

Работа выполнена в Институте физики им. Л.В. Киренского
Сибирского Отделения Российской Академии Наук и
Институте естественных и гуманитарных наук
Сибирского Федерального Университета

На правах рукописи

Научный руководители
доктор физико-математических наук И.С. Эдельман

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук В.В. Слабко

доктор физико-математических наук П.Д. Ким

Ведущая организация Институт автоматики и
электротехники СО РАН

МАРКОВ ВЛАДИМИР ВИТАЛЬЕВИЧ

МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МАГНИТНОЕ
УПОРЯДОЧЕНИЕ В НАНОСТРУКТУРАХ
 $Dy_{(1-x)}Ni_x-Ni$ и $Dy_{(1-x)}(NiFe)_x-NiFe$

Специальность 01.04.11 –Физика магнитных явлений

Защита состоится «___» _____ 2007 года в _____ часов в конференц-
зале Института физики им. Л.В. Киренского на заседании Диссертационного
Совета Д.003.055.02 Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН по
адресу: 660036, Красноярск, Академгородок, Институт физики им. Л.В.
Киренского СО РАН.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики
им. Л.В. Киренского СО РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д.003.055.02 д.ф.-м.н. А.Н. Втюрин

Красноярск 2007

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Диспрозий относится к материалам с высоким магнитным насыщением, востребованным в самых различных областях техники. Магнитный момент трехвалентных ионов Dy 10.65 μ_B . Намагниченность насыщения диспрозия в ферромагнитной фазе (M_s) существенно превышает M_s железа: при 0 К $M_s(\text{Dy}) = 3000$ и $M_s(\text{Fe}) = 1720$ Гс. Диспрозий привлекает внимание исследователей в связи со сложной магнитной фазовой диаграммой и возможностями прикладного применения наноструктур, включающих диспрозий в сочетании с другими металлами, полупроводниками или диэлектриками. Несмотря на то, что магнитные свойства Dy представлены в классических работах и ряде монографий (например, [1, 2]), постоянно предпринимаются новые исследования, приводящие к более глубокому пониманию магнетизма этого металла [3].

Высокая чувствительность параметров фазовых переходов к качеству кристалла приводит к существенным изменениям магнитных свойств диспрозия при переходе к малым частицам [4] или тонким пленкам [5]. В настоящее время физика тонкопленочных слоистых структур, включающих 3d и 4f металлы, стала одной из наиболее бурно развивающихся областей магнетизма. В таких структурах ярко проявляются эффекты сильных электронных корреляций и формируются новые свойства и эффекты, не характерные для исходных компонент структуры (например, [6]). Одним из важных является вопрос о возможности изменения физических свойств 4f металла под влиянием спиновой системы 3d металла. В частности, ряд авторов наблюдали необычные магнитные эффекты в мультислоях Tb/Fe [7] и Gd/Fe [8]. В [9] наблюдалось повышение температуры перехода Dy в ферромагнитное состояние в мультислоях Dy/Fe. В ряде работ было отмечено магнитное упорядочение в тонких приграничных слоях 4f металла (толщиной 1.0-1.5 nm) под влиянием спиновой системы 3d металла [10].

Большие усилия были направлены на создание пленочных сред для магнитной записи и считывания информации на основе сплавов 3d и 4f металлов, в частности, аморфных сплавов с высокими значениями магнитооптического эффекта Керра (например, [11]). Было показано, что аморфные 3d - 4f сплавы представляют собой двух подрешеточные структуры с температурой компенсации намагниченности подобно редкоземельным ферритам. Магнитное упорядочение при комнатной температуре наблюдалось в сплавах, содержащих не менее 40 % 3d металла. Что касается Dy, то,

например, для сплава Dy-Co с 40% кобальта эффект Керра при комнатной температуре определяется только подрешеткой Co, а Dy вклада в этот эффект не дает [11].

Таким образом, исследования пленок Dy-3d металл, представленные в литературе, посвящены двум предельным случаям: (1) однородным сплавам, в основном, эквивалентных составов и (2) мультислойным пленкам с относительно резкими межслоевыми границами. Анализ результатов этих исследований позволяет ожидать появление новых физических свойств в более сложных структурах, включающих слои Dy с примесью 3d элементов, граничащие с однородным слоем соответствующего 3d металла. Именно исследованию таких структур посвящена настоящая работа. В качестве объектов исследования выбраны двухслойные пленки Ni (или NiFe), с одной стороны, и Dy, допированного этими 3d элементами, с другой стороны. При этом, концентрация переходных элементов в слое Dy была существенно ниже концентрации таких элементов в сплавах 4f-3d металлов, при которой наблюдалось магнитное упорядочение 4f подрешетки при комнатной температуре. Двухслойные пленки были выбраны для того, чтобы исключить влияние на измеряемые эффекты взаимодействия между слоями 3d металла, которое обычно имеет место в сэндвичах и мультислойных структурах. Основными измеряемыми эффектами были магнитооптические эффекты, линейные по намагниченности образца – магнитный круговой дихроизм (МКД), полярный и меридиональный эффекты Керра.

Целью работы являлось исследование магнитооптических свойств пленок Dy-Ni (NiFe) и $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x\text{-(NiFe)}_x\text{-Ni(NiFe)}$, выявление и объяснение эффектов, обусловленных влиянием примеси переходного элемента и атомного контакта со сплошным слоем 3d металла на магнитное состояние слоя диспрозия.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

- Изготовить образцы соответствующих составов с контролируемыми толщинами и концентрациями примеси в слое диспрозия.
- Исследовать распределение компонент по глубине образцов и их химическое состояние.
- Исследовать спектральные, температурные и полевые зависимости МКД, а также полевые и спектральные зависимости эффекта Керра при комнатной температуре в синтезированных образцах. Выделить из полученных экспериментальных кривых вклады, связанные со слоем диспрозия, допированного переходными элементами. Определить спектральные, температурные и концентрационные зависимости этих вкладов.
- Установить, как влияет примесь переходных элементов на магнитное состояние Dy в однослойных пленках и в двухслойных пленках при непосредственном контакте со слоем

3d металла. В случае обнаружения такого влияния установить зависимость последнего от концентрации 3d элемента, толщины и порядка нанесения слоев.

