

10;11;12

Особенности перераспределения кобальта по поверхности пленок неоднородных сплавов кобальт–медь

© А.И. Стогний, С.В. Корякин, Н.Н. Новицкий

Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии,
220072 Минск, Белоруссия
e-mail: stognij@ifftp.bas-net.by

(Поступило в Редакцию 13 сентября 2001 г. В окончательной редакции 15 марта 2002 г.)

Приведены результаты сравнительного анализа поверхности электролитически осажденных пленок $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($x = 8, 11$ и $20 \text{ at}\%$) толщиной до $1 \mu\text{m}$ и пленок толщиной до $0.2 \mu\text{m}$, полученных осаждением продуктов распыления мишеней, составленных из электроосажденных пленок соответствующего состава, пучком ионов аргона. Используются методы атомно-силовой микроскопии, растровой электронной микроскопии, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Данные последней свидетельствуют об отсутствии кобальта на поверхности электроосажденных пленок, о его наличии в объеме и на поверхности пленок, полученных ионным распылением, о менее существенных расхождениях в линиях фотоэлектронных спектров меди у пленок одного состава, полученных разными способами. Для объяснения полученных результатов предложена качественная модель, согласно которой процессы слияния субзерен основной медной компоненты в крупные образования с последующим приобретением ими на свободной поверхности вида островков правильной овальной формы способствуют миграции атомов кобальта со свободной поверхности в область приповерхностных пор. Наличие определенной доли высокоэнергетических частиц в потоке продуктов распыления мишеней и бомбардировка ими фронта поверхности роста пленок, полученных ионным распылением, сопровождается внедрением наиболее быстрых распыленных атомов кобальта в медную матрицу в виде точечных дефектов.

Введение

Вопросам упорядочения на поверхности однородных сплавов металлов уделяется в научной литературе существенное внимание ввиду большой практической значимости свойств самих сплавов и фундаментальной важности процессов, протекающих при упорядочении [1–4]. Так, в [1,2] показано, что в однородных сплавах металлов, где один из компонентов является химически более активным, наблюдается формирование развитой пористой поверхностной структуры из более инертного компонента в результате перераспределения этого компонента по поверхности после удаления химически активной составляющей, например, селективным растворением в электролите. К сожалению, в этих работах отсутствуют данные анализа состава формируемой пористой структуры. В работах [3,4] рассматриваются особенности процесса сплавления, протекающего в условиях высокого вакуума при осаждении хрома на поверхность железа и, наоборот, при осаждении железа на поверхность хрома. Показано, что перераспределение элементов в области интерфейса после осаждения играет существенную роль при формировании многослойных структур железо–хром в целом и их магнитных свойств в частности.

Тонкие пленки неоднородных магнитных сплавов кобальт–медь также являются объектом интенсивных научных исследований [5], однако анализ состава их поверхности представлен в гораздо меньшем объеме. Здесь большее внимание уделяется вопросам структурного упорядочения, которое рассматривается или на

примере ультратонких пленок кобальта на поверхности более толстых пленок меди в случае мультислойных структур [6], или на примере ультратонких пленок кобальта на монокристаллической поверхности меди [7]. Предлагаемая работа посвящена анализу состояния поверхности и приповерхностной области тонких пленок кобальт–медь и является продолжением [8,9]. На основе сравнительного анализа состояния поверхностей пленок, полученных в равновесных условиях электроосаждения, и пленок, полученных в существенно неравновесных условиях ионного распыления электроосажденных пленок как мишеней, сделана попытка дать объяснение особенностям процесса упорядочения кобальта на поверхности.

