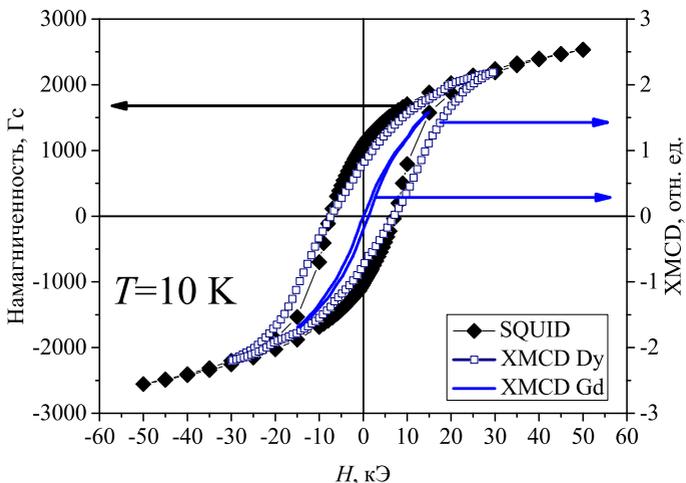


Рис. 6 — Петля гистерезиса, измеренная при температуре 10 К (левая шкала) и полевые зависимости сигнала XMCD Dy и Gd на соответствующих M_5 краях поглощения данных элементов (правая шкала).

Если понизить температуру до 100, К это приведет к кардинальным изменениям, так как понижение температуры ведет к входу в область фазового перехода между парамагнитным состоянием диспрозия и антиферромагнитным геликоидальным состоянием.

Первое, что можно отметить - это отличие кривых R_{++} и R_{--} , что говорит о появлении компоненты намагниченности Dy в плоскости образца. Моделирование показывает, что магнитные моменты в слоях Dy лежат в плоскости слоев. Следует также обратить внимание на появление характерных особенностей на нейтронных рефлектограммах, которые невозможно описать моделью однородно намагниченных слоев: позиция сверхрешеточного брегговского пика первого порядка отличается для R_{++} и R_{--} . Также появляется слабый максимум в районе пика второго порядка, который, как было описано ранее, должен быть подавлен.

Указанные особенности можно интерпретировать только моделью неоднородного распределения намагниченности в образце, причем магнитный период отличается от химического. Моделирование кривых РПН при температурах 10, 100 и 170 К сверхрешетки Dy(60Å)/Gd(60Å) проводилось в общедоступной некоммерческой программе "GENX", в которой использован алгоритм дифференциальной эволюции [7]. Намагниченность слоев Gd задавалась однородной, в то время как слои Dy разбивались на три подслоя, чтобы ввести изменение в распределении намагниченности внутри слоев Dy. Как видно из нижней части

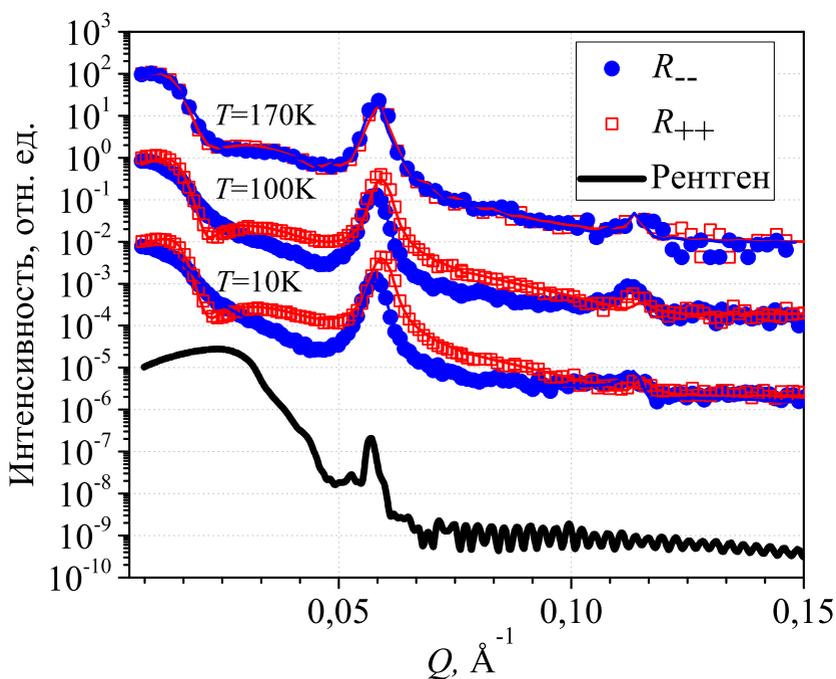


Рис. 7 — Нейтронные рефлектометрические кривые, измеренные при температурах 10, 100, 170 К в внешнем магнитном поле $H = 100$ Э, (символы - экспериментальные кривые) и результат их моделирования (сплошные линии).