- Предложить качественное объяснение обнаруженных закономерностей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые получены температурные и спектральные зависимости магнитного кругового дихроизма однородных однослойных пленок Dy, Ni, Ni₈₀Fe₂₀;
- Обнаружено сильное влияние примеси 3d металла на температурную зависимость МКД в слоях Dy_{1-x}Ni_x и Dy_{1-x}(NiFe)_x в двухслойных пленках Dy_{1-x}Ni_x-Ni и Dy_{1-x}(NiFe)_x-NiFe, соответственно, имеющее пороговый характер по концентрации x . При $x \geq x_c$ во всем исследованном температурном интервале (80-300 К) этот слой дает постоянный вклад в МКД, приблизительно равный величине МКД, наблюдаемой в однослойной пленке Dy при $T < T_c$. В то же время температурная зависимость МКД однослойных пленок Dy_{1-x}Ni_x и Dy_{1-x}(NiFe)_x, а также слоев Dy в двухслойных пленках Dy-Ni и Dy-NiFe, при тех же значениях x соответствует температурной зависимости МКД пленок Dy без примеси 3d элементов.
- Впервые в слоях Dy_{1-x}Ni_x и Dy_{1-x}(NiFe)_x в двухслойных пленках Dy_{1-x}Ni_x-Ni и Dy_{1-x}(NiFe)_x-NiFe при комнатной температуре наблюдались полярный и меридиональный эффекты Керра. Эффекты имеют противоположный знак и иные полевые зависимости по сравнению с эффектами Керра в слое Ni.
- Обнаруженные особенности магнитооптических эффектов объяснены магнитным упорядочением слоев Dy_{1-x}Ni_x и Dy_{1-x}(NiFe)_x в двухслойных пленках Dy_{1-x}Ni_x-Ni и Dy_{1-x}(NiFe)_x-NiFe. Такого характера ферромагнитное упорядочение наблюдается вплоть до толщины слоя Dy, допированного 3d элементами, равной $\sim 600 \text{ \AA}$ при величине $x_c = 0.06$. Таким образом, впервые продемонстрирована возможность создания ферромагнитного порядка в слое Dy значительной толщины в результате одновременного действия двух факторов: включения 3d элементов в слой Dy и влияния сплошного соседнего слоя 3d металла. При этом, оба слоя в двухслойной структуре намагничены параллельно и характеризуются анизотропией типа легкая плоскость.

Практическая значимость

диссертационной работы заключается в том, что впервые предложен способ существенного повышения температуры фазового перехода Dy в ферромагнитное состояние в слоях значительной толщины (несколько десятков нанометров),

открывающий возможность создания эффективных тонкопленочных постоянных магнитов.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования температурных, спектральных и полевых зависимостей МКД, а также эффекта Керра в двухслойных пленках Dy_{1-x}Ni_x-Ni и Dy_{1-x}(NiFe)_x-NiFe в сравнении с аналогичными зависимостями МКД в двухслойных пленках Dy-Ni, Dy-NiFe, и однослойных пленках Dy_{1-x}Ni_x, Dy_{1-x}(NiFe)_x.
2. Объяснение обнаруженных особенностей МКД и эффекта Керра магнитным упорядочением слоя Dy_{1-x}Ni_x или Dy_{1-x}(NiFe)_x в двухслойных пленках вследствие одновременного влияния двух факторов – незначительной примеси переходного металла в слое диспрозия и контакта этого слоя со слоем переходного металла.
3. Механизм, предполагающий возникновение различия плотности состояний для электронов в слое Dy с различными направлениями спина по отношению к суммарной намагниченности слоя переходного металла.

Апробация работы

Основные результаты неоднократно докладывались на семинарах лаборатории физики магнитных явлений, были представлены на различных Международных, Российских и региональных конференциях, в том числе, на конференциях:

- Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism – 2001“, Ekaterinburg (2001)
- International Baikal Scientific Conference “Magnetic materials” Irkutsk (2001)
- Международный симпозиум “Фазовые превращения в твердых растворах и сплавах”, Сочи (2001)
- Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow, (2002)
- XVIII международная школа-семинар “Новые магнитные материалы микроэлектроники” Москва 2002,
- Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism - 2004”, Krasnoyarsk (2004).
- Решетневские чтения, Красноярск, сентябрь 2006г.

Личный вклад автора

заключается в участии совместно с руководителем в постановке задачи, выборе объектов исследования и их изготовлении, в самостоятельном проведении магнитооптических измерений, в обработке, анализе и интерпретации результатов, включая полученные и

другими экспериментальными методами, в участии в разработке механизма, объясняющего обнаруженное возникновение магнитного упорядочения пленки диспрозия, допированной переходными элементами.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ: 5 статей в периодических изданиях по списку ВАК, 10 работ в сборниках тезисов международных и всероссийских научных конференций и симпозиумов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 00-02-16098, 02-02-06734), Красноярского краевого фонда науки (№7F180), а также программы СО РАН Интеграция (грант № А0019).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 94 страницах, включает 46 рисунков и список литературы из 86 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации материалов диссертации и о личном вкладе автора. Описана структура диссертации.

Первая глава представляет собой обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию свойств диспрозия.

В параграфе 1.1 приведены основные экспериментальные данные по магнитным свойствам массивных кристаллов диспрозия.

В параграфе 1.2 рассматривается теория магнитных свойств редкоземельных металлов, в частности, диспрозия.

В параграфе 1.3. представлены данные об энергетической структуре и плотности электронных состояний Dy.

В параграфе 1.4 описано влияние дефектов структуры на магнитные свойства Dy

В параграфе 1.5 рассмотрены интерметаллические соединения РЗМ–3d металл

В параграфе 1.6 рассматриваются тонкоплёночные структуры РЗМ–3d металл

В параграфе 1.7. приведены результаты исследования магнитооптических эффектов в Dy.

Во второй главе описаны методика изготовления образцов, и методы исследования их свойств. Образцы изготавливались на модернизированной установке молекулярно-лучевой эпитаксии “Ангара”. Использовались заслонки, позволяющие получать на одной подложке, в одном цикле напыления, в совершенно идентичных условиях три образца: двухслойную пленку и две однослойные пленки из составляющих компонент. Толщины слоев изменялись от ~5 до ~12 nm для 3d металла и от ~5 до ~90 nm для Dy. Примесь 3d металла в слое Dy изменялась от 0 до 0.10. Суммарное количество каждой компоненты контролировалось с помощью рентгено-флуоресцентного анализа (РФА).

Распределение компонент по площади и глубине образцов определялось с помощью Оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Для анализа распределения элементов по поверхности и в глубину слоев использовалась также вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС). Также были получены рентгеновские фотоэмиссионные спектры (РФЭС) некоторых образцов.

В качестве основного метода исследования магнитного состояния образцов использовался магнитный круговой дихроизм (МКД), который представляет собой разность коэффициентов поглощения (или оптической плотности) для волн, поляризованных по правому и левому кругу по отношению к направлению намагниченности вещества, в котором они распространяются. МКД измерялся в спектральном диапазоне 350 – 650 nm. Магнитное поле было направлено нормально плоскости образцов и составляло 5 кЭ. Точность измерения МКД составляла $\pm 10^{-4}$. Охлаждение образцов производилось в интервале температур 80 – 300 К, температура контролировалась с точностью ± 1 К. При комнатной температуре измерялись полевые зависимости меридионального эффекта Керра (МЭК) в магнитном поле до 4 кЭ, направленном параллельно плоскости образцов, и полярного эффекта Керра (ПЭК) в магнитном поле до 14 кЭ, направленном по нормали к плоскости образцов.