Экспериментальная методика

Пленки $\text{Co}_x\text{Cu}_{100-x}$ ($6 \leq x \leq 35$) толщиной до $1 \mu\text{m}$ осаждались из электролита, состав которого вместе с методикой осаждения были взяты из [10]. Аналогично [10] состав пленок изменялся варьированием концентрации сульфата кобальта в электролите при постоянстве остальных условий. Далее часть электроосажденных пленок (ЭОП) одного состава использовалась в качестве мишеней для ионного распыления. Ионное распыление проводилось на установке, описанной в [11]. Пучок ионов аргона имел энергию 1 keV и плотность тока пучка ионов 0.25 mA/cm^2 . Предельный вакуум составлял не хуже 10^{-4} Pa , а рабочий вакуум — не хуже $2 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$. В результате сбора продуктов распы-

ления получались пленки толщиной около $0.2 \mu\text{m}$, далее по тексту они называются ионно-лучевыми пленками (ИЛП). Подложки размером $20 \times 20 \text{ mm}$ для осаждения ЭОП и ИЛП изготавливались из одного листа прокатанной фольги меди толщиной $50 \mu\text{m}$. Непосредственно перед осаждением поверхность подложек травилась в 5%-ном растворе соляной кислоты и производилась последовательная очистка их поверхности вначале пучком ионов кислорода, а потом пучком ионов аргона. В обоих режимах очистки задавались плотность тока пучка ионов 0.2 mA/cm^2 и их энергия 400 eV . Оптический микроскоп „NU-2“ (Германия) с увеличением до шестисот крат применялся для визуального осмотра образцов. Сканирующий электронный микроскоп „Nanolab-7“ с дополнительным энергодисперсным анализатором „System 810-500“ (Англия) использовался для анализа состояния поверхности (РЭМ изображение) и для определения объемного состава пленок (электронно-зондовый микроанализ). Атомно-силовой микроскоп (АСМ) „Фемтоскан-001“ (МГУ, Россия) с кремниевым кантиливером („Park Scientific“, США), работающий в контактном режиме, применялся для получения АСМ изображений поверхности. Анализ поверхностного слоя толщиной до 5 nm проводился методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Магний катод (линия $\text{MgK}\alpha$, энергия фотонов 1253.6 eV) служил источником рентгеновского излучения в РФЭС спектрометре. Калибровка шкалы энергии связи производилась относительно линии $\text{C}(1s)$, дополнительно регистрировались линии $\text{O}(1s)$, $\text{Co}(2p)$ и $\text{Cu}(2p)$. Поверхность образцов площадью $5 \times 5 \text{ mm}$ предварительно подвергалась ионной очистке пучком ионов аргона энергией 500 eV и током пучка ионов $10 \mu\text{A}$ источника ионов спектрометра в течение 5 min . Более длительная очистка поверхности производилась при проведении анализа приповерхностного слоя.

Экспериментальные результаты

Анализ поверхности рассматриваемого набора составов ЭОП показал, что в качестве распыляемых мишеней могут быть использованы только пленки с содержанием кобальта $8 \leq x \leq 20 \text{ at}\%$. Так, поверхности пленок с содержанием кобальта $x < 8 \text{ at}\%$ не имели металлического блеска и представляли собой совокупность отдельных неоднородностей случайной формы. На рис. 1, *a* показано РЭМ изображение характерного участка ЭОП $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$. Видно, что поверхность не является сплошной, а размеры крупных неоднородностей превышают $1 \mu\text{m}$. Отсутствие сплошной поверхности у ЭОП с содержанием кобальта $x < 8 \text{ at}\%$ не позволяет проводить адекватный анализ состояния поверхности методами РФЭС и АСМ. Кроме этого, отсутствие определенности в том, что считать толщиной у этих пленок, не позволяет конкретизировать условия ионного распыления. ЭОП с содержанием кобальта $x \geq 8 \text{ at}\%$ имели сплошную

