

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

В последнее время в различных областях науки и техники, и в особенности в микроэлектронике и микросистемной технике, широко применяются ионно-лучевые методы модификации свойств материалов. Облучение пучками ионов, особенно химически активными газами (например, кислородом), позволяет существенно изменять различные свойства поверхности и приповерхностного слоя (электрические, оптические, химические, механические и другие), вплоть до образования поверхностного слоя новой фазы, толщина которого сравнима с длиной пробега R_p бомбардирующих ионов. Это широко используется в науке и в производстве, например, при формировании рельефа поверхности, создания активных областей в полупроводниковых структурах. Однако ранее не рассматривались вопросы, связанные с особенностями длительного низкотемпературного воздействия пучков ионов кислорода на металлические пленки.

Для построения адекватной физической модели взаимодействия пучков ионов кислорода и аргона с металлической поверхностью необходимо проведение комплексного исследования, позволяющего изучить совокупность процессов, происходящих во время облучения как на поверхности, так и в объеме пленки. Эти процессы связаны с одновременным протеканием множества физико-химических явлений, таких как адсорбция, десорбция, ионное распыление, активация поверхности, внедрение ионов, перемешивание атомов, генерация радиационных дефектов, модификация рельефа поверхности и т.п. В связи с ионным облучением весь комплекс указанных явлений происходит в термодинамически неравновесных условиях. Поэтому физическая модель должна учитывать всю динамику процессов.

Исследование кинетики ионного распыления и образования измененного слоя на поверхности металлических пленок имеет как научную, так и практическую значимость. С одной стороны, это позволяет изучить особенности воздействия ионов газов различной химической природы на металлическую поверхность. С другой стороны, это исследование представляет большой практический интерес, поскольку формирование тонкого модифицированного слоя на поверхности металлических пленок, не оказывающего заметного влияния на структуру, магнитные и электрические свойства нижележащих слоев, позволяет, в том числе, защитить эти пленки от воздействия атмосферы и влаги.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является установление особенностей воздействия облучения пучками ионов аргона и кислорода на свойства пленочных структур CoCu и CoP.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Разработка и создание ионно-лучевого оборудования, позволяющего проводить облучение образцов суммарной площадью десятки квадратных сантиметров ионами аргона и кислорода с энергией E от 0,1 до 10 кэВ и плотностью тока пучка ионов j до $0,5 \text{ mA/cm}^2$ без ограничения на длительность воздействия.

2. Определение набора экспериментальных методов исследования изменения физических свойств пленок CoCu и CoP, вызванного облучением ионами кислорода и аргона с энергией E от 0,1 до 4 кэВ и плотностью потока $F_i = 6 \times 10^{14} \dots 3 \times 10^{15}$ ион/см²·с при температуре ниже 100 °С. Проведение сравнительного анализа исходного состояния пленок неоднородных сплавов $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($5 \leq x \leq 35$), поликристаллических пленок $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($1 \leq x \leq 5$) и аморфных пленок $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($x=20$) и облученных ионами кислорода и аргона взаимодополняющими методами, включающими оптическую, растровую электронную и атомно-силовую микроскопии; рентгеновскую фотоэлектронную спектроскопию; мессбауэровскую спектроскопию на конверсионных электронах; рентгеновскую дифракцию; СКВИД-магнитометрию и др, а также численное моделирование процесса облучения.

3. Установление механизмов воздействия облучения низкоэнергетическими ионами кислорода и аргона на физические свойства пленок CoCu и CoP и определение условий целенаправленного воздействия пучками ионов различных газов на физические свойства пленочных структур.

Объекты и предмет исследования

В качестве объектов исследования выбраны электроосажденные пленки неоднородных сплавов $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($5 \leq x \leq 35$) и сплавов $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($1 \leq x \leq 5$ и $x=20$). Предметом исследования является совокупность процессов, протекающих на поверхности и в нижележащих слоях пленок CoCu и CoP при облучении ионами аргона и кислорода.

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые проведено комплексное исследование пленочных структур $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($5 \leq x \leq 35$) и $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($1 \leq x \leq 5$, $x=20$) взаимодополняющими методами, включающими оптическую, растровую электронную и атомно-силовую микроскопии; рентгеновскую фотоэлектронную спектро-

скопию; мессбауэровскую спектроскопию на конверсионных электронах; рентгеновскую дифракцию; СКВИД-магнитометрию и др. Исследовано особенность распределения элементов на поверхности пленок CoCu.

2. Впервые пленочные структуры $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($5 \leq x \leq 35$) и $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($1 \leq x \leq 5$, $x=20$) подвергались воздействию облучения пучками ионов аргона и кислорода с энергией $E=0,1 \dots 4$ кэВ и плотностью потока $F_i=6 \times 10^{14} \dots 3 \times 10^{15}$ ион/см²·с. Исследованы особенности воздействия ионного облучения на физические свойства пленочных структур. Экспериментально определены условия, режимы облучения и оптимальные составы, на поверхности которых происходит формирование сплошного окисленного слоя.

3. Впервые установлен и исследован эффект планаризации рельефа поверхности пленочных структур $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($8 \leq x \leq 20$) и $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($2,5 < x \leq 5$; $x=20$) при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода, происходящий в результате запыления впадин и распыления микровыступов, слияния мелких неоднородностей в единое целое, что вызвано процессами распыления и окисления поверхности, а также перпыления материала по поверхности.

4. Впервые исследован процесс и установлена трехстадийность механизма формирования сплошного окисленного слоя на поверхности пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($8 \leq x \leq 20$) и $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($2,5 < x \leq 5$; $x=20$) при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода. Установлено, что толщина окисленного слоя достигает десятки нанометров, а сплошность зависит от исходного состояния пленок.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты проведенных исследований воздействия ионного облучения на свойства пленок CoCu и CoP нашли практическое применение в технологических операциях:

1. Формирования рельефа поверхности толстых слоев полиимида, гетероструктур на основе арсенида и нитрида галлия, представляющих одну из основных операций в технологии микроэлектроники и микро-системной техники. Использование кислорода в качестве рабочего газа позволило значительно увеличить стойкость металлической маски.

2. Формирования защитных и промежуточных диэлектрических слоев.