Нижняя кривая – рентгеновская рефлектометрия. Кривые сдвинуты по оси ординат и построены в относительных единицах для удобства представления.

рисунка 8, магнитный момент в центре слоев Dy меньше, чем на интерфейсах. Сравнительно малое значение проекции магнитных моментов слоев Gd в магнитном поле 100 Э, в плоскости образца относительно объемного значения, говорит о том, что вектор магнитного момента Gd выходит из плоскости образца. Таким образом, есть отличная от нуля проекция магнитного момента, направленная параллельно кристаллической оси c ГПУ решетки, как показано на нижней части рисунка 8.

На рисунке 9 приведено распределение проекций магнитных моментов плоскости образца с глубиной в сверхрешетке Dy(60Å)/Gd(60Å) при температуре 10К. При данной температуре также наблюдается веерное магнитное упорядочение в слоях Dy, когерентно распространяющаяся по всей сверхрешетке. Параметр, определяющий качество обработки (r соотношение), составил ≈ 0.1

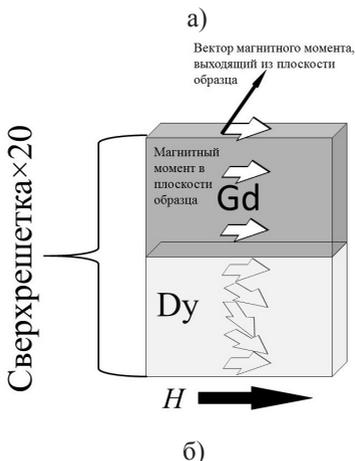
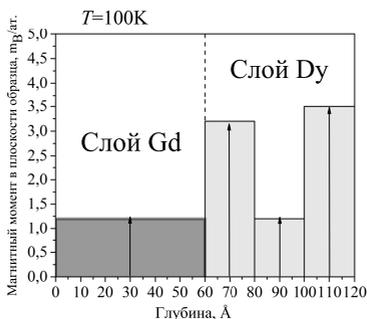


Рис. 8 — Распределение проекций магнитных моментов плоскости образца с глубиной в сверхрешетке Dy(60Å)/Gd(60Å) при температуре 100К, в магнитном поле 100Э и схематическое изображение магнитного домена с "верной" фазой внутри слоев Dy.

для кривых РПН, измеренных при 10, 100 и 170 К. Погрешность определения намагниченности отдельных слоев составляет не более 10%.

Как видно из рисунка 7 теоретические кривые хорошо согласуются с экспериментальными. Таким образом, можно считать доказанным существование веерного магнитного упорядочения в слоях Dy в данной сверхрешетке. При дальнейшем понижении температуры до $T = 10$ К переход Dy к ферромагнитному упорядочению не наблюдается и веерный магнитный порядок в сверхрешетке сохраняется.

В результате комплексного анализа структурных и магнитных свойств сверхрешеток Dy/Gd показано подавление перехода Dy в ферромагнитную фазу, что, по аналогии с системами Dy/Y [4], можно объяснить сжатием кристаллической решетки Dy в базисной плоскости на 1.2%.

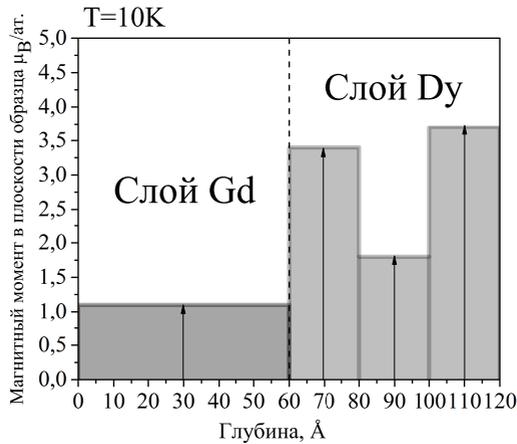


Рис. 9 — Распределение проекций магнитных моментов плоскости образца с глубиной в сверхрешетке Dy(60Å)/Gd(60Å) при температуре 10К, в магнитном поле 100Э.