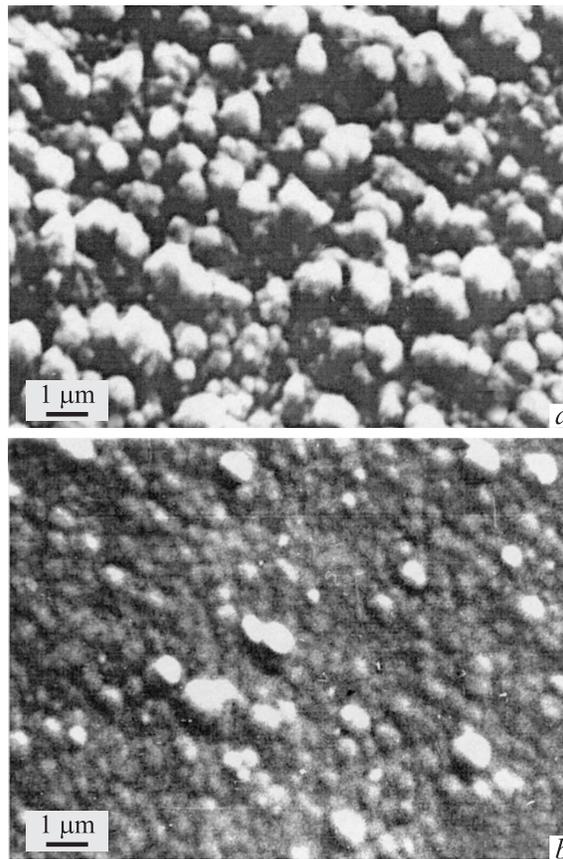


Рис. 1. РЭМ изображения поверхностей электроосажденных пленок $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$ (*a*) и $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ (*b*).

поверхность с характерным металлическим блеском. На рис. 1, *b* показано характерное РЭМ изображение участка поверхности ЭОП с содержанием кобальта $x = 8 \text{ at}\%$. РЭМ изображение позволяет выявить на фоне относительно сплошной поверхности, состоящей из равномерно расположенных впадин и выступов, наличие лишь небольшого числа неоднородностей правильной округлой формы с гораздо меньшими размерами, чем размеры крупных неоднородностей на поверхности ЭОП с содержанием кобальта $x < 8 \text{ at}\%$. По мере увеличения содержания кобальта от 8 до $35 \text{ at}\%$ поверхность ЭОП принимает более гляцевый вид, оттенок цвета поверхности изменяется от несколько красного до более белого цвета, количество и размеры отдельных крупных поверхностных неоднородностей уменьшаются. Однако во время ионного распыления ЭОП с содержанием кобальта $x > 20 \text{ at}\%$ было зафиксировано растрескивание и вспучивание отдельных областей пленок вплоть до отшелушивания от подложек, что обусловило появление неконтролируемого вклада от медной подложки в состав потока распыляемого материала. Поэтому пленки с содержанием кобальта $20 < x < 35 \text{ at}\%$ были исключены из дальнейшего рассмотрения.

