

На правах рукописи



Домантовский Александр Григорьевич

**Особенности микроструктуры, электрических и магнитных свойств
металлов, полученных с помощью протонного восстановления
тонких пленок оксидов металлов**

01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Институте реакторных материалов и технологий
Российского научного центра «Курчатовский институт»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гурович Борис Аронович,
РНИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Залужный Александр Георгиевич,
МИФИ (ГУ), г. Москва
кандидат технических наук, профессор
Шкарбан Игорь Иванович,
МАИ (ГТУ), г. Москва

Ведущая организация: Институт физической химии и электрохимии
им. А.Н. Фрумкина РАН

Защита состоится 22 апреля 2009 г. в 16-30 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.130.04 при МИФИ (ГУ)
по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ
Автореферат разослан 19 февраля 2009 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации, по адресу МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
МИФИ, д.ф.-м.н., профессор



И.И. Чернов

Актуальность темы. Прогресс в области создания новых типов памяти, различных сенсоров, в том числе и биологических, функциональных изделий электроники и т.п. связан с разработкой технологий и методов, позволяющих создавать на подложке пространственную структуру («рисунок»), образованную областями с разным химическим составом и/или физическими свойствами. Определяющим при создании подобных структур является разработка методов, позволяющих целенаправленным образом локально (на заданных участках) менять свойства материалов в тонких поверхностных слоях.

Основой такого метода могут служить результаты работ, выполненных в течение последних 10 лет коллективом под руководством профессора Б.А. Гуровича в РНЦ «Курчатовский институт». Физическая сущность разрабатываемого метода заключается в следующем. При облучении многоатомного материала ускоренными частицами могут быть созданы такие условия облучения (масса, энергия частиц), при которых происходят эффективные смещения и удаление из зоны облучения материала только атомов *одного* сорта. Селективность удаления атомов сохраняется и в том случае, когда энергия частиц пучка достаточна для смещения нескольких сортов атомов в многоатомных соединениях. В этом случае селективное удаление обусловлено разными скоростями смещения разных атомов. Это подтверждается многочисленными экспериментами, в которых максимальная передаваемая энергия была заведомо выше пороговой для обоих сортов атомов в двухатомных соединениях.

В ходе проведенных в РНЦ «Курчатовский институт» экспериментов установлено, что для большого числа материалов можно выбрать такие условия ионного облучения, при которых происходит практически полное удаление атомов определенного сорта на всю глубину проективного пробега ионов. Так, при облучении оксидов металлов протонами с энергией несколько кэВ атомы кислорода могут быть практически полностью удалены из слоя исходной толщины ~100 нм и более. С помощью локального восстановления металлов из оксидов под действием протонного облучения созданы упорядоченные магнитные среды с поверхностной плотностью элементов, превышающей 100 Гбит/дюйм² и достигнуто пространственное разрешение 15 нм; на основе восстановления W из WO₃ предложен способ формирования потенциальных рельефов в полупроводниковом материале, позволяющий создавать элементы электроники наномасштабных размеров и др.

Для того, чтобы создавать различные функциональные устройства с помощью селективного удаления кислорода под действием протонного облучения, необходимо изучить особенности микроструктуры и свойств металлов, полученных восстановлением из оксидов, а также разработать способы управления этими свойствами и методы создания микро- и наноструктур заданной геометрии.

Работа является составной частью комплексного исследования эффектов радикального изменения состава и свойств многокомпонентных материалов под воздействием ионного облучения, проводимого в РНЦ «Курчатовский институт» коллективом под руководством профессора Гуровича Б.А, поддержана грантом РФФИ (06-080-08046-офи) и лотом федерального агентства по науке и

инновациям в рамках государственного контракта № 02.513.11.3192.

Целью работы явилось выявление закономерностей фазовых превращений, изменений химического состава, электрических и магнитных свойств, происходящих в тонких пленках оксидов металлов при протонном облучении, способы управления микроструктурными и магнитными свойствами восстановленных металлов и разработка способа создания структур заданной геометрии, основанного на локальном удалении атомов кислорода из оксидов.

В качестве **объектов исследования** в работе использованы оксиды следующих металлов: Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Ta, W, Pt, Bi.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**.

1. Изучены состав и микроструктура тонких пленок оксидов металлов до и после облучения протонами с энергией 1-5 кэВ.
2. Исследовано влияние дополнительного верхнего слоя из SiO₂ на микроструктуру и магнитные свойства восстановленных металлов.
3. Изучено влияние деформации подложки в процессе протонного облучения на коэрцитивную силу и коэффициент прямоугольности кривых магнитного гистерезиса восстановленных ферромагнитных металлов.
4. Разработана методика определения объемных изменений в тонких пленках, сопровождающих процесс восстановления металла из его оксида под воздействием протонного облучения.
5. На основе особенностей, сопровождающих процесс восстановления металлов, разработаны способы изготовления металлических структур заданной геометрии и изучены геометрические и магнитные свойства изготовленных структур.

Научная новизна диссертационной работы.

1. При исследовании тонких пленок оксидов металлов впервые установлено, что облучение протонами с энергией около 1 кэВ приводит к восстановлению металлов из соответствующих оксидов, при этом толщина металлического слоя может достигать десятки нанометров.
2. Впервые проведено исследование микроструктуры пленок металлов, полученных восстановлением из соответствующих оксидов под действием протонного облучения.
3. Впервые показано, что наличие на поверхности исходного оксида металла дополнительного слоя из SiO₂, не испытывающего превращений в процессе облучения, является эффективным способом управления средним размером зерна и магнитными свойствами восстановленного металла.
4. Впервые показано, что восстановление ферромагнитного металла из оксида на упругодеформированной подложке позволяет получить ферромагнитные пленки с наведенной магнитной анизотропией и большим значением коэффициента прямоугольности петли гистерезиса вдоль оси легкого намагничивания.
5. Впервые проведено систематическое экспериментальное определение объемных изменений в тонких пленках, сопровождающих процесс восстановления металлов под действием протонного облучения.
6. Предложен новый метод создания микро- и наноструктур, позволяющий

получать на подложке металлические структуры заданной геометрии.

Практическая ценность диссертационной работы.

1. Полученные данные о микроструктуре, электрических и магнитных свойствах облученных пленок оксидов металлов позволяют выбирать режимы протонного облучения и толщины исходных оксидов металлов, необходимые для восстановления металлов при создании таких функциональных структур, как новые типы магнитной памяти, различные типы сенсоров и т.д. Например, отработанные в работе режимы протонного облучения и изученные магнитные свойства облученных тонких пленок Co_3O_4 позволили изготовить прототип новой сверхплотной среды для магнитной записи с плотностью >100 Гбит/дюйм².
2. Используемые в работе режимы протонного облучения и способы управления свойствами восстановленных металлов позволяют разрабатывать методы получения материалов с заданными структурными и магнитными свойствами.

Таким образом, полученные результаты представляют не только научный, но и практический интерес, т.к. способствуют разработке новой технологии, основанной на локальном изменении химического состава и свойств тонких слоев материалов под воздействием протонного облучения.