3. Очистки поверхности от примесей органической природы, улучшая при этом адгезионные свойства поверхности.

Положения диссертации, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1. При облучении ионами кислорода с энергией $E = 0,5 \dots 0,7$ кэВ и дозами облучения более 3×10^{18} ион/см² при температурах ниже 100 °С на поверхности пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($8 \leq x \leq 20$) и $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($2,5 < x \leq 5$; $x=20$) происходит формирование сплошного окисленного слоя толщиной десятки нанометров.

2. В процессе длительного облучения ($D > 3 \times 10^{18}$ ион/см²) ионами кислорода с энергией $E = 0,5 \dots 0,7$ кэВ и плотностью потока $F_i = 1,25 \times 10^{15} \dots 2,18 \times 10^{15}$ ион/см²·с на поверхности пленок CoCu и CoP происходит планаризация рельефа поверхности. Установлен трехстадийный механизм и предложена модель формирования сплошного поверхностного окисленного слоя и планаризации рельефа поверхности при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода.

3. Длительное облучение ($D > 3 \times 10^{18}$ ион/см²) низкоэнергетическими ионами кислорода приводит к стабилизации физических свойств пленок CoCu и CoP в результате формирования окисленного слоя на поверхности конечной толщины, позволяющего защитить пленочные структуры от воздействия атмосферы и влаги.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в непосредственном проведении расчетных и экспериментальных работ, в анализе, интерпретации и обобщении результатов.

Апробация результатов

Результаты работы были доложены на следующих семинарах и конференциях: Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Брест. 1997; Международной конференции “Взаимодействие излучения с твердым телом”. Минск 1997 и 2001; III Республиканской Научно-технической конференции “Новые материалы и технологии”, Минск 1998; Международной научной конференции “Магнитные материалы и их применение”, Минск 1998; Международной конференции “Физика плазмы и плазменные технологии”, Минск 1997 и 2000; XVII Международной Школе-семинаре “Новые магнитные материалы микроэлектроники”. Москва, 20-23 июня 2000; Международном симпозиуме “EASTMAG 2001”, Екатеринбург 2001.

Опубликованность результатов

Основные результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, среди которых 7 статей в научных журналах, 7 статей в сборниках

научных трудов и материалов конференций и 8 тезисов докладов конференций. Общий объем опубликованных материалов составляет 81 стр.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из ВВЕДЕНИЯ, ОБЩЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ЧЕТЫРЕХ ГЛАВ, ЗАКЛЮЧЕНИЯ и СПИСКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ. Объем диссертации составляет 134 стр, включая 42 рис. на 40 стр. и списка используемых источников из 133 наименований на 14 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена обзору литературы. Дана общая характеристика пленок неоднородных сплавов CoCu и поликристаллических и аморфных пленок CoP. Отмечено, что физические свойства пленок зависят от условий синтеза и последующей обработки, например термического отжига и ионного облучения. Характер воздействия отжига на физические свойства пленочных структур зависит от температуры и его длительности, а характер воздействия ионного облучения - от вида и энергии ионов, флюенса облучения. Особое внимание уделено облучению низкоэнергетическими ионами, позволяющему формировать модифицированный слой на поверхности, толщина которого сравнима с длиной пробега бомбардирующих ионов. Проведен обзор литературных данных по существующему ионно-лучевому оборудованию, позволяющему формировать однородные пучки ионов кислорода. Рассмотрены вопросы низкотемпературного окисления металлов, приведены несколько моделей формирования и роста окисленного слоя на металлической поверхности. В конце главы обосновывается выбор направления исследования, требования к проведению эксперимента и выбору экспериментальных методов исследования.

Во второй главе изложены результаты исследований, позволившие разработать и создать широкоапертурный источник ионов кислорода диаметром 200 мм, в результате чего стало возможным проведение данной экспериментальной работы. Дано описание объектов исследования. В качестве объектов исследования выбраны пленки неоднородных гранулированных сплавов Co_xCu_{100-x} ($5 \leq x \leq 35$) и поликристаллические и аморфные пленки $Co_{100-x}P_x$ ($1 \leq x \leq 5$; $x=20$), полученные методом электроосаждения. Данные пленки имеют широкий спектр магнитных свойств и состояния их поверхности. Рассмотрена методика проведения эксперимента и проведен обзор используемых методов исследования. Облуче-

ние проводилось пучками ионов аргона и кислорода с энергией от 0,1 до 4 кэВ, плотностью тока ионного пучка от 0,1 до 0,5 мА/см² при температуре ниже 100 °С длительностью десятки минут. Для построения адекватной физической модели проводилось комплексное исследование исходных и облученных образцов следующими методами исследования: оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопиями; рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией; мессбауэровской спектроскопией на конверсионных электронах; рентгеновской дифракции, СКВИД-магнитометрией, измерением электросопротивления по двух и четырехзондовым методикам. А также проводились термические испытания образцов. Выбор методов исследования зависел не только от экспериментальных результатов, которые необходимо получить, но и от конкретных условий опыта. Там, где методы перекрываются, проводились сопоставления получаемых результатов. Математическое моделирование процесса облучения проводилось при помощи пакета программ SRIM 2000, позволяющего оценить глубину проникновения бомбардирующих ионов в мишень, толщину структурно-нарушенного слоя, количество возникших точечных дефектов, величину потерь энергии на упругие и неупругие взаимодействия при торможении. Максимальная глубина проникновения ионов кислорода в мишень при начальной энергии $E=4\text{кэВ}$ составляет 10 нм, в величина среднего пробега ионов составляет 1,8 нм. При энергии 0,5 кэВ – 4 нм и 0,6 нм соответственно.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния облучения ионами аргона и кислорода на свойства поверхности пленок CoCu и CoP. Установлено, что исследуемые объекты CoCu и CoP представляют пленочные структур с различным исходным состоянием поверхности. В зависимости от состава рельеф поверхности изменяется от сильноразвитого для образцов $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($x<8$) (рис.1) до более гладкого для образцов $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($x\geq 8$) и гладкого для образцов $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($x=20$) и пленок сплавов CoP.