Третья глава посвящена результатам исследования распределения компонент в образцах и их химического состояния.

В параграфе 3.1 представлены данные электронной Оже спектроскопии и вторичной ионной масс-спектрометрии о распределении элементов по глубине слоев. В связи с высокой химической активностью Dy значительное внимание уделялось проблеме кислорода и окисления слоя Dy. Приповерхностный слой диспрозия во всех случаях содержал много кислорода (отношение амплитуд Оже пиков кислорода и диспрозия $I_{O}/I_{Dy} \sim 2$), в средней части слоя диспрозия $I_{O}/I_{Dy} \sim 0.6$, что соответствует литературным данным для эталонных образцов монокристаллов диспрозия [12]. В тех случаях, когда не было дополнительного напыления Ni (NiFe) в слой диспрозия, интерфейс между слоями

довольно резкий, и содержание Ni в слое Dy незначительно (рис. 1 а). Оценка ширины интерфейса (с учетом зависимости выхода вторичных ионов от матрицы и конечной

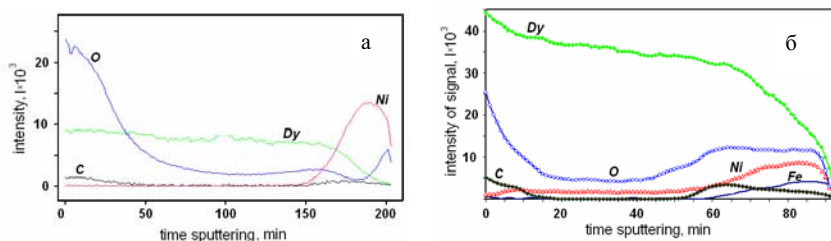


Рис. 1 Оже - профиль распределения компонент по глубине двухслойных пленок, снятый в процессе травления: а – Dy-Ni (толщина слоя Dy – 70 nm, Ni – 10 nm), б – Dy_(1-0.95)(NiFe)_{0.05}-NiFe (толщина слоя Dy_(1-0.95)(NiFe)_{0.05} – 63 nm, Ni – 6,5 nm.)

глубины травления ~3 nm), в которой концентрация противоположных компонент уменьшается примерно на порядок, составляет ~2 nm. В тех случаях, когда было дополнительное напыление Ni (NiFe) в слой диспрозия, граница между слоями NiFe и Dy_(1-x)(NiFe)_x менее четкая по сравнению с пленкой Ni-Dy. В переходном слое сигналы Ni и Fe (или Ni) уменьшаются примерно на порядок по сравнению с центральной частью слоя NiFe (или Ni) и далее остаются на одном уровне вплоть до верхней границы слоя диспрозия. Пример такого распределения показан на рис 1 б. Эти данные Оже-спектроскопии подтверждаются данными ВИМС. Характер распределения компонент не зависит от порядка нанесения слоев.

В параграфе 3.2 приведены данные исследования фотоэлектронных рентгеновских спектров. Сравнение РФЭ спектров слоев Dy с примесью 3d элементов в однослойных и двухслойных пленках не выявили заметного влияния слоя 3d металла на структуру полос

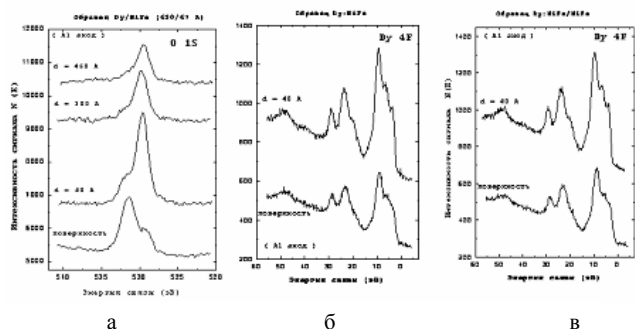


Рис. 2 Рентгеновские фото электронные спектры (при использовании Al анода): а – однослойной пленки Dy_(1-0.95)(NiFe)_{0.05}-NiFe, б – полученной в этом же цикле напыления двухслойной пленки Dy_(1-0.95)(NiFe)_{0.05}-NiFe-NiFe, и в – полосы 1s кислорода для пленки Dy_(1-0.95)(NiFe)_{0.05}-NiFe, снятые с различных глубин образцов.

Dy, как это демонстрируется рис. 2 а и б. Изменение структуры полос Dy и O по мере травления пленки показывает незначительную степень окисления Dy в глубине пленки. Особенно ярко это видно на спектрах O (рис 2 в).

Две компоненты O1s (1) и O1s(2), соответствуют двум различным состояниям кислорода с большей и меньшей энергией связи, соответственно. Интенсивность высокоэнергетической компоненты резко уменьшается и уже на глубине 40 Å компонента O1s(2) становится преобладающей. Соответствующая энергия связи близка к величине этой энергии 528-533.5 эВ в большинстве оксидов [13]. Можно предположить, что O1s(1) компонента обусловлена молекулами кислорода, адсорбированными поверхностью пленки. Компонента O1s(2) соответствует образованию окисла диспрозия, количество которого убывает по глубине в соответствии с общим количеством кислорода, фиксируемым с помощью Оже спектроскопии

Данные Оже спектроскопии, ВИМС и РФЭС подтвердили параметры пленок, задаваемые при их изготовлении. Исследованные двухслойные пленки можно разделить на две группы.

1. При напылении Dy не производилось одновременно напыление 3d металла. При этом образцы характеризовались сравнительно резким интерфейсом, в слое

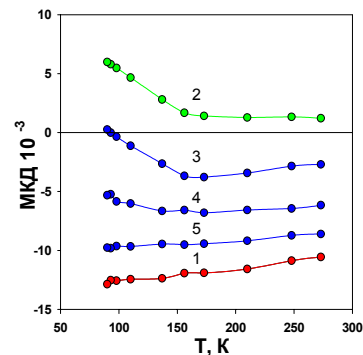


Рис. 3. Температурная зависимость МКД для образцов: Ni (кривая 1), Dy (кривая 2) и Ni-Dy_{1-x}Ni_x для x=0, 0.05, 0.06 (кривые 3-5, соответственно). λ=550 nm

диспрозия примеси переходного металла не превышали 0.001.