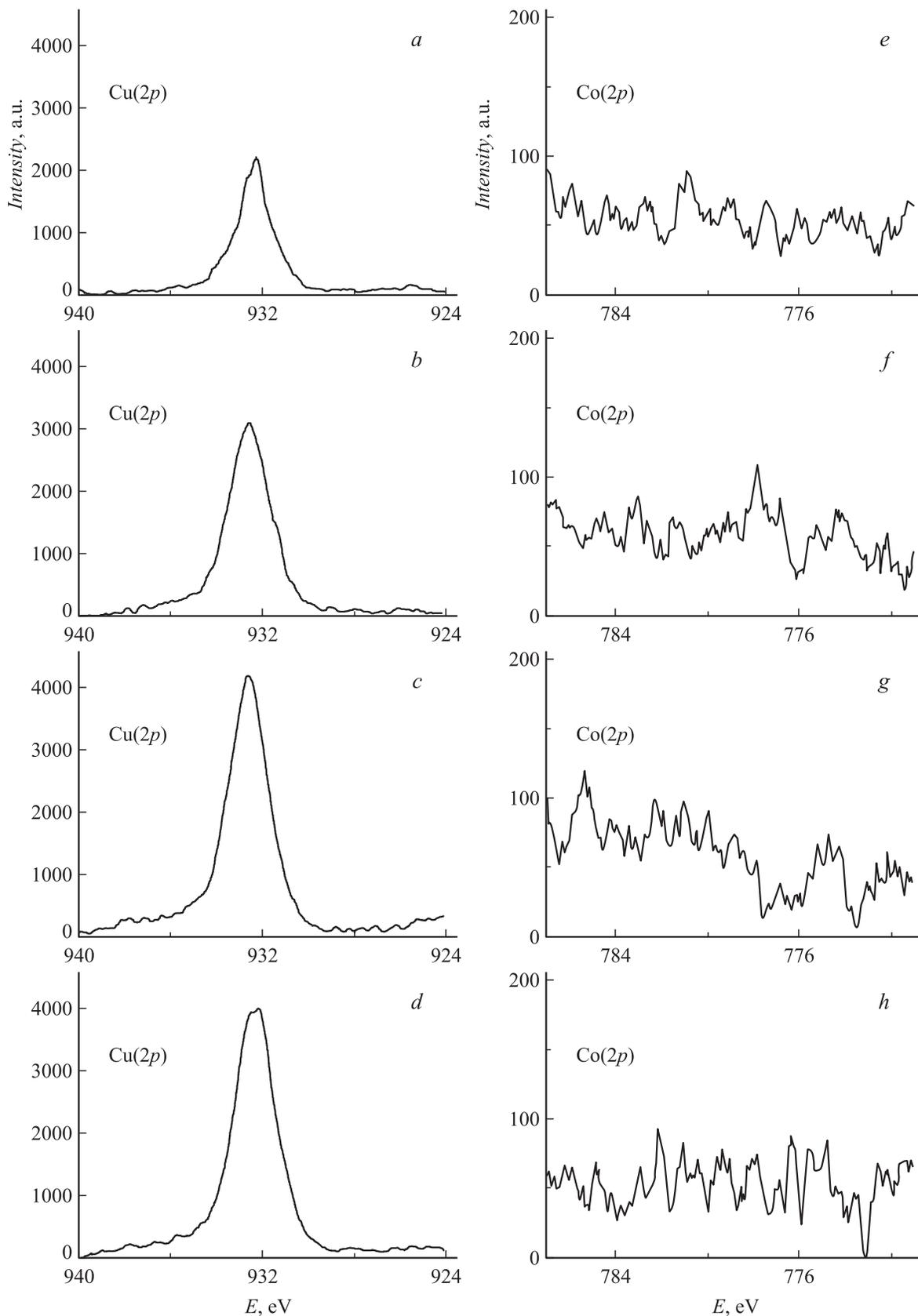


Рис. 2. РФЭ спектры поверхностей электроосажденных пленок (линия Cu(2p) $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ (a), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ (b), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ после дополнительной ионной очистки (c), $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ (d), линия Co(2p) $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ (e), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ (f), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ после дополнительной ионной очистки (g), $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ (h)).