Далее проводилось облучение пленок CoCu и CoP ионами аргона. Экспериментально установлено, что облучение пленок ионами аргона носит тривиальный характер. В результате облучения происходит увеличение развитости рельефа поверхности и уменьшение толщины облу-

чаемых пленок. При небольших дозах облучения заметных изменение состава, структуры, электрических и магнитных свойств не происходит.

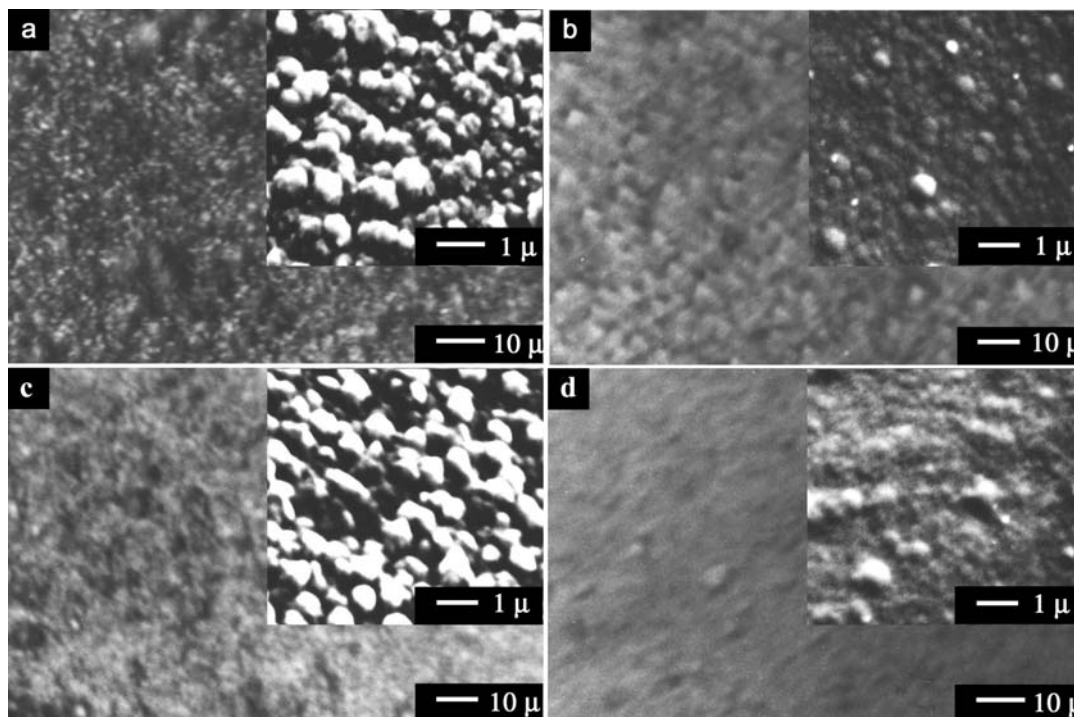


Рис. 1. Изображение поверхности исходных пленок а - $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$, б – $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ и облученных ионами кислорода с энергией $E=650$ эВ и дозой $D=4,7 \times 10^{18}$ ион/см² с - $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$, д – $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$.

Более интересная картина получается при облучении пленок сплавов $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($5 \leq x \leq 35$) ионами кислорода. В процессе облучения ионами кислорода пленок происходит конкуренция процессов распыления и окисления поверхности. При облучении ионами кислорода с энергией $E < 0,8$ кэВ интенсивность процессов распыления преобладает над интенсивностью процессов окисления, и характер воздействия облучения аналогичен характеру воздействия облучения ионами аргона при таких же энергиях. При облучении ионами кислорода с энергиями $E < 0,4$ кэВ заметного изменения в состоянии поверхности и пленок в целом не происходит.

При облучении ионами кислорода с энергией $E=0,5 \dots 0,7$ кэВ, плотностью потока $F_i=1,25 \times 10^{15} \dots 2,18 \times 10^{15}$ ион/см²·с интенсивность процессов распыления и окисления поверхности соизмеримы. При облучении

ионами кислорода пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($5 \leq x \leq 35$) в данных режимах происходит уменьшение в четыре раза интенсивности распыления. При этом интенсивность распыления почти на порядок меньше чем интенсивность распыления при облучении ионами аргона в аналогичных режимах. Одновременно с уменьшением интенсивности распыления происходит увеличение электросопротивления пленок и изменение цвета облучаемой поверхности. В зависимости от дозы условно можно выделить три интервала облучения.

При дозах облучения $D < 1 \times 10^{18}$ ион/см² происходит незначительное увеличение электросопротивления. При дальнейшем облучении происходит более интенсивный рост электросопротивления. При дозах облучения $D > 5 \times 10^{18}$ ион/см² происходит насыщение. Эти три интервала облучения характерны для пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($8 \leq x \leq 20$), обладающих более гладкой исходной поверхностью. Для пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($x > 20$) по достижению второго интервала облучения происходит их разрушение путем отшелешивания от подложки.

По цвету поверхности толщина окисленного слоя, сформированного в результате облучения, не превышала 50 нм. Удельное электросопротивление окисленного слоя близко к удельному электросопротивлению оксида меди. Одновременно в процессе облучения происходит планаризация рельефа поверхности путем распыления микровыступов, запыления впадин, слияние мелких неоднородностей поверхности в более крупные (рис. 1).

То, что в результате облучения ионами кислорода пленок CoCu происходит окисление поверхности и сформированный окисленный слой достигает толщины десятки нанометров, подтверждается результатами РФЭС и КЭМС.

Из приведенных РФЭС спектров видно (рис. 2), что при облучении ионами кислорода на поверхности пленок происходит увеличение содержания кислорода и удаление примесей органической природы. Деформация линии $\text{Cu}(2p)$ РФЭС в сторону энергий больших связей свидетельствует об образовании оксида меди на поверхности, а увеличение интенсивности линии – о планаризации рельефа поверхности. В результате облучения происходит увеличение площади поверхности, ориентированной по нормали к падающему пучку, и, следовательно, увеличение

вероятности выхода фотоэлектронов. Линий $\text{Co}(2p)$ фотоэлектронных спектров имеют изломанный характер и слабо выделяются на общем фоне даже для образцов с содержанием Co до 20 % как до, так и после облучений, что не позволяет проинтерпретировать изменения в состоянии кобальта на поверхности исследуемых образцов.