2. При напылении Dy производилось одновременно напыление 3d металла. При этом образцы характеризовались более широким интерфейсом, распределение атомов 3d металла по

глубине слоя Dy (вне интерфейса) достаточно однородное. Оценки концентрации 3d металла в центральной части слоя Dy соответствуют данным РФА. Поверхность пленок и приповерхностный слой диспрозия содержат много кислорода, в средней части слоя диспрозия количество кислорода приблизительно соответствует литературным данным для эталонных образцов монокристаллов диспрозия.

3. Кислород в пленках присутствует в двух состояниях. С глубины 40 Å преобладают состояния с меньшей энергией связи, а на поверхности – с большей.

Четвертая глава посвящена результатам исследования магнитооптические и магнитные свойства пленок.

Параграф 4.1 посвящен исследованию магнитного кругового дихроизма. Для всех исследованных металлов МКД ранее не измерялся. Полученные спектральные зависимости МКД Ni и NiFe хорошо коррелируют с представленными в литературе спектрами недиагональной компоненты тензора оптической проводимости σ_{xy} и полярного эффекта Керра. В исследованном спектральном интервале МКД обоих металлов имеет отрицательный знак.

МКД в исследованных пленках NiFe практически не зависит от температуры в интервале 80-300 К, что согласуется с известной температурной зависимостью намагниченности этого материала. Температурная зависимость МКД в тонких пленках Ni зависит от их толщины, а именно, наблюдается существенное возрастание МКД с понижением температуры, тем большее, чем меньше толщина пленок. Для пленки с минимальной использованной толщиной (~5 nm) при увеличении температуры от 80 до

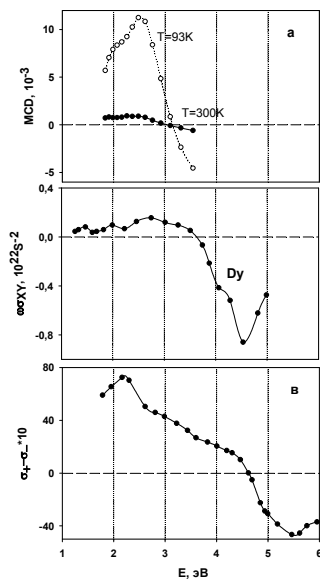


Рис. 4. а. – Спектры МКД пленки Dy, полученные в магнитном поле 5 кОе для 93 и 300 К; б. – Спектр недиагональной компоненты тензора оптической проводимости Dy [15] и в – разность оптических проводимостей для \pm электронов [16].

300 К МКД уменьшается почти вдвое. Такое температурное поведение МКД соответствует температурному поведению намагниченности тонких слоев Ni, наблюдаемому в [14]. Кривая 1 на рис 3 показывает температурную зависимость МКД пленки Ni толщиной 7 nm.

В исследованных в настоящей работе однослойных пленках Dy МКД значительной величины наблюдался при температурах ниже 100 К. Температурная зависимость МКД Dy представлена кривой 2 на рис. 3. Возрастание абсолютной величины МКД однослойной пленки Dy при понижении температуры соответствует появлению спонтанной намагниченности при фазовом переходе в ферромагнитное состояние. В исследованных однослойных пленках Dy абсолютная величина МКД пропорциональна толщине пленок, что свидетельствует об их металлическом состоянии по всей глубине. На рис. 4 а показан спектр МКД пленки диспрозия для 93 К и 300 К, снятый в магнитном поле 5 кЭ. Можно отметить следующие характерные особенности спектра: два широких перекрывающихся максимума в области ~ 2.6 и 2.1 эВ, смену знака при ~ 3.25 эВ и резкое возрастание абсолютной величины МКД при

дальнейшем увеличении энергии световой волны. Заметим, что в большей части исследованного спектрального интервала знаки МКД Ni и Dy противоположны. Наблюдаемые максимумы соответствуют максимумам на кривой недиагональной компоненты тензора оптической проводимости σ_{xy} , представленной в [15] (рис 4 б). В работе [16] предложена модель зонной структуры Dy с учетом расщепления спиновых подзон, в рамках которой рассчитаны спектры оптической проводимости для противоположно поляризованных спинов (рис 4 в). Оксидная фаза диспрозия, которая, несомненно, присутствует в пленках в некотором количестве, может давать вклад в МКД, на три-четыре порядка меньший по сравнению с магнитоупорядоченной ферромагнитной фазой металлического диспрозия.

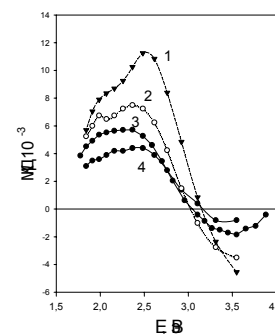


Рис. 5 Спектральные зависимости МКД пленок Dy_{1-x}Ni_x для $x=0, 0.005, 0.01, 0.015$, (кривые 1-4, соответственно). $T=93\text{K}$.

Затем рассматриваются однослойные пленки Dy_(1-x)Ni_x и Dy_(1-x)(NiFe)_x. Включение переходных металлов в состав однослойных пленок Dy в использованных концентрациях влияет на спектральную зависимость МКД, как это видно из ряда спектров, представленных на рис. 5. По мере возрастания концентрации переходного металла x сначала наблюдается перераспределение интенсивностей максимумов вблизи 2.6 и 2.1 эВ, их уширение и сдвиг к меньшим энергиям. Однако температурные зависимости МКД мало отличаются от температурных зависимостей МКД пленки Dy без примесей переходного металла.

Далее рассматриваются МКД в двухслойных пленках Dy-Ni и Dy-NiFe. На рис 3 показана температурная зависимость МКД для образцов, полученных в одном цикле напыления: однослойных пленок Ni (кривая 1), Dy (кривая 2) и двухслойной пленки Dy-Ni (кривая 3). Оже электронный профиль которой приведен на рис. 1 а. Слои Dy и Ni в данной двухслойной пленке, ведут себя, практически, независимо друг от друга. В интервале температур 150-300 К слой Dy не имеет магнитного порядка, поэтому МКД двухслойной пленки (рис.4, кривая 3) определяется слоем 3d металла. При понижении температуры слой Dy упорядочивается, и температурная зависимость МКД определяется независимыми вкладами обоих слоев. Так же и спектр МКД двухслойной пленки Dy-Ni совпадает с суммой спектров однослойных пленок Ni и Dy, изготовленных в одном цикле с двухслойной пленкой. Подобное поведение наблюдается для всех двухслойных пленок Dy-Ni и Dy-NiFe.