В ходе выполнения работы получено 2 патента Российской Федерации.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты воздействия протонного облучения с энергией ~ 1 кэВ на кристаллическую структуру, полиморфизм и размер зерна широкого круга металлов, восстановленных из соответствующих оксидов.
2. Дозовые зависимости электрических и магнитных свойств оксидов металлов, подвергнутых облучению протонами с энергией ~ 1 кэВ.
3. Влияние дополнительного верхнего слоя из SiO_2 , не испытывающего превращений в процессе облучения, на микроструктуру и магнитные свойства металлов, восстановленных из соответствующих оксидов под действием протонного облучения.
4. Результаты определения объемных изменений в тонких пленках, сопровождающих процесс восстановления металлов из соответствующих оксидов при протонном облучении.
5. Влияние упругой деформации подложки в процессе протонного облучения на свойства ферромагнитной пленки.
6. Способ создания микро- и наноразмерных структур заданной геометрии, основанный на локальном удалении атомов кислорода из оксидов и геометрические и магнитные свойства структур, полученных этим методом.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения. Диссертация изложена на 152 листах, содержит 66 рисунков, 11 таблиц, список использованной литературы из 123 наименований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 2-й научно-технической конференции «Электроника, микро- и наноэлектроника» (Суздаль, Россия, 2000); International Confe-

rence "Micro- and nanoelectronics-2003" (Moscow-Zvenigorod, Russia, 2003); Научной сессии МИФИ-2003 (Москва, Россия, 2003); IV национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Москва, Россия, 2003); XIV Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел (Черноголовка, Россия, 2005); International Conference "Micro- and nanoelectronics-2005" (Moscow-Zvenigorod, Russia, 2005); V национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Москва, Россия, 2005); International Conference "Micro- and nanoelectronics-2007" (Moscow-Zvenigorod, Russia, 2007); 6th International Conferences on Fine Particle Magnetism (Rome, Italy, 2007); 18-й международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Москва-Звенигород, Россия, 2007; XIII национальной конференции по росту кристаллов (Москва, Россия, 2008).

Личный вклад. Автором лично проведены исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии и электронографии, стилусной профилометрии, выполнены измерения магнитных свойств. Результаты исследований с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии получены совместно с к.ф.-м.н. Маслаковым К.И. Автор принимал непосредственное участие в исследовании и интерпретации электрических свойств восстановленных металлов, а также изготовлении металлических структур заданной геометрии и исследовании их геометрических и магнитных свойств.

Достоверность результатов, полученных в данной работе, определяется применением взаимодополняющих современных экспериментальных методов, воспроизводимостью результатов, сравнением полученных экспериментальных результатов с теоретическими оценками и литературными данными.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 7 статей в журналах, рекомендованных ВАК, и 2 патента Российской Федерации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** отражена общая характеристика работы, обоснованы актуальность темы и выбор объектов проведенного исследования, поставлена цель работы, сформулированы научная новизна, практическая ценность полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе**, посвященной анализу литературных данных, рассмотрены факторы, определяющие изменение состава поверхностных слоев многокомпонентных материалов при облучении ускоренными частицами в отсутствие имплантации. Основное внимание уделено результатам, свидетельствующим о том, что при облучении ионами с энергией порядка 1 кэВ наблюдается уменьшение концентрации легкого компонента в поверхностных слоях материалов. Отмечается, что описанные в литературе эффекты, обусловленные физическим распылением, малы – толщина слоя, в котором концентрация легкого компонента уменьшается на порядок и более, не превышает ~1 нм. С другой стороны, в работах, выполненных в РНЦ «Курчатовский институт» группой

профессора Гуровича Б.А., показано, что при облучении оксидов металлов протонами с энергией 1-5 кэВ полное удаление кислорода происходит из слоев начальной толщины до 100 нм.

Во **второй главе** рассмотрены методики приготовления образцов и источники протонного облучения, методы исследования состава, микроструктуры, топографии, электрических и магнитных свойств материалов.

Исходные пленки оксидов металлов толщиной 10-250 нм изготовлены на установках ионно-плазменного распыления, разработанных в РНЦ "Курчатовский институт". Осаждение пленок проводилось при давлении распыляющего газа (смесь криптона и кислорода) около 10^{-3} Па при комнатной температуре подложки.

Для облучения протонами в работе использовались два источника ионов. Первый является источником с холодными электродами. Он разработан и изготовлен в РНЦ «Курчатовский институт» и позволяет проводить облучение при плотности тока ~ 100 мкА/см². Источник протонов второго типа представляет собой ионную пушку ISE 10 («Omicron», Германия) с плотностью тока на образце ~ 10 мкА/см², установленную в высоковакуумной установке Microlab MKII («VG Scientific», Великобритания). Основной массив экспериментальных данных получен для материалов, облученных протонами с энергией 1-5 кэВ в диапазоне доз 10^{16} – 10^{19} ион/см², хотя в отдельных случаях использовались протоны с меньшей энергией. В большинстве случаев облучение проводилось в высоком вакууме (давление остаточных газов не превышало $5 \cdot 10^{-6}$ Па), когда эффекты реактивного (химического) распыления и облучения ионами кислорода и азота сведены к минимуму.

Электронно-микроскопические исследования выполнены на микроскопах TEMSCAN-100CX и TEMSCAN-200CX («JEOL», Япония). Исследования «на просвет» проводилось на пленках, осажденных на кристаллы NaCl с предварительно нанесенным тонким (~ 5 нм) слоем SiO₂ или углерода (в ряде случаев проводилось осаждение пленок на свежие сколы NaCl).

Изучение химического состава осажденных и облученных пленок, а также изменение химического состояния элементов после облучения проводилось методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на приборе Microlab MKII. При проведении измерений в камере спектрометра давление остаточных газов не превышало 10^{-8} Па.

Влияние протонного облучения на магнитные свойства оксидов ферромагнитных металлов изучалось с помощью вибрационного магнитометра BHV-50 («RIKEN DENSHI Co», Япония). Изучались следующие характеристики: намагниченность насыщения (M_s), остаточная намагниченность (M_r), коэрцитивная сила (H_c), а также наличие магнитной анизотропии в плоскости пленки.

Построение дозовых зависимостей электросопротивления проводилось с помощью мегомметра Е6-17 (Россия), позволяющего измерять электрическое сопротивление в диапазоне от 10 Ом до 30 ГОм.

Для определения толщины исходных и облученных пленок в работе использовался механический (стилусный) профилометр Alfa-Step 200 («Tencor Instruments», США), позволяющий измерять ступеньки высотой более 3 нм.

Исследования поверхности пленок до и после облучения протонами проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), а изучение магнитных структур – методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 («NT-MDT», Россия).

В **третьей главе** приведены результаты изучения состава, микроструктуры, электрических и магнитных свойств исходных и облученных протонами оксидов металлов.

Влияние протонного облучения на состав и микроструктуру материалов. Химический состав осажденных пленок определялся на основе анализа рентгеновских фотоэлектронных спектров и картин дифракции электронов (табл. 1). Состав оксидов Pt, Nb и Ta определялся только с помощью РФЭС.

Таблица 1

Состав и особенности микроструктуры пленок оксидов металлов до и после протонного облучения.

До облучения			После протонного облучения ($E=2$ кэВ)		
Исходный материал	Структура	Толщина оксида, нм	Доза облучения, ион/см ²	Конечный материал	Структура
Fe ₂ O ₃	К	80	$4 \cdot 10^{18}$	Fe	К, ОЦК ^P
Co ₃ O ₄	К	80	$5 \cdot 10^{18}$	Co	К, ГПУ ^P
NiO	К	80	$1 \cdot 10^{18}$	Ni	К, ГЦК ^P
CuO	К	120	$7 \cdot 10^{17}$	Cu	К, ГЦК ^P
MoO ₃	А	40	$9 \cdot 10^{18}$	Mo	К, ГЦК ^{НП}
WO ₃	А	40	$9 \cdot 10^{18}$	W	К, ГЦК ^{НП}
PtO _{1,1}	А	120	$5 \cdot 10^{16}$	Pt	К, ГЦК ^P
BiO ₂	А	80	$7 \cdot 10^{17}$	Bi	К, ромбоэдрич. ^P

Примечание. К – кристаллическая, А – квазиаморфная, ^P – равновесная кристаллическая модификация, соответствующая данному металлу в массивном состоянии при комнатной температуре, ^{НП} – неравновесная полиморфная модификация.

Установлено, что облучение протонами с энергией 1-5 кэВ, в целом, одинаковым образом влияет на химический состав и микроструктуру материалов: в результате протонного облучения происходит *селективное удаление атомов кислорода* из оксида и образование чистого металла. Согласно электронографическим данным, в процессе облучения происходит уменьшение интенсивности линий, отвечающих исходным оксидам. Одновременно с этим появляются новые дифракционные кольца, отвечающие оксидам с меньшим (по сравнению с исходными материалами) содержанием кислорода. С увеличением дозы облучения на электронограммах появляется система дифракционных колец, отвечающая восстановленному *чистому металлу*.