Интерпретацию КЭМС спектров следует проводить из модели двух синглетных линий, которые соответствуют двум локальным позициям ионов железа. После облучения пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($8 \leq x \leq 20$) (рис.3) происходит расширение линий КЭМС спектров и смещение центра тяжести в сторону положительных скоростей. Одновременно увеличивается интенсивность в центре спектра и появляется компонента в области положительных скоростей. Эта особенность позволяет представить экспериментальный спектр как состоящий из двух синглетов и дублета. Значения изомерных сдвигов практически не изменяются после облучения для синглетов. Значения изомерного сдвига $\delta=0,46$ мм/с и величины квадратурного расщепления дублета $\Delta E=0,80$ мм/с характерны для резонансных атомов ^{57}Fe в оксиде меди CuO . Также возможно образование оксида кобальта. КЭМС спектры резонансных атомов ^{57}Fe в оксиде кобальта и в оксиде меди частично перекрываются. В целом, анализ КЭМС спектров облученных ионами кислорода образцов $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($x \geq 8$ %) свидетельствует в пользу формирования на поверхности окисленного слоя со средней толщиной несколько десятков нанометров.

В процессе облучения изменений состава пленок не происходит, а поверхностный слой толщиной до 0,1 мкм незначительно обогащается медью. Изменений в структуре пленок не происходит.

С целью исследования состава поверхности и приповерхностного слоя электроосажденных пленок CoCu , проведен послойный РФЭС анализ исходных образцов. Несмотря на то, что состав поверхностного слоя толщиной до 0,1 мкм, согласно результатам электронно-зондового микроанализа, примерно соответствует объемному составу пленок, поверхность и поверхностный слой толщиной до 5 нм независимо от содержания кобальта в объеме и длительности ионной очистки обогащена медью. Показано, что это связано не со спецификой применения РФЭС для анализа состояния поверхности, а с особенностями протекания процессов упорядочения на поверхностях рассматриваемых неоднородных сплавов, в результате которых более энергетически выгодным является обогащение поверхности медью.

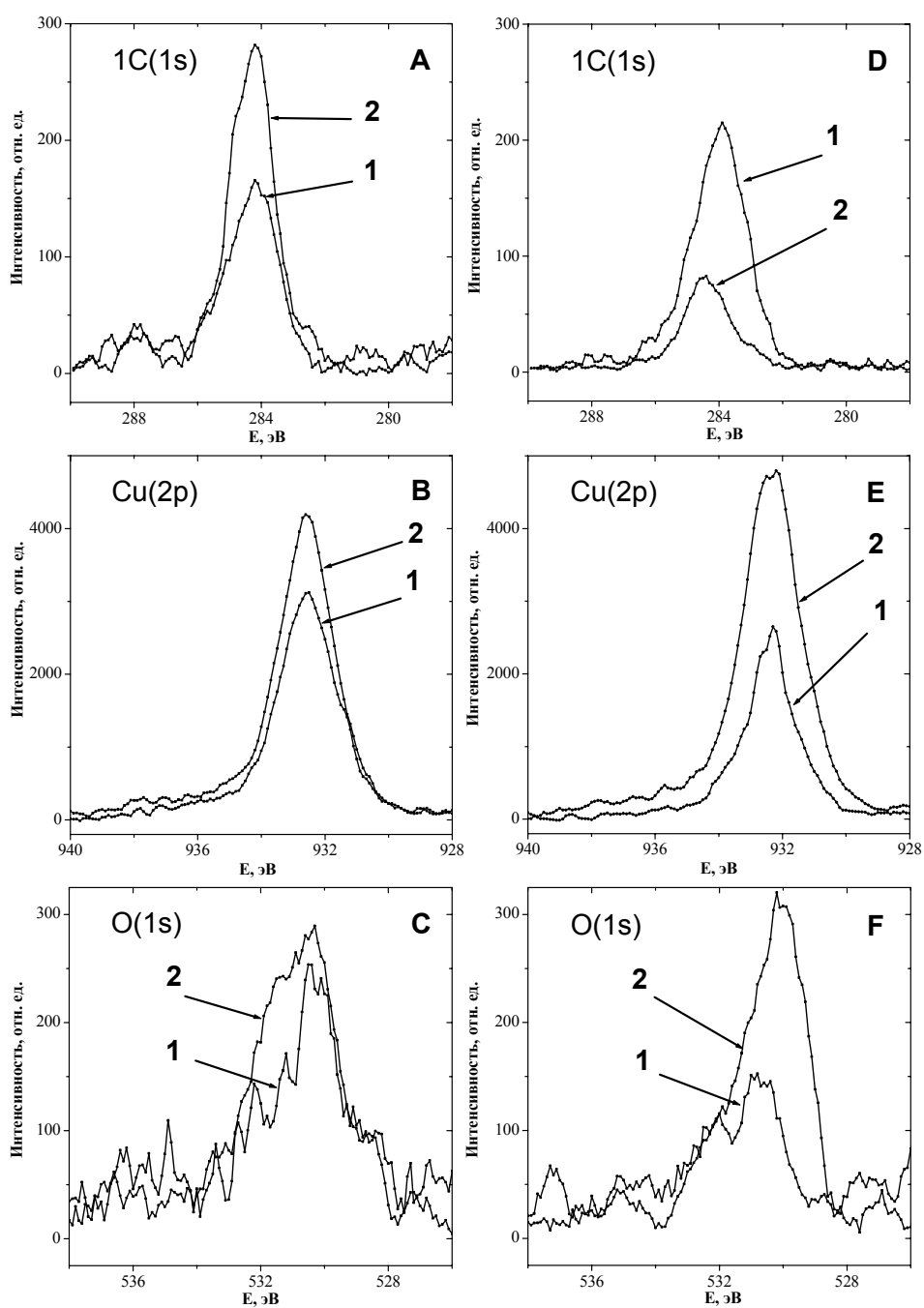


Рис. 2. РФЭС спектры образцов Co_8Cu_{92} (A, B, C) и $Co_{11}Cu_{89}$ (D, E, F) (кривая 1- исходные; кривая 2- облученные ионами кислорода с энергией $E=650$ эВ и дозой $D=4,7 \times 10^{18}$ ион/см²).