Совершенно иная температурная зависимость МКД наблюдается в случае, когда пленка Dy с примесью Ni (или NiFe) находится в непосредственном контакте с магнитоупорядоченной пленкой. При этом температурное поведение МКД сильно зависит от величины x . При $x < 0.01$ МКД двухслойной пленки представляет собой сумму независимых вкладов обоих слоев подобно пленке Dy-Ni. При значении $x \approx 0.05$ величина МКД двухслойной пленки (рис.3, кривая 4) заметно отличается от суммы МКД отдельных слоев Ni (кривая 1) и Dy_{0.95}Ni_{0.05} (совпадает с кривой 2). По мере возрастания x сходство между температурными зависимостями МКД двухслойных пленок Ni-Dy_{1-x}Ni_x и суммы МКД соответствующих (по составу) однослойных пленок становится еще меньше. При $x = 0.06$ (рис 3, кривая 5) температурная зависимость МКД двухслойной пленки (с толщиной слоя Dy_{0.94}Ni_{0.06}, равной 60nm) полностью повторяет температурную зависимость МКД слоя Ni. Абсолютная величина МКД такой двухслойной пленки при комнатной температуре меньше МКД слоя никеля приблизительно на величину МКД однослойной пленки Dy, наблюдаемую при $T < T_C$. Подобное поведение наблюдается для всех двухслойных пленок с толщиной слоя Dy_{1-x}Ni_x или Dy_{1-x}(NiFe)_x до 60 nm, независимо от порядка нанесения слоев. При большей толщине слоя Dy с примесью 3d элементов в двухслойной пленке появляется температурная зависимость МКД, связанная с частью этого слоя, удаленной от слоя 3d металла.

Таким образом, примесь Ni или NiFe в слое Dy оказывает существенное влияние на температурное поведение МКД только в том случае, когда этот слой находится в контакте со сплошным слоем Ni или NiFe. Пороговая концентрация Ni в Dy, при которой полностью теряется сходство между температурными зависимостями МКД двухслойной пленки Ni-Dy и двухслойной пленки Ni-Dy_{1-x}Ni_x (при толщине слоя Dy_{1-x}Ni_x до 60 nm) составляет $x_0 \sim 0.06$. При этом температурная зависимость МКД двухслойной пленки соответствует температурной зависимости МКД однослойной пленки Ni, а величина МКД двухслойной пленки существенно меньше МКД пленки Ni. Можно было бы предположить, что подобное поведение МКД связано просто с диффузией Dy в слой Ni и уменьшением вследствие этого МКД слоя Ni. Для выяснения этого вопроса были проведены эксперименты по окислению пленок. Окисление производилось одновременным нагреванием в атмосфере до 200° С трех образцов, изготовленных в одном цикле: однослойной пленки Dy с примесью 3d металла (Dy_{0.94}Ni_{0.06}), однослойной пленки 3d металла (Ni) и двухслойной пленки этих двух компонент (Ni-Dy_{0.94}Ni_{0.06}). Нагревание проводилось до тех пор, пока однослойная пленка Dy с примесью не становилась полностью прозрачной. Поглощение пленки 3d металла и МКД при таком нагревании не изменялись, а величина, спектральный ход и температурная зависимость

МКД двухслойной пленки после окисления Dy становились такими же, как в однослойной пленке соответствующего 3d металла. Этот эксперимент позволяет предположить, что изменение МКД в двухслойной пленке связано с тем, что в слое Dy_{0.94}Ni_{0.06} при $T \gg T_C$ Dy наблюдается МКД противоположного по сравнению с 3d металлом знака и довольно большой величины. Этот вывод подтверждается и спектральными данными. Например, спектральная зависимость разности МКД двухслойной пленки Dy_{0.94}Ni_{0.06}-Ni и соответствующей пленки Ni, измеренных при комнатной температуре, аналогична спектру МКД однослойной пленки Dy_{0.94}Ni_{0.06}, полученному при $T = 90$ К.

По результатам измерения МКД можно сделать следующие выводы. МКД диспрозия имеет противоположный по отношению к МКД 3d металлов знак в области 380-750 nm, а его спектральная зависимость характеризуется наличием двойного максимума в районе 525 nm и сменой знака при ~ 380 nm. Включение переходных металлов в состав однослойных пленок Dy в использованных концентрациях приводит к уширению максимумов.

Температурная зависимость МКД однослойных пленок Dy, а так же пленок Dy_{1-x}NiFe_x или Dy_{1-x}Ni_x аналогична температурной зависимости в мелкокристаллических массивных образцах Dy.

МКД двухслойных пленок представляют собой сумму двух независимых вкладов: слоя Ni или NiFe и слоя Dy_{1-x}NiFe_x или Dy_{1-x}Ni_x. При этом свойства диспрозия, допированного Ni или NiFe, принципиально зависят от величины x . При концентрации 3d металла в слое Dy, превышающей пороговое ($x = 0.06$) значение, в интервале температур 80-300 К слой Dy_{1-x}NiFe_x или Dy_{1-x}Ni_x дает вклад в МКД, равный величине МКД, наблюдаемой в соответствующей однослойной пленке при температурах, меньших температуры перехода в ферромагнитное состояние. Наблюдаемое явление не зависит от порядка нанесения слоев, оно распространяется на глубину слоя Dy ~ 600 Å.

В параграфе 4.2. представлены данные по полярному и меридиональному эффектам Керра. В отличие от МКД, который отражает интегральный эффект от обоих слоев в двухслойной структуре, измерения МЭК и ПЭК дают представление о каждом слое в отдельности. В отличие от МКД, который отражает интегральный эффект от обоих слоев в двухслойной структуре, измерения ПЭК и МЭК дают представление о каждом слое в отдельности. При отражении света от однослойных пленок Dy и Dy_{1-x}Ni_x (или Dy_{1-x}(NiFe)_x), а также от слоя Dy в двухслойных пленках Dy-Ni (Dy-NiFe) при комнатной температуре ни ПЭК, ни МЭК не наблюдаются. И только в тех случаях, когда свет отражается от слоя Dy_{1-x}Ni_x или Dy_{1-x}(NiFe)_x возможно наблюдение эффектов Керра при комнатной температуре. На рис. 6 а, б показаны снятые при комнатной температуре

полевые зависимости ПЭК при отражении света от однослойной пленки Ni и от слоя $Du_{0.95}Ni_{0.05}$ в двухслойной пленке, изготовленных в одном технологическом цикле.