С помощью электронографии установлено, что во всех случаях, за исключением Mo и W, образуются металлические фазы, имеющие такую же кристаллическую структуру, что и соответствующий металл в массивном состоянии (табл. 1). Как правило, кристаллиты новой металлической фазы ориентированы изотропно, т.е. текстура отсутствует.

При восстановлении Mo и W из соответствующих оксидов образуются неравновесные полиморфные модификации металлов с гранцентрированной кубической решеткой. Параметр кристаллической решетки ГЦК-фазы, определенный из электронограмм, оказался равным: $a_{Mo}=0,418\pm 0,004$ нм, $a_W=0,414\pm 0,004$ нм. Эти параметры совпадают с литературными данными для тонких пленок соответствующих металлов, полученных распылением мишеней из чистых металлов.

Согласно результатам РФЭС, с увеличением дозы облучения происходит относительное уменьшение площади пиков кислорода и увеличение пиков металла, что также указывает на протекание процесса восстановления металла из оксида при облучении протонами. Восстановление подтверждается и спектрами высокого разрешения отдельных линий. В качестве примера на рис. 1 приведены обзорные РФЭС спектры для пленки Fe_2O_3 до и после протонного облучения, свидетельствующие о восстановлении металла.

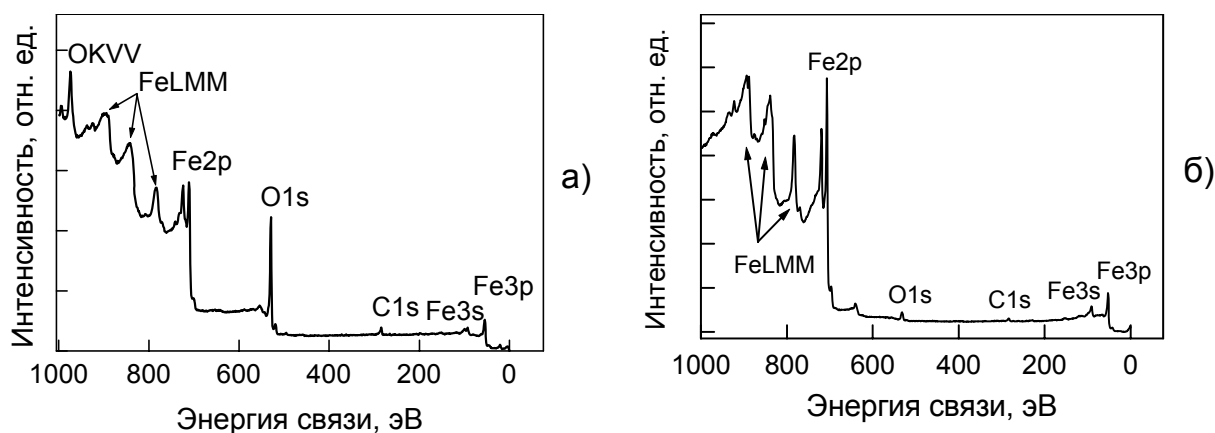


Рис. 1. Обзорные фотоэлектронные спектры для пленки Fe_2O_3 толщиной 20 нм до (а) и после (б) облучения протонами с энергией 2 кэВ до дозы $2 \cdot 10^{18}$ ион/см².

Для оксидов металлов, облученных протонами с энергией 2 кэВ, определены минимальные дозы, при которых пленка оксида указанной в табл. 1 толщины полностью превращается в металл, т.е. на электронограммах не обнаруживаются «лишние» линии, кроме отвечающих восстановленному металлу, а на рентгеновских фотоэлектронных спектрах, полученных с помощью профилирования по глубине, практически отсутствует линия кислорода.

В результате электронно-микроскопических исследований установлено, что размер зерна восстановленного металла существенно зависит от материала. Согласно результатам анализа электронно-микроскопических изображений, чем выше температура плавления металла, тем меньше размер зерна металлической пленки, образующейся после протонного облучения оксида. Для материала с минимальной температурой плавления (Bi, $T_{пл}=544$ К) пленка состоит из кристаллитов со средним размером около 50 нм (максимальный размер зерна составляет ~ 150 нм), в то время как для материала с максимальной температурой плавления (W, $T_{пл}=3693$ К) максимальный размер зерна не превышает 8 нм (рис. 2).

Такая зависимость размера зерна в пленках восстановленных металлов, по-видимому, связана со следующим. Восстановление металлов из оксидов

происходит при температурах около 300 К, что существенно ниже температуры кристаллизации соответствующих массивных металлов. В результате формирование металлической пленки происходит в условиях большого переохлаждения, благодаря чему пленка находится в активированном состоянии. Чем ниже температура плавления, тем интенсивнее протекают процессы рекристаллизации восстановленного металла.

Поскольку энергия протонов достаточна для смещения не только атомов кислорода, но и атомов металла, это приводит к тому, что температура начала рекристаллизации в пленке оказывается ниже соответствующей температуры для массивного металла. Это обуславливает рост больших зерен, хорошо заметный для пленок Вi.

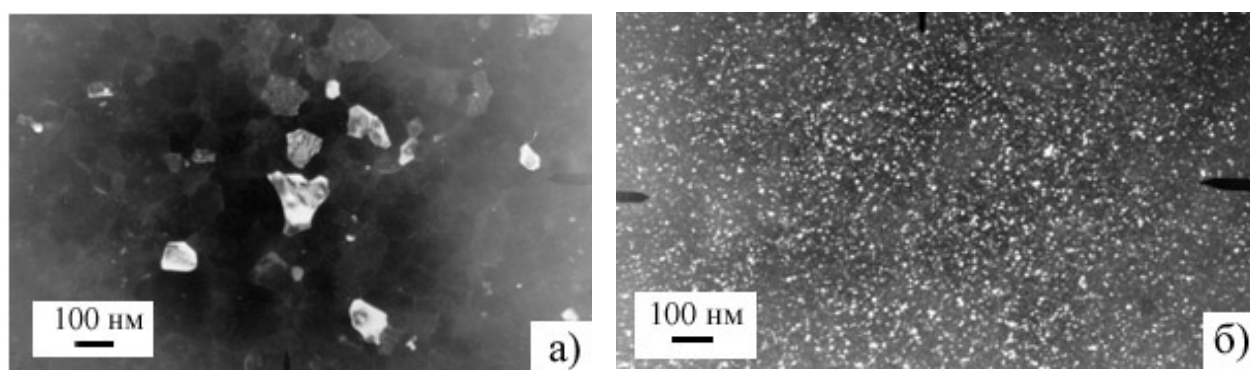


Рис. 2. Микроструктура восстановленных пленок Вi (а – темное поле, доза $4 \cdot 10^{17}$ ион/см²) и W (б – темное поле, доза $3 \cdot 10^{18}$ ион/см²) после облучения протонами с энергией 3 кэВ. Исходная толщина пленок оксидов равна 40 нм.

Влияние верхнего слоя SiO_2 на микроструктуру и свойства материалов. В работе изучено влияние дополнительного верхнего слоя SiO_2 , не испытывающего превращений в процессе протонного облучения, на микроструктуру и свойства восстановленных металлов. Использование дополнительных слоев представляет большой практический интерес, поскольку такой слой может выступать, например, в качестве защиты от окисления восстановленного металла. Установлено, что процесс восстановления происходит и при наличии на поверхности дополнительного слоя. Результаты микроструктурных исследований, а также измерения электропроводности и магнитных свойств, свидетельствуют о том, что тонкий (3–5 нм) слой SiO_2 практически не влияет на скорость восстановления, т.е. полное восстановление происходит при такой же дозе протонов, что и для незакрытой пленки. С увеличением толщины верхнего слоя доза, необходимая для полного восстановления, увеличивается. Так, для пленок Co_3O_4 толщиной 80 нм при наличии сверху дополнительного слоя SiO_2 толщиной 10 нм доза, необходимая для полного восстановления, увеличивается в ~ 2 раза по сравнению с незакрытой пленкой.