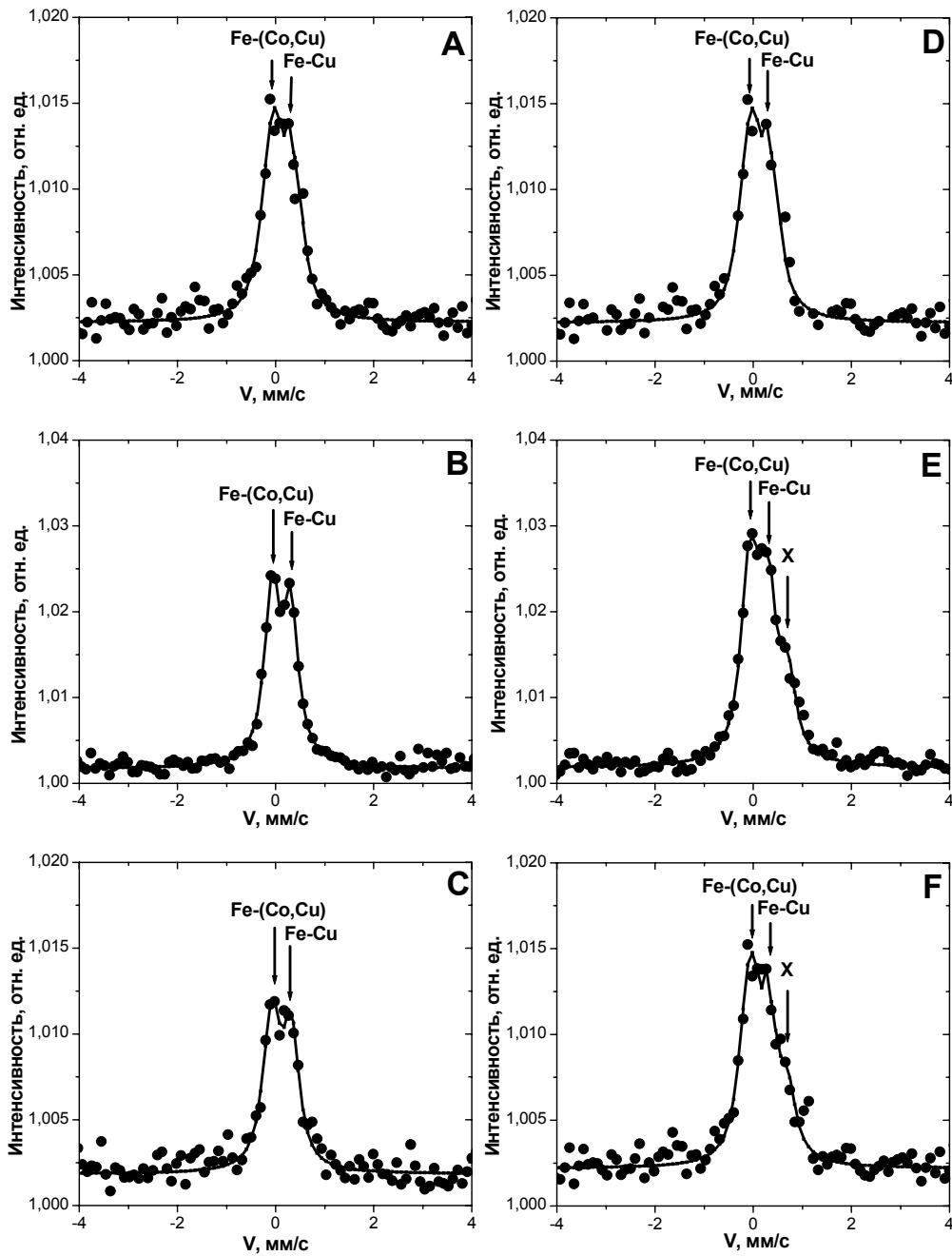


Рис. 3.11. КЭМС спектры образцов исходных *a* – Co_6Cu_{94} ; *b* – $Co_{11}Cu_{89}$; *c* – $Co_{20}Cu_{80}$ и образцов *d* – Co_6Cu_{94} ; *e* – $Co_{11}Cu_{89}$; *f* – $Co_{20}Cu_{80}$, облученных ионами кислорода с энергией $E=650$ эВ и дозой $D=4,7 \times 10^{18}$ ион/см².

Выше изложенные результаты позволили предложить модель формирования окисленного слоя на поверхности и планаризации рельефа поверхности при облучении пленок CoCu низкоэнергетическими ионами кислорода. Условно можно выделить три этапа формирования окисленного слоя. На первом этапе при $D < 1 \times 10^{18}$ ион/см² происходит формирование островкового окисленного слоя толщиной десятки нанометров. На этих окисленных участках интенсивность распыления значительно снижается. Далее происходит более интенсивное распыление неокисленных микровыступов, перепыление окисленного материала из мест доступных ионному пучку в "затененные" участки, медленное сглаживание рельефа поверхности и рост средней толщины окисленного слоя. На последнем этапе при $D > 3 \times 10^{18}$ ион/см² достигается в равновесие между процессами формирования окисленного слоя и распыления поверхности.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния низкоэнергетического облучения ионами кислорода на структуру и магнитные свойства пленок CoCu и CoP.

Согласно результатам СКВИД-магнитометрии, при облучении ионами кислорода пленок CoCu происходит увеличение температуры блокирования, т.е. увеличение средних размеров магнитных кластеров, и увеличении энергии взаимодействия между магнитными кластерами в медной матрице.

При облучении низкоэнергетическими ионами кислорода аморфных пленок $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($x=20$), поликристаллических пленок $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ [0001] ($2,5 < x \leq 5$) установлено, что облучение оказывает воздействие, аналогичное облучению пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($8 \leq x \leq 20$). Особенности воздействия облучения проявляются на пленках $\text{Co}_{100-x}\text{P}_x$ ($1 \leq x \leq 2,5$). При облучении на поверхности пленок данного состава происходит формирование сетки параллельных трещин на поверхности (рис.4).