Отсутствие спин-зависящего рассеяния нейтронного излучения в сверхрешетке Dy(60Å)/Gd(60Å) ("спин-флип" рассеяния с переворотом спина) показывает, что магнитные моменты Dy либо лежат в плоскости рассеяния, либо образец разбит на домены, размеры которых существенно меньше корреляционной длины нейтронного пучка, и усреднение которых приводит к компенсации перпендикулярной компоненты намагниченности.

Неоднородное изменение намагниченности внутри слоев Dy в образце Dy(60Å)/Gd(60Å), а именно ее увеличение вблизи межслойных границ и уменьшение в центре слоя, характерно для так называемой "веерной" фазы, которая наблюдается в объемном Dy вблизи температуры магнитного фазового перехода при приложении сравнительно больших магнитных полей. При $T=100\text{K}$ магнитное поле, при котором объемный Dy переходит в FAN фазу составляет ≈ 2500 Э [8]. Отметим, что в нашем случае, такая фаза возникает в сравнительно малых полях $H = 100$ Э и сохраняется во всем интервале температур от 10 К до температуры Нееля диспрозия. Похожее неоднородное распределение магнитных моментов в ферромагнитных оксидах было описано в работе [9].

При $T < T_N$ диспрозия на графиках РПН в образце Dy(60Å)/Gd(60Å) наблюдается запрещенный магнитный брегговский рефлекс второго порядка. Интенсивность данного пика зависит от температуры. Возникновение данного пика обусловлено исключительно неоднородным распределением магнитных моментов внутри слоев Dy, которое когерентно распространяется по всей сверхрешетке.

Магнитные моменты в слоях Gd в сверхрешетке Dy(60Å)/Gd(60Å) имеют компоненту, направленную вдоль оси c ГПУ решетки Gd.

В заключении суммированы основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Впервые методом высоковакуумного магнетронного распыления были успешно синтезированы эпитаксиальные сверхрешетки Dy/Gd. Определены оптимальные параметры синтеза образцов, включающие выбор подложек, буферных слоев, температур и скоростей осаждения отдельных слоев, позволяющие получить высококачественные структуры. Полученные режимы роста могут многократно ускорить процесс синтеза редкоземельных сверхрешеток.
2. Методами рентгеновской дифрактометрии высокого разрешения и картирования обратного пространства в сверхрешетках Dy/Gd доказано согласование кристаллических решеток Dy и Gd.
3. С помощью низкотемпературной СКВИД-магнитометрии были определены магнитные свойства полученных сверхрешеток. Установлено, что в сверхрешетках Dy/Gd с толщинами монослоев Dy от 15 до 180 Å, в температурном интервале 10 — 170 К, в внешнем магнитном поле 100 Э наблюдается подавление перехода Dy в ферромагнитную фазу, которое связано с сжатием Dy в базисной плоскости на 1.2%.
4. Впервые установлено, что в температурном интервале 10 — 170 К, в внешнем магнитном поле 100 Э формируется веерное упорядочение магнитных моментов Dy, которое когерентно распространяется по всей сверхрешетке. Магнитные моменты в слоях Dy при этом лежат в базисной плоскости, а магнитные моменты Gd ориентированы преимущественно вдоль направления оси *c*.

Публикации автора по теме диссертации

1. Кристаллическая структура и магнитные свойства сверхрешеток Dy/Gd / Н. О. Антропов, Е. А. Кравцов, В. В. Проглядо, М. В. Рябухина, В. В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2017. — № 118. — С. 1283—1290.
2. Ядерно-резонансное отражение синхротронного излучения от тонких пленок Dy с различными типами магнитного упорядочения / М. А. Андреева, Н. О. Антропов, Р. А. Баулин, Е. А. Кравцов, М. В. Рябухина, Е. М. Якунина, В. В. Устинов // Физика металлов и металловедение. — 2016. — № 117. — С. 1247—1255.
3. Когерентная веерная магнитная структура в сверхрешетках Dy/Gd / Н. О. Антропов, Е. А. Кравцов, Ю. Н. Хайдуков, М. В. Рябухина, В. В. Проглядо, О. Вешке, В. В. Устинов // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — № 108. — С. 361.