Для пленок CuO исходной толщины 40 нм изучено влияние дополнительного верхнего слоя SiO_2 толщиной 5 нм на размер зерна восстановленной меди. В случае открытой пленки, когда дополнительный слой отсутствует, средний размер зерна меди составляет 14 ± 3 нм. Наличие верхнего слоя SiO_2 приводит к тому, что средний размер зерна уменьшается до 7 ± 3 нм (рис. 3).

Зависимость среднего размера зерна от наличия слоя SiO_2 обусловлена, ве-

роятно, тем, что дополнительный верхний слой сдерживает рост кристаллов новой фазы (восстановленной меди), понижая тем самым полную энергию системы.

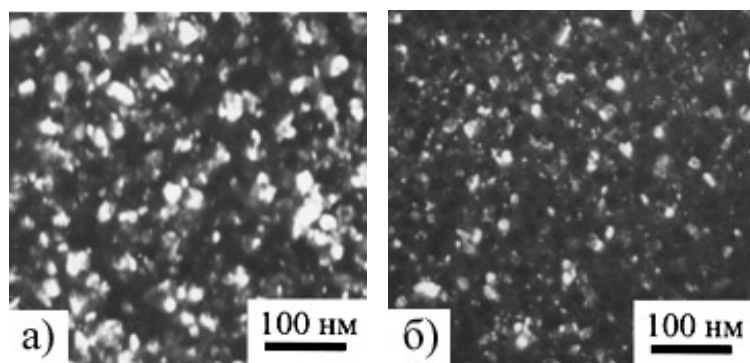


Рис. 3. Микроструктура восстановленных пленок Cu (а – открытая пленка, б – дополнительный верхний слой из SiO₂ толщиной 5 нм) после облучения протонами с энергией 2 кэВ до дозы $7 \cdot 10^{17}$ ион/см². Исходная толщина пленок CuO равна 40 нм.

Определение объемных изменений материалов. Поскольку восстановление металла из оксида сопровождается значительными объемными изменениями из-за удаления до 75% исходных атомов из материала, в работе выполнено экспериментальное определение величины этих изменений (усадки).

Количественно усадку материала (S) можно определить как относительное изменение (уменьшение) объема восстановленного металла по сравнению с объемом исходного оксида:

$$S = \frac{V_{\text{оксид}} - V_{\text{металл}}}{V_{\text{оксид}}} = 1 - \frac{V_{\text{металл}}}{V_{\text{оксид}}}. \quad (1)$$

В случае, когда превращение оксид → чистый металл происходит в пленке, имеющей хорошую адгезию к подложке, экспериментально установлено, что изменения линейных размеров в плоскости пленки *отсутствуют*. Облученная (восстановленная) металлическая пленка имеет такую же площадь, что и пленка исходного оксида металла, т.е. меняется только один размер - *толщина* пленки. Следовательно, усадку можно определить с помощью отношения толщин металла и оксида.

Если толщина исходной пленки оксида D , тогда толщина облученной протонами пленки будет $d = D - h$, где h – величина ступеньки на границе между облученным и необлученным участком. Знание величин D и h позволяет определить усадку S :

$$S_{\text{экс}} = \frac{D - d}{D} = \frac{h}{D}. \quad (2)$$

Теоретическое значение усадки можно определить, зная параметры кристаллической структуры исходной (оксид) и конечной (чистый металл) фазы. В предположении, что распыление металлических атомов отсутствует*, и имеет место полное удаление атомов кислорода, величину S можно определить сле-

*В исследованном диапазоне доз и энергий протонов физическое распыление металлов мало: выполненные эксперименты и теоретические оценки показывают, что толщина распыленного слоя металла не превышает ~1 нм. Поэтому, здесь и далее предполагается, что эффектами физического распыления металла можно пренебречь.

дующим образом:

$$S_{теор} = 1 - \frac{V_{металл}}{V_{оксид}} = 1 - \frac{\rho_1 N_2}{\rho_2 N_1}, \quad (3)$$

где ρ_1 и ρ_2 средняя атомная плотность оксида и соответствующего металла, а N_1 и N_2 – общее число атомов оксида и металла соответственно.

Типичная профилограмма приведена на рис. 4, на которой участкам оксида, закрытым маской в процессе облучения, отвечают «выступающие» участки профилограммы. Установлено, что для всех материалов имеет место хорошее (с точностью, не хуже 10 %) совпадение теоретических и экспериментальных значений усадки (табл. 2). Мерой экспериментальной ошибки в табл. 2 является среднеквадратичное отклонение среднего.

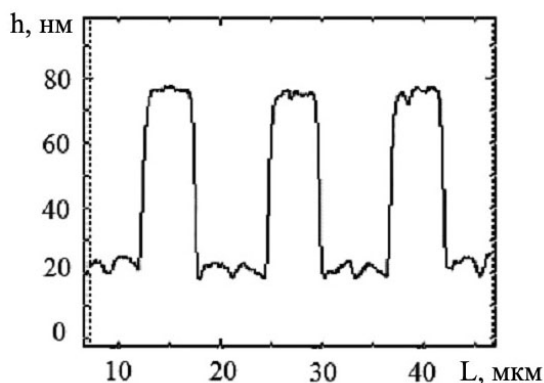


Рис. 4. Профилограмма для измерения усадки, полученная для пленки Co_3O_4 толщиной 80 нм после облучения протонами с энергией $E=3$ кэВ до дозы $5 \cdot 10^{18}$ ион/см². Высота «ступеньки» $h=48$ нм.

В тех случаях, когда $S_{теор}$ превышало $S_{эксп}$ более чем на 10-15%, имело место *неполное* удаление атомов кислорода из объема материала. Это проявлялось в том, что на электронограммах помимо линий металла обнаруживались линии, отвечающие оксиду, а на фотоэлектронных спектрах присутствовали линии кислорода меньшей (по сравнению с исходным оксидом) интенсивности.

Таблица 2

Сравнение теоретических и экспериментальных значений усадки для пленок исходной толщины 40 нм. Энергия протонов $E=2$ кэВ.

Материал	Доза протонного облучения, ион/см ²	$S_{теор}$	$S_{эксп}$
Fe_2O_3	$3 \cdot 10^{18}$	0,53	$0,51 \pm 0,04$
Co_3O_4	$3 \cdot 10^{18}$	0,64	$0,62 \pm 0,05$
NiO	$1 \cdot 10^{18}$	0,38	$0,39 \pm 0,03$
CuO	$2 \cdot 10^{17}$	0,41	$0,38 \pm 0,03$
MoO_3	$9 \cdot 10^{18}$	0,69	$0,63 \pm 0,07$
WO_3	$9 \cdot 10^{18}$	0,66	$0,63 \pm 0,07$
$\text{PtO}_{1,1}$	$5 \cdot 10^{16}$	0,39	$0,38 \pm 0,03$
BiO_2	$7 \cdot 10^{17}$	0,16	$0,16 \pm 0,01$

Примечание. Для оксида платины использованы справочные данные для PtO.

Для всех материалов, приведенных в табл. 2, дозовая зависимость усадки представляет собой монотонно возрастающую функцию, выходящую на насыщение при больших дозах. В исходном состоянии $S=0$, а в конце превращения (при полном удалении атомов кислорода из всего объема материала) S возрастает до значений, определяемых формулой (3). Это позволило с помощью измерения ступеньки на границе между облученной и необлученной областями оценивать полноту восстановления: чем меньше отличие $S_{эксн}$ от $S_{теор}$, тем больше полнота восстановления.

Влияние протонного облучения на электропроводность материалов.