При дальнейшем облучении происходит формирование новых сеток трещин, углубление трещин и уменьшение ячеек трещин. Одновременно происходят изменения в спектрах рентгеновской дифракции, уменьшение величины коэрцитивной силы, изменение формы петли гистерезиса. Происходящие изменения связаны с образованием окисленного слоя на поверхности, который вносит дополнительный вклад по мере своего

формирования в напряжения, существующие в исходной сильно текстурированной пленке CoP [1000]. Это дополнительное напряжение оказывается достаточным для релаксации напряжений путем образования ориентированной сетки трещин только в данных пленках.

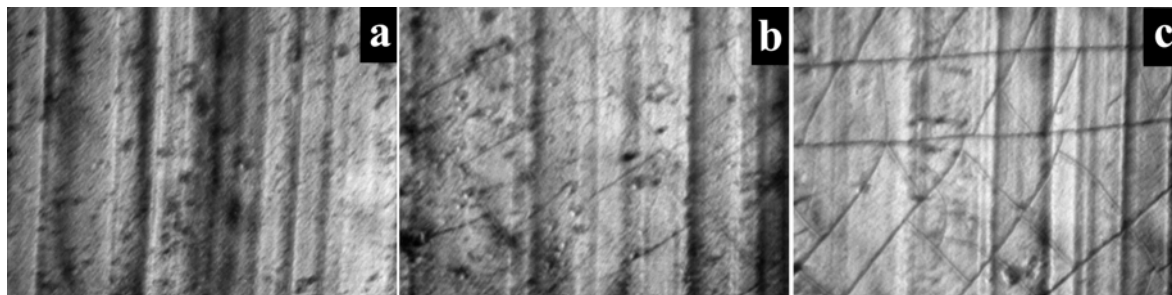


Рис. 4. Изображение характерных участков поверхности (600x) исходных (a) и облученных ионами кислорода при температуре $T < 100$ °C с энергией $E = 650$ эВ и дозами облучения $D = 0,5 \times 10^{18}$ ион/см² (b), $D = 4,7 \times 10^{18}$ ион/см² (c) пленок $Co_{100-x}P_x$ [1000] ($x = 2,5$).

Результаты термических испытаний в диапазоне температур от -50 до +100 °C и последующих исследований на протяжении года трех групп образцов: 1) исходные; 2) отожженные при $T = 100$ °C в течении $t = 4$ ч, при давлении $P = 3 \times 10^{-2}$ Па с напуском кислорода; 3) облученные, - показали высокую стабильность окисленного слоя и физических свойств облученных образцов. Заметных изменений электросопротивления и спектров рентгеновской дифракции после трех циклов и на протяжении года не происходит. Однако, изменения поверхностного сопротивления исходных и отожженных образцов существенны. Также происходят изменения в спектрах рентгеновской дифракции: уменьшение интенсивности пиков и их размытие.

Метод модификации поверхности пленок CoCu и CoP облучением низкоэнергетическими ионами кислорода нашел практическое применение в технологических операциях формирования рельефа поверхности в толстых слоях полиимида, эпитаксиальных слоях GaN и эпитаксиальных гетероструктурах на основе GaAs. Использование кислорода позволяет существенно увеличить стойкость металлической маски и сформировать отвесные профили травления высотой единицы-десятки микрометров с

чистым дном, причем морфология дна профиля травления является более гладкой, чем в исходной поверхности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика модификации поверхности пленочных структур CoCu и CoP низкоэнергетическими пучками ионов кислорода. Определены условия и оптимальные режимы облучения ($F_i=1,25 \times 10^{15} \dots 2,18 \times 10^{15}$ ион/см²·с, $E=0,5 \dots 0,7$ кэВ), позволяющие целенаправленно воздействовать на физические свойства пленочных структур.

2. Установлено, что при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода при температурах менее 100 °С на поверхности пленочных структур Co_xCu_{100-x} ($8 \leq x \leq 20$) и Co_{100-x}P_x ($2,5 < x \leq 5$, $x=20$) одновременно с процессом распыления поверхности в результате окисления и перепыления материала по поверхности происходит формирование окисленного слоя и планаризация рельефа поверхности. Толщина окисленного слоя может достигать десятки нанометров.

3. Установлен механизм и предложена модель формирования сплошного поверхностного окисленного слоя и планаризации рельефа поверхности пленочных структур Co_xCu_{100-x} ($8 \leq x \leq 20$) и Co_{100-x}P_x ($2,5 < x \leq 5$, $x=20$) при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода. Процесс формирования окисленного слоя условно можно разделить на три этапа: 1 – этап формирования островкового окисленного слоя на поверхности, 2 – этап роста окисленного слоя и планаризации рельефа поверхности, 3 – этап достижения равновесия в процессах распыления поверхности и формирования окисленного слоя.

4. Длительное облучение ($D > 3 \times 10^{18}$ ион/см²) низкоэнергетическими ионами кислорода приводит к стабилизации физических свойств пленочных структур CoCu и CoP в результате формирования окисленного слоя на поверхности, позволяющего защитить пленочные структуры от воздействия атмосферы и влаги.

5. Разработанная методика модификации пленок на основе кобальта также позволяет значительно увеличить стойкость металлических масок, модифицируя их поверхность, при выполнении технологических операций формирования рельефа поверхности в толстых слоях полиимида, эпитаксиальных слоев GaN, эпитаксиальных гетероструктур на основе GaAs. Данная методика также позволяет проводить технологические операции стабилизации свойств пленок и формирования поверхно-