Различные знаки, величины и характер полевых зависимостей ПЭК в двух рассмотренных случаях не оставляют сомнения в том, что слой $Du_{0.94}Ni_{0.06}$ в двухслойной пленке дает при

комнатной температуре независимый вклад конечной величины в ПЭК, что может иметь место только при магнитном упорядочении этого слоя. В случае изолированной пленки Ni полевая зависимость ПЭК характерна для пленок с анизотропией типа «легкая плоскость», а величина поля насыщения 4.5 кОе приблизительно соответствует намагниченности Ni: при 278 К $M_s = 480$ Gs. В случае пленки $Du_{0.94}Ni_{0.06}$, осажденной на Ni, насыщение не достигается вплоть до максимального использованного поля 14 кОе. M_s монокристалла Du в ферромагнитной фазе, как упоминалось во введении, близко к 3000 Gs, соответствующее поле насыщения должно существенно превышать величину магнитного поля, использованного при измерении ПЭК, что и наблюдается в эксперименте. Приведенная на рис. 6 б полевая зависимость может быть объяснена тем, что наряду с сигналом от верхнего слоя $Du_{0.94}Ni_{0.06}$, наблюдается значительно ослабленный (из-за поглощения света в вышележащем слое $Du_{0.94}Ni_{0.06}$) сигнал противоположного знака от ниже лежащего слоя Ni. Поле насыщения для этого вклада соответствует полю насыщения изолированной пленки Ni.

Схематически образование кривой на рис. 6 б, как суммы двух кривых с разными весами, показано на рис. 6 с. Таким образом, слои в двухслойной пленке ведут себя в магнитном поле независимо друг от друга, каждый со своей намагниченностью, то

есть, слой $Du_{0.94}Ni_{0.06}$ при комнатной температуре является магнитоупорядоченным с величиной намагниченности, в несколько раз превышающей намагниченность слоя Ni. Аналогичные полевые зависимости ПЭК имеют место и для двухслойных пленок $Du_{1-x}(NiFe)_x-NiFe$.

Данные МЭК, так же как и ПЭК, полностью подтверждают вывод о вкладе слоев диспрозия с примесями Ni или NiFe в магнитооптические свойства двухслойных пленок при комнатной температуре. Резкое различие полевых зависимостей ПЭК и МЭК - отсутствие гистерезиса и большая величина поля насыщения в случае ПЭК и гистерезис в

случае МЭК - свидетельствуют о наличии в обоих слоях анизотропии типа легкая плоскость и о существенном различии намагниченности слоев.

Появление магнитооптических эффектов конечной величины при температурах, существенно превышающих температуру ферромагнитного упорядочения массивного кристалла Du, может быть обусловлено только возникновением магнитного порядка в слое Du с примесью 3d элементов в двухслойной пленке. При этом магнитный момент слоя $Du_{1-x}Ni_x$ в исследованной ситуации параллелен магнитному моменту слоя Ni, а его величина превышает величину магнитного момента слоя Ni, по крайней мере, в 4 раза.

В параграфе 4.3 обсуждаются возможные механизмы, объясняющие влияние Ni на магнитное состояние слоя Du.

Сравнение данных Оже-спектроскопии с результатами магнитооптических экспериментов, включая эксперимент с нагреванием образцов, показывает, что включения Ni или NiFe в слой Du существенно изменяют его магнитное поведение. Можно было бы предположить, что эти изменения обусловлены переходным слоем толщиной ~ 3 nm с высокой концентрацией Ni или NiFe. Однако в таком случае не было бы пропорциональности между величиной вклада слоя $Du_{1-x}Ni_x$ в МКД при комнатной температуре и толщиной этого слоя, которая наблюдается в действительности. Можно также предположить, что концентрация Ni или NiFe по всей глубине слоя Du достаточна для формирования в слое $Du_{1-x}Ni_x$ или в его локальных участках магнитного момента при комнатной температуре за счет формирования ферромагнитной фазы. Это предположение противоречит температурным зависимостям МКД однослойных пленок $Du_{1-x}Ni_x$ и $Du_x(NiFe)_{1-x}$, с одной стороны, и литературным данным о магнитном упорядочении сплавов редкоземельный металл - 3d металл при комнатной температуре при концентрации последнего не менее $x \sim 0.4$.

Наблюдаемые полевые зависимости ПЭК и МЭК позволяют отвергнуть предположение о магнитоэпитаксиальном происхождении упорядочения в слоях $Du_{(1-x)}Ni_x$ или $Du_x(NiFe)_{1-x}$. К тому же, если бы слой Du просто намагничивался в магнитном поле слоев Ni или NiFe, непонятно, почему это не происходит в двухслойных пленках Ni-Du или NiFe-Du. По-видимому, в рассматриваемом случае нельзя говорить также и об изменении магнитного состояния слоя $Du_{(1-x)}Ni_x$ в двухслойной пленке вследствие магнитоэпитаксии подобно механизму, предложенному в [17], так как эти пленки не являются эпитаксиальными. Кроме того, обнаруженные особенности не зависят от порядка нанесения слоев. Включение атомов Ni или NiFe, естественно, вызывает изменение параметров структуры пленок из-за различных атомных и ионных радиусов ($r=1.773\text{\AA}$ для Du 1.07\AA для Du^{3+} , 1.25\AA для Ni, 0.72\AA для Ni^{2+} , 1.26\AA для Fe и 0.67\AA , 0.80\AA для Fe^{3+}

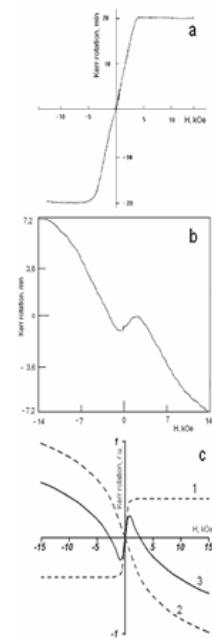


Рис.6 Полевые зависимости полярного эффекта Керра для образцов: а – Ni, б – $Du_{0.94}Ni_{0.06}$ и в – схема, поясняющая форму кривой б

Fe²⁺), и приводит к появлению напряжений. В принципе, большая величина спин-орбитальной связи в Dy и конкуренция обменных взаимодействий в различных координационных сферах могут привести к тому, что такие искажения повлияют на магнитную структуру Dy_{1-x}NiFe_x (Dy_{1-x}Ni_x). Однако в этом случае магнитное упорядочение пленки Dy_{1-x}NiFe_x (Dy_{1-x}Ni_x) должно было бы наблюдаться и в отсутствие контактирующей с ней пленки 3d металла, что противоречит экспериментальным данным.

Таким образом, ни один из выше упомянутых механизмов не может приводить к

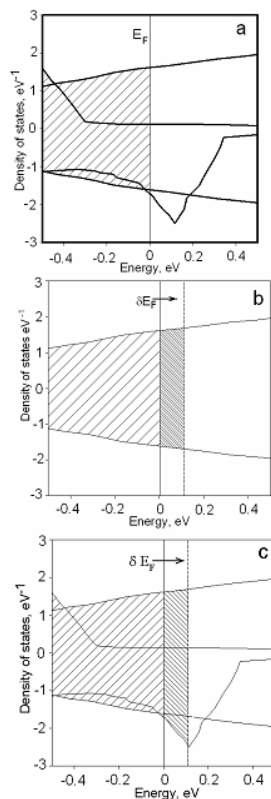


Схема плотности состояний вблизи уровня Ферми для: а – сплава Dy_{1-x}Ni_x, б – двухслойной пленки Dy-Ni и с – двухслойной пленки Ni-Dy_{1-x}Ni_x.