По характеру поведения все дозовые зависимости электросопротивления можно разделить на 2 группы. К первой относятся материалы, имеющие относительно невысокие ($\leq 10^3$ Ом·см) значения удельного электросопротивления исходных оксидов: CuO, NiO, Co₃O₄ (кроме PtO_{1,1}). Для этих материалов электросопротивление сначала возрастает, проходит через максимум, а затем монотонно уменьшается с увеличением дозы облучения. Для остальных материалов дозовые зависимости носят монотонно убывающий характер. На рис. 5 приведены зависимости обоих типов. Для облученных пленок на минимуме дозовых зависимостей получены температурные зависимости электросопротивления. Экстраполяция температурных зависимостей к нулевой температуре ($T=0$ К) четко демонстрирует *ненулевое* значение остаточной проводимости. Это однозначно доказывает *металлический* характер проводимости облученных пленок.

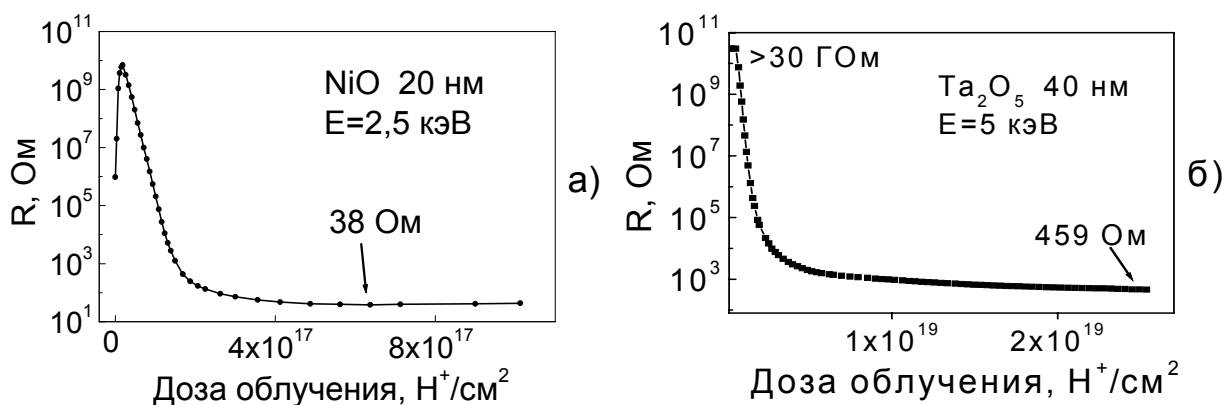


Рис. 5. Дозовые зависимости электрического сопротивления пленок NiO (а) и Ta₂O₅ (б).

Для всех восстановленных металлов величина удельного электросопротивления на минимуме дозовых зависимостей принимает значения, характерные для тонких металлических пленок в аморфном или нанокристаллическом состоянии (~ 10 - 100 мкОм·см), однако существенно превышающие табличные значения для массивных чистых металлов (табл. 3).

Большая величина абсолютных значений удельного электросопротивления, обусловлена, по-видимому, тем, что размер зерна восстановленных металлических пленок (за исключением Pt и Vi) не превышает 10-20 нм. При столь малых размерах зерен вклад в электрическое сопротивление дают межзеренные границы, и основной величиной, определяющей отличие от табличных значений, оказывается размер зерна восстановленного металла.

Значения удельного электросопротивления пленок восстановленных ме-

таллов больше, чем у пленок осажденных чистых металлов такой же толщины, причем отличие максимально для тугоплавких металлов (см. табл. 3). Согласно результатам электронно-микроскопических исследований, в осажденных пленках средний размер зерна несколько больше, что и обуславливает меньшие значения удельного электросопротивления.

Таблица 3

Удельное электрическое сопротивление металлических пленок толщиной 20 нм, полученных восстановлением из оксида и осаждением чистого металла.

Металл	Удельное электрическое сопротивление при 293К, мкОм·см			Температура плавления, К
	Восстановленный металл	Осажденный чистый металл	Массивный чистый металл	
Bi	170	120	120	544
Cu	10	9	1,7	1356
Ni	160	70	7,3	1726
Co	80	62	6,1	1765
Fe	140	-	9,7	1811
Pt	14	-	10,7	2045
Nb	700	-	16,2	2741
Mo	250	65	5,6	2893
Ta	400	-	14,1	3269
W	650	133	5,5	3693

Примечание. Относительная погрешность определения удельного электрического сопротивления восстановленных металлов не превышает 30%.

Влияние протонного облучения на магнитные свойства. Оксиды ферромагнитных металлов (Fe, Co, Ni) в исходном состоянии не обладают спонтанным магнитным моментом. Для этих материалов дозовые зависимости намагниченности насыщения ведут себя похожим образом: M_s монотонно возрастает с увеличением дозы облучения, достигая максимального значения. Установлено, что для пленок достаточно малой толщины (≤ 100 нм в случае Co_3O_4) максимум на дозовой зависимости отвечает намагниченности насыщения чистого металла, который образуется при полном удалении атомов кислорода из соответствующего оксида. В этом случае толщина облученной пленки d принимает минимальное значение и определяется формулой $d=D \cdot (1-S)$, где D – толщина пленки исходного оксида, S – усадка, а численное значение намагниченности насыщения равно табличному значению для массивного чистого металла.

При изучении магнитных свойств образцов, закрытых сверху дополнительным слоем SiO_2 , обнаружено, что коэрцитивная сила восстановленных металлов сильно зависит от его наличия. В случае, если на поверхности пленки Co_3O_4 толщиной 80 нм присутствует слой SiO_2 толщиной 5 нм, коэрцитивная

сила восстановленного Co возрастает до 370 Э^* по сравнению со 150 Э для открытой пленки.

Причина такого значительного увеличения коэрцитивной силы не вполне ясна. Отметим лишь, что коэрцитивная сила ферромагнетика является структурно-чувствительной характеристикой и может зависеть как от среднего размера зерна в пленке, так и ряда других факторов.

Создание магнитной анизотропии и повышение коэффициента прямоугольности пленок восстановленного Co . Для проверки возможности управления магнитными свойствами выполнены эксперименты по облучению пленок Co_3O_4 , находящихся в процессе облучения на упругодеформированных подложках из полиимида. Показано, что восстановление металла на упругодеформированной подложке позволяет получать пленки с наведенной магнитной анизотропией. На рис. 6, а приведены типичные кривые магнитного гистерезиса, полученные на подложке, упругодеформированной в процессе облучения. Установлено, что вдоль направления деформации направлена ось трудного намагничивания, а в перпендикулярном направлении – ось легкого намагничивания. Обращают на себя внимание высокие значения коэффициента прямоугольности $s=M_r/M_s$ для направления легкого намагничивания: $s=0,95-0,97$.