стных защитных и промежуточных (в многослойных структурах) диэлектрических слоев при изготовлении первичных элементов различных датчиков.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Стогний А.И., Корякин С.В. Широкоапертурный источник ионов кислорода с холодным катодом и магнитными мультиполями. // ПТЭ. – 2000. - № 6. – С. 64-67.
2. Стогний А.И., Корякин С.В. Влияние низкоэнергетического ионного облучения на свойства пленок CoCu. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2001. - № 6. – С. 74-79.
3. Стогний А.И., Корякин С.В., Вирченко В.А. Низкотемпературное окисление пленок CoCu длительным облучением пучком ионов кислорода. // ЖТФ. – 2001. - Т. 71, вып. 2. - 87-93.
4. Стогний А.И., Тимошков Ю.В., Ореховская Т.И., Корякин С.В., Лобко Э.В. Особенности реактивного ионно-лучевого травления толстых слоев полиимида с использованием смеси кислорода с аргоном в качестве рабочего газа. // Микроэлектроника. – 2001. - Т. 30, № 5. – С. 309-314.
5. Стогний А.И., Корякин С.В., Немцевич Л.В. Нелокальные изменения в электроосажденных пленках CoP при ионном облучении низкоэнергетическими ионами аргона и кислорода. // Металлофизика и новейшие технологии. – 2001. - Т. 23, № 7. – С. 973-982.
6. Стогний А.И., Тимошков Ю.В., Ореховская Т.И., Корякин С.В. О формировании объемных элементов микроэлектромеханических систем в полиимиде методом реактивного ионно-лучевого травления. // Письма в ЖТФ. – 2001. - Т. 27, вып. 3. С. – 7-13.
7. Стогний А.И., Корякин С.В. Об аномальном дефиците кобальта на поверхности пленок неоднородных сплавов CoCu. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2001. - № 12. – С. 40-44.
8. Стогний А.И., Корякин С.В., Суходолов Ю.В. Нелокальное воздействие низкоэнергетического облучения ионами кислорода на электроосажденные пленки неоднородных сплавов CoCu. // Научн.-тех. конф. молодых ученых и спец. "Молодежь и научно-технический прогресс": Материалы / Брест, 1997. – С. 85-86.

9. Стогний А.И., Корякин С.В., Суходолов Ю.В. Окисление поверхности электролитически осажденных пленок Со-Си под воздействием облучения низкоэнергетическими ионами кислорода. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тез. докл. II Межд. конф. "ВИТТ 97", Минск (23-25 сентября 1997). – Мн.: БГУ, 1997. – С. 109.

10. Стогний А.И., Корякин С.В., Суходолов Ю.В. Воздействие низкоэнергетического облучения ионами O_2 на физические свойства электроосажденных плёнок Со-Си. // Физика плазмы и плазменные технологии: Сб. тр. II межд. конф "ФППТ 2", Минск (15-19 сентября 1997). – Минск, 1997. – С. 574-577.

11. Стогний А.И., Гурецкий С.А., Гесь А.П., Лугинец А.М., Милованов А.М., Корякин С.В. О повышении лучевой стойкости пленок кремния на поверхности монокристаллов с нелинейными оптическими свойствами. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Тез. докл. II Межд. конф. "ВИТТ 97", Минск (23-25 сентября 1997). – Мн.: БГУ, 1997. – С. 189.

12. Стогний А.И., Корякин С.В., Суходолов Ю.В. О формировании окисленного слоя на поверхности пленки СоСи при низкоэнергетическом облучении ионами кислорода. // Магнитные материалы и их применение: Тез. докл. межд. науч. конф "ММП-98", Минск (30 сентября – 2 октября 1998). - Минск, 1998. – С. 135-136.

13. Корякин С.В., Немцевич Л.В. Нелокальное воздействие облучения низкоэнергетическими ионами кислорода на аморфные и кристаллические пленки СоР. // Магнитные материалы и их применение: Тез. докл. межд. науч. конф "ММП-98", Минск (30 сентября – 2 октября 1998). - Минск, 1998. – С. 177-178.

14. Стогний А.И., Корякин С.В., Суходолов Ю.В. Пассивация поверхности электроосажденных пленок металлов при длительном облучении низкоэнергетическими ионами кислорода. // Магнитные материалы и их применение: Тез. докл. межд. науч. конф "ММП-98", Минск (30 сентября – 2 октября 1998). - Минск, 1998. – С. 119.

15. Stognij A.I., Koriakin S.V., Novitskij N.N., Borod'ko V.I. The one grid ion source of 200 mm in diameter. // Plasma Physics and Plasma Technology: Confr. papers III Int. conf. , Minsk, Belarus (September 18-22, 2000). – Minsk, 2000. – P. 145-148.

16. Stognij A.I., Koriakin S.V. Low-temperature oxidation of Co-basis films by long during ion-beam irradiation with oxygen ions. // Plasma Physics and Plasma Technology: Confr. papers III Int. conf. Minsk, Belarus (September 18-22, 2000). – Minsk, 2000. – P. 409-412.
17. Стогний А.И., Корякин С.В., Немцевич Л.В. Структурные изменения в пленках кобальт-фосфор, вызванные облучением ионами кислорода. // Новые магнитные материалы микроэлектроники: Сб. тр. XVII Межд. Школы-семинара, Москва (20-23 июня 2000). – М., 2000. – С. 121-123.
18. Стогний А.И., Корякин С.В. Стабилизация свойств пленок CoCu при воздействии облучения пучками ионов кислорода. // Новые магнитные материалы микроэлектроники: Сб. тр. XVII Межд. Школы-семинара, Москва (20-23 июня 2000). – М., 2000. – С. 124-125.
19. Стогний А.И., Курмашов В.И., Тимошков Ю.В., Ореховская Т.И., Корякин С.В., Лобко Э.В. Особенности ионно-лучевого травления толстых полиимидных пленок. // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: Материалы межд. научн. техн. конф., Минск. Нарочь, Беларусь (25-29 сентября 2000). – Мн.: БГУИР, 2000. – С. 169-172.
20. Stognij A.I., Koriakin S.V., Yablonski G.P., Pavlovskii V.N., Lutsenko E.V., Heuken M., Schineller B., Heime K. Features of reactive ion-beam etching of GaN using O₂+Ar working gas. // Нитриды галлия, индия и алюминия. Структуры и приборы: Тез. докл. 4-го всерос. сов., Санкт – Петербург (18-19 сентября 2000). - С –Пб.: СПбГТУ, 2000. – С. 88-89.
21. Stognij A.I., Koriakin S.V., Yablonski G.P., Pavlovskii V.N. Reactive ion-beam etching of GaN epitaxial layers using O₂+Ar gas mixture. // Int. workshop on Nitride Semiconductors “IWN-2000”, Nagoya. Japan (September 2000). – Nagoya, 2000. – P. 421-422.
22. Стогний А.И., Корякин С.В. Исследование аномального дефицита кобальта на поверхности пленок неоднородных сплавов CoCu. // Взаимодействие излучений с твердым телом: Сб. тр. IV Межд. науч. конф. ВИТТ 2001, Минск (3-5 октября 2001). - Мн.: БГУ, 2001 – С. 382-384.