магнитному упорядочению слоя сплава в указанных концентрациях в двухслойных пленках. Можно заключить, что необычное поведение магнитной системы диспрозия связано с одновременным действием двух факторов: влиянием контакта с 3d металлом и включением атомов 3d элементов в невысоких концентрациях по всей глубине слоя Dy. Каждый из этих факторов по отдельности не может привести к магнитному упорядочению Dy при высоких температурах в слоях значительной толщины.

Как известно, магнитная структура тяжелых РЗ металлов, в том числе, диспрозия определяется, в основном, обменным взаимодействием электронов проводимости с 4f электронами. Косвенное обменное взаимодействие через электроны проводимости приводит к упорядочению 4f электронов с большим магнитным моментом. Электроны проводимости характеризуются зонным обменным взаимодействием I, величина которого недостаточна для выполнения критерия Стонера $IN(\epsilon_F) > 1$. Поэтому электроны проводимости Dy сами не упорядочены и в магнитном отношении ведут себя, как парамагнитная система в эффективном поле, создаваемом 4f электронами.

При внедрении атомов Ni в слой Dy происходят изменения в системе электронов проводимости. Мы

предлагаем следующий механизм этих изменений. В духе модели виртуального кристалла опишем плотность состояний сплава Dy_{1-x}Ni_x, в виде

$$N(E) = (1-x) N_{Dy}(E) + x N_{Ni}(E).$$

Для Dy плотность состояний в окрестности уровня Ферми не имеет особенностей и определяется в основном 5d электронами с малым подмешиванием 6 s, p электронов [18, 19]. Для Ni имеется узкий заполненный пик для «+» электронов (спин «вверх») и также узкий незаполненный пик для «-» электронов со спином «вниз» [20]. Схема плотности состояний сплава показана на рис. 7 а, при построении которого мы приравняли уровни Ферми обеих компонент сплава. Как и в металлическом Ni, в сплаве Dy_{1-x}Ni_x в данной модели имеется узкий заполненный пик со спином «вверх» и пустой сразу выше ϵ_F со спином «вниз». Для двухслойной пленки Dy-Ni за счет контакта со слоем Ni и диффузии атомов Ni в глубину Dy концентрация электронов в Dy возрастает, и уровень Ферми сдвигается (рис. 7 б), однако из-за отсутствия особенностей в плотности состояний Dy на масштабе ~0.1 eV в окрестности ϵ_F этот сдвиг несущественно меняет $N(\epsilon_F)$. Таким образом, и в первом и во втором случаях безразмерный параметр зонного обменного взаимодействия $IN(\epsilon_F)$ мало изменяется по сравнению с обменом Dy.

Когда мы имеем одновременно и контакт со слоем Ni (т.е., сдвиг химпотенциала), и внедренные атомы Ni в сплаве Dy_{1-x}Ni_x (формирующие узкий пик плотности состояний вблизи ϵ_F), то с ростом ϵ_F при определенной концентрации x химпотенциал попадает на узкий пик $N_{\downarrow}(\epsilon_F)$ (рис. 7 с), параметр Стонера увеличивается. Наблюдаемый ферромагнетизм при 300 К в слое Dy_{1-x}Ni_x на подложке Ni может быть объяснен как следствие выполнения критерия Стонера $IN(\epsilon_F) > 1$, в результате чего электроны проводимости также упорядочиваются, наряду с 4f электронами. Таким образом, Ni, как компонента сплава, подготавливает плотность состояний с особенностями вблизи уровня Ферми в сплаве, а диффузия атомов из слоя Ni приводит к заполнению этой особенности и изменению магнитных свойств слоя Dy_{1-x}Ni_x при выполнении критерия Стонера.

В Заключение кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

- Исследованы магнитные и магнитооптические свойства двухслойных пленок 3d металл-диспрозий, допированный переходными 3d-металлами, в зависимости от природы 3d металла, толщин слоев, концентрации 3d атомов в Dy и порядка нанесения слоев.
- Обнаружено сильное влияние примеси 3d металла на температурную зависимость магнитного кругового дихроизма в слое Dy_{1-x}Ni_x в двухслойных пленках Dy_{1-x}Ni_x-Ni, имеющее пороговый характер по концентрации x. При $x \geq x_c$ во всем исследованном температурном интервале (80-300 К) этот слой дает постоянный вклад в магнитный круговой дихроизм, приблизительно равный величине магнитного кругового дихроизма, наблюдаемого в однослойной пленке Dy при температурах, меньших температуры

перехода Dy в ферромагнитное состояние ($T_C \sim 90\text{K}$). Аналогичное явление имеет место для двухслойных пленок $\text{Dy}_{1-x}(\text{NiFe})_x\text{-NiFe}$.

- Впервые в слое $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x$ в двухслойных пленках $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x\text{-Ni}$ при комнатной температуре наблюдались меридиональный и полярный эффекты Керра, имеющие противоположный знак по сравнению с эффектом Керра в слое Ni. Аналогичное явление имеет место для двухслойных пленок $\text{Dy}_{1-x}(\text{NiFe})_x\text{-NiFe}$.

- Обнаруженные особенности магнитооптических эффектов объяснены магнитным упорядочением слоя $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x$ ($\text{Dy}_{1-x}(\text{NiFe})_x$) в двухслойных пленках $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x\text{-Ni}$ ($\text{Dy}_{1-x}(\text{NiFe})_x\text{-NiFe}$). Такого характера ферромагнитное упорядочение наблюдается вплоть до толщины слоя $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x$ равной $\sim 600 \text{ \AA}$ при величине $x_c \sim 0.05$. Впервые продемонстрирована возможность создания при комнатной температуре ферромагнитного порядка в слое Dy значительной толщины в результате одновременного действия двух факторов: включения Ni в слой Dy и влияния сплошного соседнего слоя Ni. Оба слоя в двухслойной структуре намагничены параллельно и характеризуются анизотропией типа легкая плоскость.