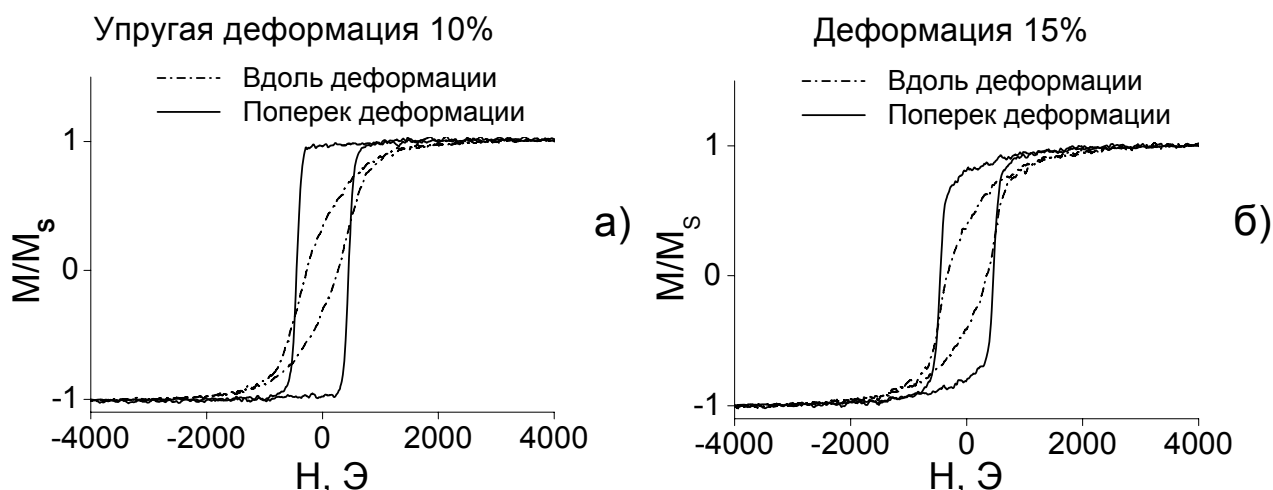


Рис. 6. Кривые магнитного гистерезиса для пленки Co , полученной восстановлением из Co_3O_4 толщиной 40 нм : а – деформация (упругая) подложки в процессе облучения равна 10% , в направлении, перпендикулярном деформации, $H_c=450 \text{ Э}$, $s=0,96$; б – деформация (упругая+пластическая) подложки в процессе облучения равна 15% , в направлении, перпендикулярном деформации, $H_c=460 \text{ Э}$, $s=0,8$.

Установлено, что определяющим для получения материала с высоким значением s является упругая деформация подложки в процессе облучения. В том случае, когда в процессе облучения подложка была деформирована не только упруго, но и пластически, значения коэффициента прямоугольности оказывались заметно ниже. На рис. 6, б приведена типичная кривая гистерезиса для случая, когда в процессе облучения подложка деформировалась пластически. В этом случае значения коэффициента прямоугольности уменьшаются до

* $1 \text{ Э} = 79,6 \text{ А/м}$

$s=0,8$, хотя H_c вдоль оси легкого намагничивания оказывается почти независимой от величины деформации подложки в диапазоне деформаций от 2 до 15%.

Влияние температуры облучения на скорость процессов восстановления. Для изучения влияния температуры облучения на скорость восстановления металлов получены дозовые зависимости электрических и магнитных свойств в диапазоне температур 300-500 К (эксперименты проведены совместно с к.ф.-м.н. Приходько К.Е.). Установлено, что, независимо от типа дозовой зависимости электросопротивления (функция с максимумом или монотонно убывающая функция), с повышением температуры облучения монотонно увеличивается скорость восстановления металла из оксида. В частности, достижение минимального значения электросопротивления достигается при меньших дозах.

Определение скорости восстановления при помощи измерения электрического сопротивления имеет недостаток, поскольку не позволяет точно определить минимально необходимую дозу для реализации полного превращения в пленке на всю толщину. Это обусловлено планарной схемой электрических измерений, в которой слои материала, в которых прошло восстановление металла, имеют высокую электрическую проводимость и шунтируют остальной материал.

Более точным является построение дозовой зависимости намагниченности насыщения, поскольку в этом случае сигнал регистрируется от всего объема пленки. На рис. 7 показаны дозовые зависимости намагниченности насыщения пленок Co_3O_4 при двух различных температурах облучения. На рис. 7 по оси ординат отложено отношение M и M_S , где M – намагниченность насыщения пленки после облучения в течение времени t , а M_S – максимальное значение намагниченности, соответствующее удалению кислорода из всего объема пленки. Как видно из рис. 7, в случае облучения при температуре $T=500$ К, достижение максимального значения намагниченности происходит при дозе в ~ 3 раза меньшей, чем при комнатной температуре. С другой стороны, анализ начальных участков дозовых зависимостей намагниченности также свидетельствует о том, что скорость роста намагниченности (тангенс угла наклона начального участка кривой) при облучении при 500 К в ~ 3 раза больше. Это позволяет утверждать, что для Co_3O_4 увеличение температуры облучения на 200 К приводит к увеличению скорости восстановления в ~ 3 раза.

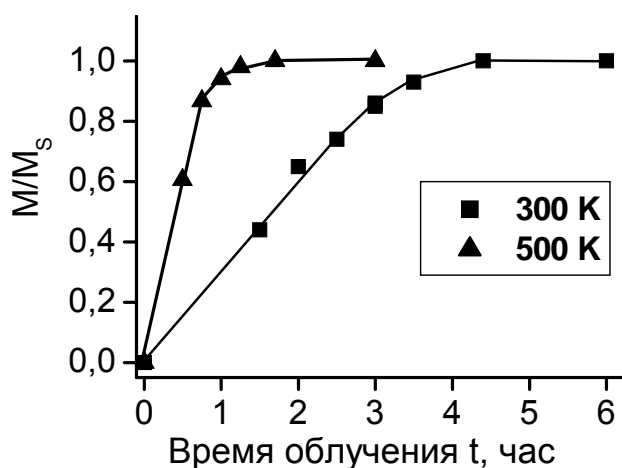


Рис. 7. Дозовые зависимости изменения намагниченности насыщения пленок Co_3O_4 толщиной 80 нм при облучении протонами с энергией 1,3 кэВ и различных температурах облучения.

Факторы, способствующие удалению кислорода из оксидов металлов.

Создание полной модели селективного удаления атомов кислорода под действием протонного облучения представляет сложную задачу, поскольку необходимо учитывать большое число различных факторов. Качественно можно отметить следующее. Представляется, что атомы (ионы) кислорода смещаются из исходных (равновесных) положений значительно более эффективно, чем атомы металла, как из-за большей переданной им энергии, так и из-за большей длины пробега в материале. Выбитые атомы кислорода диффундируют на сток, которым является свободная верхняя поверхность оксида или межфазовая граница раздела верхнего слоя и оксида. Достигнув поверхности, кислород удаляется из материала. Другими словами, удаление кислорода происходит не только за счет первичных процессов (выбивания), но и за счет вторичных процессов – радиационно-ускоренной диффузии удаляемых атомов. Большая толщина (десятки нанометров) восстановленного металлического слоя обусловлена большим пробегом протонов в материале с энергией, достаточной для смещения атомов кислорода из равновесных положений.

В работе показано, что увеличение температуры на 200 К по сравнению с комнатной увеличивает скорость превращения по меньшей мере в 3 раза. Поскольку в этом диапазоне температур собственно смещения атомов из равновесных положений слабо зависят от температуры, это также указывает на определяющую роль диффузионных процессов.

Несмотря на то, что для некоторых материалов могут иметь место и эффекты химического восстановления, можно полагать, что в своей основе удаление кислорода под облучением имеет радиационную природу. На это указывают:

- пороговый характер процессов восстановления (при энергии протонов ~ 400 эВ и менее скорость изменения электропроводности и магнитных свойств резко падает);
- наблюдавшееся в работе восстановление Fe_2O_3 и WO_3 при облучении ионами He^+ с энергией 1 кэВ, когда механизмы химического восстановления отсутствуют.

В работе предложено оценивать способность металла к восстановлению из соответствующего оксида по величине стандартной энергии Гиббса образования оксида (ΔG_f^0), взятой с обратным знаком: чем меньше эта величина, тем легче восстановить металл. На основании анализа экспериментальных результатов подтверждена правомочность такого критерия.

В **четвертой главе** рассмотрен способ изготовления металлических структур заданной геометрии, основанный на локальном восстановлении металлов, и приведены результаты по определению геометрических и магнитных свойств структур, изготовленных этим способом.

Изготовление металлических структур заданной геометрии. Создание металлического рисунка на подложке включало следующие этапы.

1. Нанесение на подложку оксида металла необходимой толщины.
2. Создание защитной маски с помощью фото- или электронной литографии.
3. Локальное восстановление металла в окнах маски с помощью протонного

облучения.

4. Удаление (при необходимости) защитной маски и областей исходного оксида.