Корякин Сергей Владимирович "Модификация поверхности пленок CoCu и CoP облучением низкоэнергетическими ионами кислорода и аргона"

Ключевые слова: пленочные структуры, поверхность, ионное облучение, окисление, планаризация, окисленный слой.

Целью настоящей работы является установление особенностей воздействия облучения пучками ионов аргона и кислорода на свойства пленочных структур CoCu и CoP, полученных методом электроосаждения: свойства поверхности (состав, рельеф поверхности), структуру, электрические и магнитные свойства пленок в целом.

Впервые пленочные структуры CuCo и CoP подвергались воздействию облучения пучками ионов аргона и кислорода с энергией $E=0,1...4$ кэВ и плотностью потока $F_i=6 \times 10^{14} \dots 3 \times 10^{15}$ ион/см²·с и проводилось комплексное исследование исходных и облученных образцов с использованием оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии; рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии; мессбауэровской спектроскопии на конверсионных электронах; рентгеновской дифракции; СКВИД-магнитометрии и др. Установлен и исследован эффект планаризации рельефа поверхности пленочных структур CuCo и CoP при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода, происходящий в результате запыления впадин и распыления микровыступов, слияния мелких неоднородностей поверхности в единое целое, что вызвано процессами распыления и окисления поверхности, а также перпыления материала поверхности. Установлена трехстадийность механизма формирования сплошного окисленного слоя толщиной десятки нанометров на поверхности пленок CuCo и CoP при облучении низкоэнергетическими ионами кислорода. Процесс формирования окисленного слоя условно можно разделить на три этапа: 1 – этап формирование островкового окисленного слоя на поверхности, 2 – этап роста окисленного слоя и планаризации рельефа поверхности, 3 – этап достижения равновесия в процессах распыления поверхности и формирование окисленного слоя.

Карякін Сяргей Уладзіміравіч "Мадыфікацыя паверхні плёнак CoCu і CoP апраменьваннем нізкаэнергетычнымі іонамі кіслароду і аргону"

Ключавыя словы: плёначныя структуры, паверхня, іоннае апраменьванне, планарызацыя, акіслены слой.

Мэтай даследвання з'яўляецца ўстанаўленне асаблівасцей уздзеяння апраменьвання пучкамі іонаў аргону і кіслароду на ўласцівасці плёначных структур CoCu і CoP, якія атрыманы метадам электраасажджэння: уласцівасці паверхні (састаў, рэльеф паверхні), структуру, электрычныя і магнітныя ўласцівасці плёнак.

Упершыню праведзена комплекснае даследванне плёначных структур CuCo і CoP з выкарыстаннем аптычнай, растравай электроннай і атамна-сілавой мікраскапій, рэнтгенаўскай фотаэлектроннай спектраскапіі, мёсбаўэраўскай спектраскапіі на каверсійных электронах, рэнтгенаўскай дыфракцыі, ЗКВІД-магнітаметрыі і інш. Упершыню плёначныя структуры CuCo і CoP падвяргаліся уздзеянню апраменьвання іонамі аргону і кіслароду з энергіяй $E=0,1...4$ кэВ і шчыльнасцю патока $F_i=6 \times 10^{14}...3 \times 10^{15}$ іон/см²·с. Выяўлены і даследаваны эфект планарызацыі рэльефу паверхні плёнак CuCo і CoP, які адбываецца ў працэсе нізкаэнергетычнага апраменьвання іонамі кіслароду ў выніку запалення ўпадзін і распылення мікравыступаў, зліцця дробных неаднароднасцей паверхні ў суцельнае. Даследван працэс і выяўлена трохстадыйнасць механізму фарміравання акіслення слоя на паверхні плёнак CuCo і CoP пад уплывам апраменьвання нізкаэнергетычнымі іонамі кіслароду. Працэс фарміравання акіслення слоя на паверхні плёнак CoCu і CoP умоўна магчыма падзяліць на тры этапы: 1 – этап фарміравання вастраўковага акіслення слоя на паверхні, 2 – этап росту акіслення слоя і планарызацыі рэльефу паверхні, 3 – этап дасягнення раўнаважлікасці ў працэсах распылення паверхні і фарміравання акіслення слоя. Выяўлена, што таўшчыня акіслення слоя дасягае дзесяткі нанаметраў, а суцельнасць залежыць ад зыходнага стану плёнкі.

SUMMARY

Koriakin Sergey "The Modification of CoCu and CoP film surface by low energy oxygen and argon ion irradiation".

Key words: films, surface, ion beam irradiation, planarization, oxidation, oxidated layer.

The aim of the work is an investigation of the features of influence of irradiation by oxygen and argon ions on the properties of electrodeposited CoCu and CoP films: the surface properties, structure, electric and magnetic properties.

CoCu and CoP films were investigated by optical microscopy, electron-scan microscopy, AFM, conversion electron Mossbauer spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, X-ray diffraction, SQUID and others. For the first time the CoCu and CoP films were irradiated by oxygen and argon ions with energy $E=0,1...4$ keV and flux density $F_i=6\times 10^{14}...3\times 10^{15}$ ion/cm²·c. The surface planarization effect of CoCu and CoP films irradiated by low energy oxygen ions was established and investigated. The surface planarization takes place due to the processes of sputtering, oxidation and resputtering of materials on surface. Three-stage mechanism of formation of continuous oxidated layers on the CoCu and CoP film surface during oxygen ion beam irradiation was established. There are three stage of oxidated layer formation: 1 – the formation of discontinuous oxidated layer; 2 – the increase of oxygen layer and surface planarization; 3 – the balance state in sputtering process and oxidated layer formation. The oxidated layer thickness can amounts to dozens of nanometers.