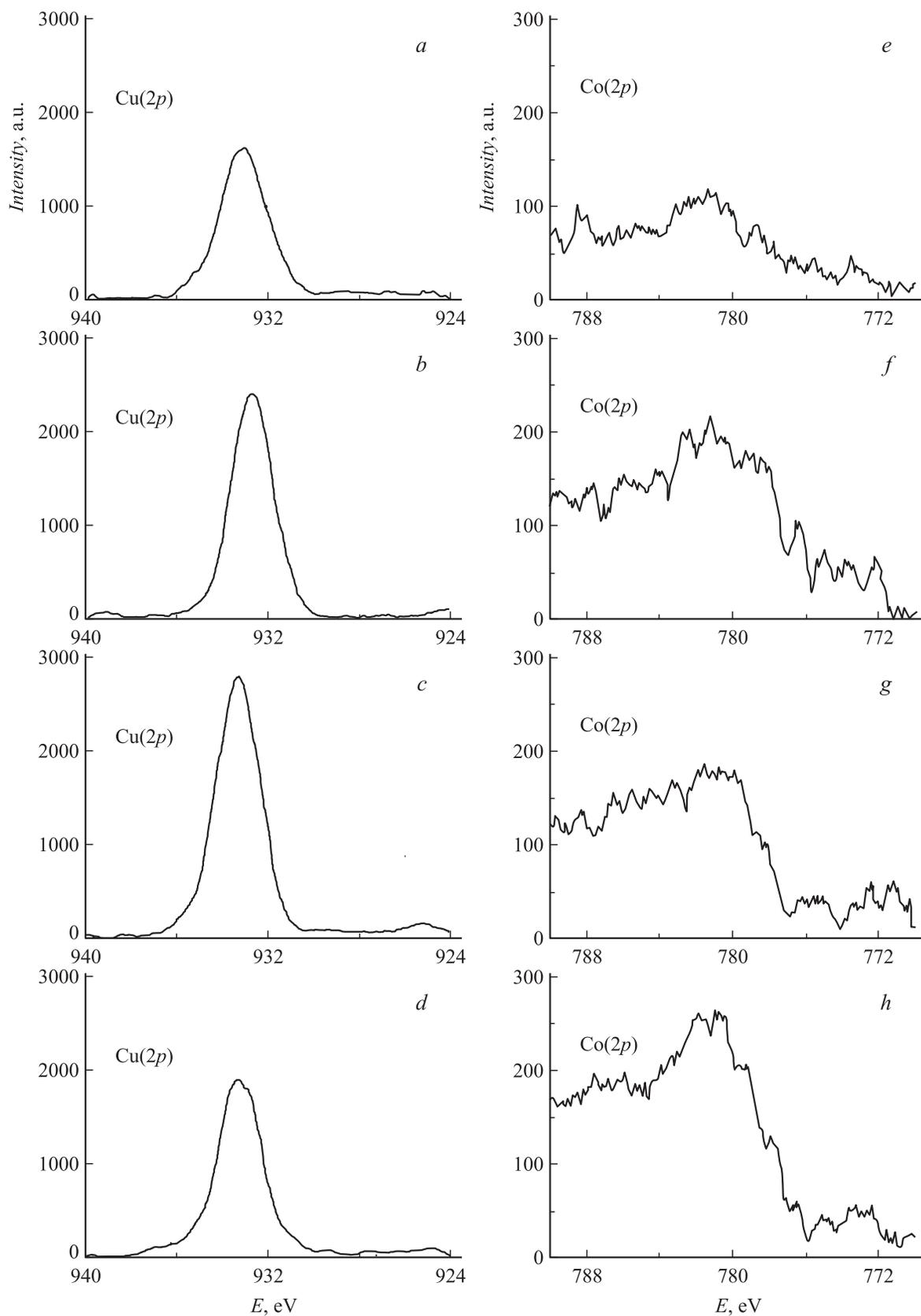


Рис. 3. РФЭ спектры пленок, полученных ионно-лучевым распылением (линия Cu(2p) $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ (a), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ (b), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ после дополнительной ионной очистки (c), $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ (d), линия Co(2p) $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ (e), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ (f), $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ после дополнительной ионной очистки (g), $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ (h)).