Для демонстрации возможностей метода изготовлены тестовые структуры, представляющие собой металлические линии из Мо шириной 0,35 мкм и толщиной 17 нм (рис. 8). Структуры создавались с помощью облучения протонами с энергией 3 кэВ до дозы $6 \cdot 10^{18}$ ион/см² через защитную маску со сквозными отверстиями в форме линий шириной 0,35 мкм, изготовленную с помощью электронной литографии. После протонного облучения проводилось удаление защитной маски и участков необлученного оксида.

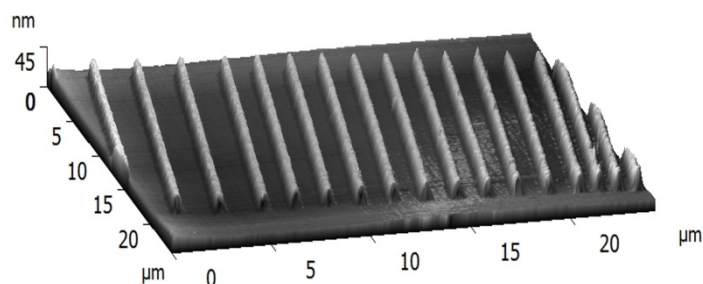


Рис. 8. Топографическое АСМ изображение (после удаления электронного резиста и исходного МоО₃) металлического «рисунка». Ширина линий равна 0,35 мкм, высота – 17 нм.

Изучение с помощью АСМ изготовленных структур показало, что их геометрия полностью соответствует по форме и размерам рисунку, заданному маской из резиста. При этом толщина металлических элементов определяется исходной толщиной МоО₃ и условиями протонного облучения.

Магнитные свойства двумерных периодических структур. Описанный способ использовался для изготовления двумерных периодических магнитных структур, образованных плоскими областями восстановленного Со прямоугольной формы. В работе изготовлены структуры, состоящие из областей размером от 12×2 мкм² до 60×10 мкм² и изучены магнитные свойства таких структур в зависимости от размеров и взаимного расположения индивидуальных областей.

Магнитные структуры изготавливались с помощью локального восстановления Со из Со₃О₄ толщиной 80 нм в окнах защитной маски под воздействием облучения протонами с энергией $E=2$ кэВ до дозы $5 \cdot 10^{18}$ ион/см². Сквозные отверстия в защитной маске, изготовленной с помощью фотолитографии, определяли топологию магнитных структур. В результате протонного облучения на подложке была сформирована периодическая структура прямоугольных областей из Со толщиной 30 нм.

При изучении доменной структуры отдельных областей установлено, что существует диапазон размеров магнитных областей, в котором с помощью внешнего магнитного поля, приложенного вдоль длинной стороны областей, может быть зафиксировано псевдооднодоменное (т.е. однодоменное при намагничивании во внешнем поле) состояние. Оно является стабильным: выдержка в течение 1000 часов не приводит к какому-либо изменению магнитно-силовых изображений.

Максимальный размер области, для которой было зафиксировано псевдооднодоменное состояние, составлял – 48×8 мкм² (Рис.9).

Для областей большего размера после намагничивания вдоль длинной стороны области все равно остаются многодоменными.

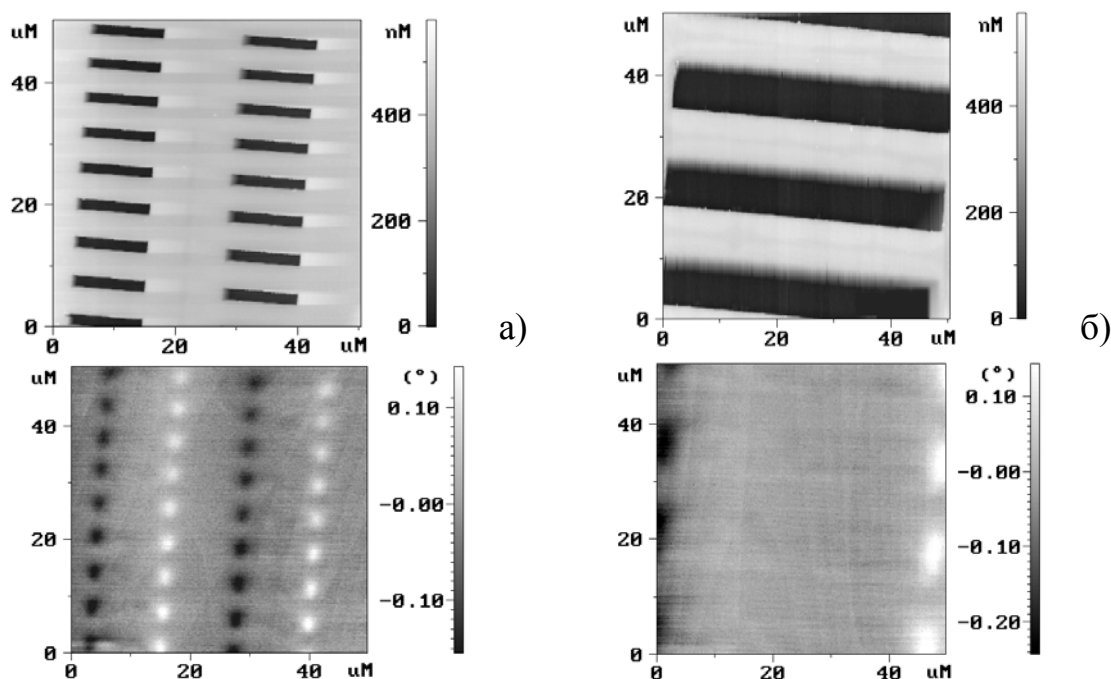


Рис.9. Топографические (сверху) и магнитно-силовые (снизу) изображения магнитных областей после намагничивания во внешнем поле вдоль длинной стороны: а – 12×2 мкм², б – 48×8 мкм².

Для изготовленных магнитных структур изучена зависимость коэрцитивной силы от коэффициента анизотропии формы (отношения длины области к ее ширине). Для структур, состоящих из областей одинаковой ширины, но разной длины, установлено следующее: чем больше коэффициент анизотропии формы, тем больше коэрцитивная сила структуры в направлении вдоль длинной стороны области. Вероятно, именно псевдооднодоменность является главной причиной влияния анизотропии формы на коэрцитивную силу в указанном диапазоне размеров.

Основные выводы.

1. Проведено исследование микроструктуры, химического состава, электропроводности и магнитных свойств тонких пленок оксидов металлов (Fe, Co, Ni, Cu, Nb, Mo, Ta, W, Pt, V) в исходном состоянии и после облучения протонами с энергией 1-5 кэВ. Установлено, что протонное облучение приводит к восстановлению металлов из соответствующих оксидов, причем толщина металлического слоя может достигать десятки нанометров. При этом восстановленные из оксидов Mo и W имеют неравновесную ГЦК структуру, характерную для этих металлов в тонкопленочном состоянии; все остальные восстановленные таким образом металлы имеют такую же кристаллическую структуру, что и соответствующие металлы в массивном состоянии.