4. Структурные и магнитные свойства сверхтонких пленок Dy / Н. О. Антропов, Е. А. Кравцов, В. В. Проглядо, М. В. Рябухина, В. В. Устинов // Тезисы докладов XVII Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС-17). — Екатеринбург, 2016. — С. 39.
5. Magnetic relaxation of Dy in [Dy/Gd]*20 multilayer detected by Nuclear resonance reflectivity / R. A. Baulin, E. A. Kravtsov, V. V. Proglyado, M. V. Ryabukhina, A. I. Chumakov, M. A. Andreeva, N. O. Antropov, R. Ruffer, V. V. Ustinov // Book of Abstracts Moscow International Symposium on Magnetism (MISM). — Moscow, 2017. — P. 1043.
6. Helix structure in [Dy/Gd]*20 multilayer detected by Nuclear Resonance Reflectivity / R. A. Baulin, M. A. Andreeva, A. I. Chumakov, R. Ruffer, E. A. Kravtsov, N. O. Antropov, M. V. Ryabukhina, V. V. Proglyado, V. V. Ustinov // Users meeting booklet of European XFEL Users Meeting 2018 and DESY Photon Science Users Meeting 2018. — Hamburg, 2018.
7. Magnetic structure and relaxation in [Dy/Gd]*20 multilayers investigated by Nuclear Resonance Reflectivity / R. A. Baulin, M. A. Andreeva, N. O. Antropov, E. A. Kravtsov, V. V. Proglyado, A. I. Chumakov, R. Ruffer // International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect - ICAME 2017. Conference Programme and Book of Abstracts. — St.Petersburg : Aising, 2017. — P. 161.
8. Структура и магнетизм сверхрешеток Dy/Gd / Е. А. Кравцов, М. А. Андреева, Н. О. Антропов, В. В. Проглядо, Р. М. В., Ю. Н. Хайдуков, Е. М. Якунина, В. В. Устинов // Сборник тезисов Труды XXI Международного симпозиума "нанофизика и наноэлектроника". — Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, 2017. — С. 191—192.

Список литературы

1. The emergence of spin electronics in data storage / C. Chappert, A. Fert, F. Nguyen Van Dau // Nature Materials. — 2007. — Vol. 6. — P. 813—823.
2. Field induced chirality in the helix structure of Dy/Y multilayer films and experimental evidence for Dzyaloshinskii-Moriya interaction on the interfaces / S. V. Grigoriev, Y. O. Chetverikov, D. Lott, A. Schreyer // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Vol. 100. — P. 197—203.
3. Magnetic properties of Gd/Dy superlattices: Experiment and theory / R. E. Camley, J. Kwo, M. Hong, C. L. Chien // Phys. Rev. Lett. — 1990. — Vol. 64. — P. 2703.
4. Magnetic rare earth superlattices / C. F. Majkrzak, J. Kwo, M. Hong, Y. Yafet, D. Gibbs, C. L. Chien, J. Bohr // J. Adv. in Phys. — 1991. — Vol. 40. — P. 99—189.

5. Исследование магнитных металлических периодических структур методами рентгеновской диагностики и электронной микроскопии / Г. В. Пруцков, Ю. М. Чесноков, А. Л. Васильев, И. А. Лихачев, Э. М. Пашаев, И. А. Субботин // Кристаллография. — 2017. — № 6. — С. 965—969.
6. Lynn, J. F. Resonance effects in neutron scattering lengths of rare-earth nuclides / J. F. Lynn, P. A. Seeger // *At. Data and Nuc. Data tab.* — 1990. — Vol. 44. — P. 191—207.
7. Bjöeck, M. Fitting with differential evolution: an introduction and evaluation / M. Bjöeck // *J. Appl. Cryst.* — 2011. — Vol. 44. — P. 1198—1204.
8. The Parasusceptibility of Dysprosium / R. R. Herz, K. H. // *Phys. Status Solidi.* — 1978. — Vol. 47. — P. 451.
9. Competing interactions at the interface between ferromagnetic oxides revealed by spin-polarized neutron reflectometry / J. H. Kim, I. Vrejoiu, Y. Khaydukov, T. Keller, A. Stahn, D. K. Ruhm, V. Satapathy, V. Hinkov // *Phys. Rev. B.* — 2012. — Vol. 86. — P. 180402.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН тир. 100 зак. № 46
Объем 1 печ. л. Формат 60×84 1/16
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18