- предложен механизм, объясняющий влияние Ni на магнитное состояние слоя Dy.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. И.С.Эдельман, А.Е.Худяков, В.Н.Заблуда В.В.Марков, О.Б.Романова Магнитное упорядочение Dy в двухслойных пленках NiFe-Dy // Письма в ЖЭТФ – 1998 – Т.67.в.5 – С.322-325.
2. И. С. Эдельман, В. В. Марков, В. Г. Кеслер, А. С. Паршин, А. Е. Худяков, Р. Д. Иванцов, Г. В. Бондаренко, И. П. Ронжин, С. Г. Овчинников, Магнитооптические эффекты и Оже-спектроскопия двухслойных пленок NiFe-Dy, Fe-Dy с неоднородными слоями. // ФММ – 2001 – Т.91, №3 – С.60-68.
3. V.V.Markov, V.G.Kesler, A.E.Khudyakov, I.S.Edelman, G.V.Bondarenko Magnetic circular dichroism in NiFe(Fe)-Dy bilayers. J.Magn.Mater.233(2001) 248-256.
4. Эдельман И.С., Марков В.В., Овчинников С.Г., Худяков А.Е., Заблуда В.Н., Кеслер В.Г., Бондаренко Г.В. Влияние Ni на магнитное состояние Dy в двухслойных пленках $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x\text{-Ni}$. // ФТТ – 2003 – Т.45 – С.1423-1429.
5. С.Г. Овчинников, И.С. Эдельман, В.В. Марков, В.А. Середкин, Механизм магнитного упорядочения в двухслойных пленках $\text{Dy}_{1-x}\text{Ni}_x\text{-Ni}$. // ФТТ – 2007 – Т.49, в.5 – С.854-858.
6. И.С.Эдельман В.В.Марков А.Е.Худяков Р.Д.Иванцов *Температурная зависимость магнитного кругового дихроизма в двухслойных пленках ПМ-Dy.* // Тезисы докладов XVI международной школы-семинара Часть II С.408-409.
7. I.Edelman A.Khudyakov V.Zabluda 3rd International Symposium on Metallic Multilayers (MML '98) *Magnetic circular dichroism in NiFe-Dy bilayers.*
8. I.S.Edelman, A.E.Khudyakov, N.M.Zabluda, R.D.Ivantsov, V.G.Kesler. Abs. Moscow international symposium on magnetism Moscow June 20-24 1999 p.156 *Magnetic ordering of Dy in 3d metal-Dy bilayer.s*

9. I. Edelman, S. Ovchinnikov, V. Markov, V. Kesler, A. Parshin, A. Khudyakov, V. Yakovchuk Magneto-optical effects in dysprosium in bi-layer Dy-3d metal films. Abstract book of EASTMAG – 2001, Ekaterinburg 2001, p.40.
10. V.V.Markov, V.G.Kesler, A.E.Khudyakov¹, I.S.Edelman¹, G.V.Bondarenko, X-ray photoemission spectroscopy of Dy in layered structures, Abstract Book of Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism”, Krasnoyarsk 2004, p. 228.

Цитируемая литература

1. К.П. Белов. Редкоземельные магнетики и их применение. М:Наука, 1980г, 245 с.
2. С.А. Никитин. Магнитные свойства редкоземельных металлов и сплавов. М:Издательство Московского Университета, 1989г, 248 с.
3. A. S. Chernyshov, A. O. Tsokol, A. M. Tishin, et al. Magnetic and magnetocaloric properties and the magnetic phase diagram of single-crystal Dysprosium// Phys. Rev. B – 2005 – v.71 – p.184410-1-184417.
4. Ч.Я. Мулюков, Г.Ф. Корзникова, С.А. Никитин. Влияние структурного состояния на температурную зависимость намагниченности диспрозия// ФТТ – 1995 – Т.37 – С.2481-2486.
5. Y. Ufuktepe. The localization of electrons in the band structure of Dy with film thickness// J. Phys.: Condens. Matter. – 1993 – v.5 – p.213-216.
6. С.Г. Овчинников. Использование синхротронного излучения для исследования магнитных материалов// УФН – 1999г. – Т.169 – №8 – С.869-887.
7. Z.S.Shan, D. and D. J. Sellmyer. Magnetism of rare-earth-transition-metal nanoscale multilayers// Phys.Rev.B 1990 – p.4210433.
8. Y.Kamiguchi, Y. Hayakawa, and H. Fujimori. Anomalous field dependence of magnetoresistance in Fe/Gd multilayered ferrimagnets// Appl.Phys.Lett. 1989 – v.55 – p.1918.
9. K. Yoden, N. Hosoi, K. Kawaguchi et al. Magnetic Properties of Fe/Dy Artificial Superstructured Films// Japan J. Appl. Phys. 1988 – v.27 – p.1680.
10. B.Scholz, R.A. Braud, and W. Kenne. Direct evidence for interface-induced perpendicular spin orientation and spin reorientation in terbium-coated thin iron films// Phys. Rev. B 1994 – v.50 – p.2537-2547.
11. Honda S., Yoshiyama M. Magneto-optical Kerr rotation and sublattice moments in RE-Co sputtered films // Japanese J.Appl.Phys. 1988 – v.27 – № 9 – p.1687-1692.
12. Davis. L.E., MacDonald N.C., Palmberg P.W., Riach G.E., Weber R.E. Handbook of Auger Electron Spectroscopy, 2 nd edition. Physical Electronics Industries Inc., Eden Prarie, Minn. 1976.
13. T.L. Barr, Modern ESCA, The Principles and Practice of X-Ray Photo-electronic Spectroscopy, CRS Press, Boca Raton, FL, USA, 1994.
14. P. Pouloupoulos, K. Baberschke. Magnetism in thin films// J. Phys.: Condensed Matter, 11, 495 (1999)
15. J.L. Erskine, G.A. Blake, C.J. Flaten. Optical properties of Gd, Dy, and Tb// Opt.Soc.Amer. 1974 – v.64 – №10 – p.1332.
16. Ю.В. Князев, М.М. Носков. Оптические свойства гадолиния, самария и диспрозия в спектральном интервале 1,13-3,96 эв// ФММ – 1970 – Т.30, №1 – С.214.
17. C. Carbone, R. Rochov, L. Braicovich et al. Electronic and magnetic coupling between rare-earth adatoms and the Fe(001) surface// Phys. Rev. B 1990 – v.41 – p.3866.
18. S.C. Keeton, T.L. Loucks. Electronic Structure of Rare-Earth Metals. I. Relativistic Augmented-Plane-Wave Calculations// Phys Rev 1968 – v.168 – p.1249.
19. Schneider W. Molodtsov S.L., M. Richter et al. Structure and electronic properties of ordered rare-earth (Ce,Dy)-transition-metal (Pd,Rh) surface compounds// Phys. Rev. B 1998 – v.57 – p.14930.
20. A.I. Lichtenstein, M.I. Katsnelson. Finite-Temperature Magnetism of Transition Metals: An ab initio Dynamical Mean-Field Theory// Phys. Rev. Lett. 2001 – v.87 – p.67205.

Подписано в печать 11.05.2007
Формат 60x85/16
Усл. печ. л. 1 Тираж 70 Заказ № 31

Отпечатано в типографии Института физики СО РАН
660036 Красноярск, Академгородок, ИФ СО РАН