2. Установлено, что средний размер зерна восстановленного металла зависит от температуры плавления: чем ниже температура плавления металла, тем больше средний размер зерна. Проанализирована связь между электропроводностью и средним размером зерна восстановленных металлов. Установлено, что удельное электросопротивление восстановленного металла тем больше табличного значения для этого металла в массивном состоянии, чем меньше средний размер зерна.
3. Установлено, что восстановление металлов через дополнительный верхний (относительно пучка протонов) слой из SiO_2 , не испытывающий превращения в процессе облучения, является эффективным способом управления структурными и магнитными свойствами материалов: для Cu средний размер зерна уменьшается от 14 ± 3 нм для пленки без дополнительного слоя до 7 ± 3 нм для пленки с верхним слоем, а коэрцитивная сила Co возрастает от 150 Э для пленки без дополнительного слоя до 370 Э для пленки с верхним слоем.
4. Отработан метод экспериментального определения объемных изменений в тонких пленках, сопровождающих процесс восстановления металлов под действием протонного облучения. Метод основан на измерении толщины исходной и облученной пленок материала и позволяет оценивать полноту восстановления металла.
5. Показано, что при протонном облучении при повышенной температуре доза, необходимая для полного восстановления металла, уменьшается, т.е. с повышением температуры облучения скорость восстановления увеличивается. Так, для Co_3O_4 скорость восстановления при $T=500$ К в 3 раза превышает скорость восстановления при $T=300$ К.
6. Установлено, что восстановление металлов на упругодеформированной подложке позволяет получать ферромагнитные пленки с наведенной магнитной анизотропией и большой величиной коэффициента прямоугольности петли гистерезиса ($s=0,96$) вдоль оси легкого намагничивания.
7. Разработан способ изготовления металлических структур заданной геометрии, основанный на локальном восстановлении металлов в окнах защитной маски. Этим способом изготовлены металлические линии из Mo шириной 0,35 мкм и упорядоченные двумерные магнитные структуры, состоящие из Co областей прямоугольной формы и микронных размеров в немагнитной матрице Co_3O_4 .
8. При исследовании коэрцитивной силы упорядоченных двумерных магнитных структур и доменной структуры отдельных областей установлено, что существует диапазон размеров, в котором поведение отдельных областей можно рассматривать как псевдооднодоменное (т.е. однодоменное в намагниченном состоянии), а сами упорядоченные двумерные структуры демонстрируют зависимость коэрцитивной силы от геометрических размеров индивидуальных областей.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Gurovich B.A., Dolgy D.I., Kuleshova E.A., Velihov E.P., Ol'shansky E.D., Domantovsky A.G., Aronzon B.A., Meilikhov E.Z. Controlled Transformation of Electrical, Magnetic and Optical Materials Properties by Ion Beams. // Preprint IAE-6176/11. - Moscow, 2000. – 32 с.
2. Гурович Б.А., Долгий Д.И., Кулешова Е.А., Домантовский А.Г., Аронзон Б.А. Управляемое превращение диэлектриков в металлы под воздействием ионных пучков. // Сб. науч. трудов 2-й науч.-техн. конфер. «Электроника, микро- и наноэлектроника». М.: МИФИ. 2000. С. 1-12.
3. Гурович Б.А., Долгий Д.И., Кулешова Е.А., Велихов Е.П., Ольшанский Е.Д., Домантовский А.Г., Аронзон Б.А., Мейлихов Е.З. Управляемая трансформация электрических, магнитных и оптических свойств материалов ионными пучками. // Успехи физических наук. 2001. Т. 171 (1). С. 105-117.
4. Gurovich B.A., Dolgy D.I., Kuleshova E.A., Meilikhov E.Z., Domantovsky A.G., Prikhodko K.E., Maslakov K.I., Aronzon B.A., Rylkov V.V., Yakubovsky A.Yu. Selective Removal of Atoms as a New Method for Fabrication of Nanoscale Patterned Media. // Microelectronic Engineering. 2003. V. 69(2). P. 358-364.
5. Gurovich B., Domantovsky A., Maslakov K., Olshansky E., Prikhodko K. Structure Peculiarities of Metallic Films Produced by Selective Removal of Atoms. // International Conference "Micro- and nanoelectronics-2003" ICMNE-2003 Moscow-Zvenigorod, Russia. 2003. P2-94.
6. Gurovich B., Prikhodko K., Domantovsky A., Maslakov K., Dolgy D., Olshansky E., Lunin Y. Electrical Properties of Metal Films Prepared by Selective Removal of Atoms. // International Conference "Micro- and nanoelectronics-2003" ICMNE-2003 Moscow-Zvenigorod, Russia. 2003. P1-2.
7. Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Приходько К.Е., Домантовский А.Г., Маслаков К.И. Возможность использования явления селективного удаления атомов для изготовления наноразмерных патернированных сред. // Научная сессия МИФИ-2003. Сборник научных трудов. 2003. Т. 9. С. 45-53.
8. Гурович Б.А., Домантовский А.Г., Приходько К.Е., Маслаков К.И. Образование новых полиморфных модификаций в тонких пленках тугоплавких металлов, полученных методом селективного удаления атомов. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. Т. 10. С. 67-71.
9. Gurovich B., Kuleshova E., Dolgy D., Prikhodko K., Domantovsky A., Maslakov K., Meilikhov E., Yakubovsky A. Selective Removal of Atoms as Basis for Ultra-High Density Nano-Patterned Magnetic and Other Media. // in Magnetic Nanostructures, Ed. by Atkas B., Tagirov L., Mikailov F., Springer Series in Materials Science, 2007. V. 94. P. 47-63.
10. Гурович Б.А., Домантовский А.Г., Маслаков К.И. Применение метода селективного удаления атомов для формирования металлического рисунка произвольной геометрии на подложке. // XIV Российский симпозиум по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел. Тезисы докладов. Черноголовка. 2005. С.78-79.
11. Domantovsky A.G., Gurovich B.A., Maslakov K.I. High-Resolution Lithography Based on Selective Removal of Atoms. // Кристаллография. Выпуск на англ. языке: Crystallography Reports. 2006. Vol. 51. (Suppl. 1). P. S196–S199.
12. Gurovich B., Prikhodko K., Domantovsky A., Kuleshova E., Olshansky E., Maslakov K., Lunin Y. Formation of conductive structures in insulate layers by selective removal of atoms technique. // In Proceedings of SPIE. V. 6260. Micro- and Nanoelectronics 2005, Ed. by K. Valiev, A. Orlikovsky. 2006. P. 626005(1–8).

13. Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Домантовский А.Г., Маслаков К.И., Приходько К.Е. Развитие метода селективного удаления атомов применительно к изготовлению многослойных микро- и наноразмерных патернированных сред различного назначения. // Нано- и микросистемная техника. 2007. Т. 4. С. 2-10.
14. Gurovich B., Prikhodko K., Domantovsky A., Maslakov K. Emitting properties of cobalt thin films reduced from oxide by proton irradiation. // International Conference "Micro- and Nanoelectronics-2007". 2007. ICMNE-2007. Moscow-Zvenigorod, Russia. P.1.
15. Gurovich B., Prikhodko K., Kuleshova E., Domantovsky A., Maslakov K. Magnetic properties and electro-magnetic emission from pseudo-singledomain nanopatterned magnetic media. // 6th International conferences on fine particle magnetism. Rome, Italy. 2007. Book of abstracts. P. PC4.
16. Гурович Б.А., Домантовский А.Г., Маслаков К.И., Приходько К.Е. Некоторые особенности фазовых превращений, обусловленные селективным удалением атомов кислорода из оксидов металлов под действием протонного облучения. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. Т. 5. С. 25-29.
17. Домантовский А.Г., Маслаков К.И. Создание субмикронного металлического рисунка произвольной геометрии с использованием селективного удаления атомов кислорода из оксида молибдена. // Письма в журнал технической физики. 2008. Т. 34(8). С. 1-5.
18. Гурович Б.А., Приходько К.Е., Кулешова Е.А., Домантовский А.Г., Маслаков К.И. Излучательные и магнитные свойства псевдооднодоменной микро- и нанопатернированной магнитной среды. // Прикладная физика. 2008. Т.1. С. 44-53.
19. Гурович Б.А., Долгий Д.И., Велихов Е.П., Кулешова Е.А., Аронзон Б.А., Мейлихов Е.З., Рязанцев Е.П., Рыльков В.В., Приходько К.Е., Домантовский А.Г., Штромбах Я.И., Ольшанский Е.Д. Способ получения рисунка. Патент Российской Федерации № 2129294. // Заявка № 98109497/28 от 22.05.98.
20. Гурович Б.А., Долгий Д.И., Велихов Е.П., Кулешова Е.А., Аронзон Б.А., Мейлихов Е.З., Рязанцев Е.П., Рыльков В.В., Приходько К.Е., Домантовский А.Г., Штромбах Я.И., Ольшанский Е.Д. Способ формирования проводящей структуры. Патент Российской Федерации № 2129320. // Заявка № 98109498/25 от 22.05.98.