Линии $\text{Cu}(2p)$ и $\text{Co}(2p)$ РФЭ спектров поверхностей ЭОП характерных составов $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$, $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ и $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ показаны на рис. 2. Состав сплавов определялся методом электронно-зондового микроанализа. Видно, что линия $\text{Cu}(2p)$ поверхности образца $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ является наименее интенсивной по сравнению с линиями $\text{Cu}(2p)$ поверхности образцов других составов, несмотря на то что объемная концентрация медной компоненты у пленок $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ наибольшая. Дополнительная ионная очистка поверхностей в течение 10 min привела к заметному увеличению интенсивности линии $\text{Cu}(2p)$ поверхности только для ЭОП состава $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ (рис. 2, *c*) и не вызвала заметных изменений формы спектров. Следовательно, между значениями содержания меди в объеме и их поверхностными концентрациями существуют различия. Однако относительный рост поверхностной концентрации меди при уменьшении ее содержания в объеме может в определенной степени быть обусловлен и относительным увеличением поверхностной плотности ЭОП. Это согласуется также с выводами о росте степени гладкости и однородности поверхности по мере увеличения содержания кобальта в составе, сделанными на основе РЭМ изображений и визуальных наблюдений. Кроме того, интенсивность линий $\text{C}(1s)$ и $\text{O}(1s)$ исходной поверхности образца $\text{Co}_8\text{Cu}_{92}$ была максимальной по сравнению с другими образцами и мало изменялась после ионной очистки различной продолжительности, а у образцов $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ и $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ уменьшалась после ионной очистки до постоянного значения. Это также свидетельствует в пользу относительно большей поверхностной плотности ЭОП с большим содержанием кобальта. Однородный характер распределения кобальта по толщине, ранее установленный для ЭОП рассматриваемого набора составов в [8–10], вместе с предположением о статистическом характере распределения кобальта по поверхности позволяли допустить существование особенностей и в поведении линии $\text{Co}(2p)$ РФЭ спектра поверхности исследуемых образцов, обусловленные особенностями поведения поверхностной концентрации компонентов по мере изменения объемной концентрации меди. Однако на полученных РФЭ спектрах линии $\text{Co}(2p)$ поверхности не удалось разрешить как с изменением содержания кобальта в составе (рис. 2, *e, g*), так и после ионной очистки различной длительности (рис. 2). Согласно этим данным, в поверхностном слое толщиной менее 5 nm ЭОП рассматриваемых составов кобальт отсутствует как на исходной поверхности, так и на поверхности, подвергнутой ионной очистке.

Образцы ИЛП толщиной около 0.2 μm , согласно данным электронно-зондового микроанализа, имели тот же состав, что и ЭОП, используемые в качестве мишеней. Все ИЛП характеризовались одинаково гладкими по внешнему виду поверхностями с характерным металлическим блеском и более белым оттенком у образцов с большим содержанием кобальта в объеме. РФЭ спектры поверхности ИЛП приведены на рис. 3. Линия

$\text{Cu}(2p)$ поверхности $\text{Co}_6\text{Cu}_{94}$ (рис. 3, *a*) имеет, как и в случае ЭОП, меньшую интенсивность по сравнению с линиями примерно одинаковой интенсивности $\text{Cu}(2p)$ поверхностей образцов $\text{Cu}_{11}\text{Co}_{89}$ (рис. 3, *b*) и $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$ (рис. 3, *d*). Дополнительная ионная очистка поверхности практически не сказывалась на форме и интенсивности линии $\text{Cu}(2p)$ (рис. 3, *c*). Для образцов всех составов линии примесей углерода и кислорода имели максимальную интенсивность на исходной поверхности и после ионной очистки в течение нескольких минут их интенсивность в два-три раза снижалась, приобретая постоянные значения. Последнее свидетельствовало в пользу того, что основная часть примесей органической природы находится непосредственно на поверхности, их происхождение обусловлено в основном условиями хранения. Меньшая часть примесей, которая имеет постоянную концентрацию по толщине, обусловлена вакуумными условиями ионного распыления и наличием примесей в мишенях. Характер поведения линии $\text{Cu}(2p)$ РФЭ спектра в зависимости от объемного состава пленок позволяет предположить, что, как и в случае ЭОП, большая поверхностная плотность медной компоненты наблюдается для образцов составов $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ и $\text{Co}_{20}\text{Cu}_{80}$, а меньшая — $\text{Co}_8\text{Cu}_{94}$. Однако в отличие от случая ЭОП линии $\text{Co}(2p)$ РФЭ спектра поверхности ИЛП разрешаются для всех образцов рассматриваемых составов (рис. 3, *e-h*). Интенсивность линии $\text{Co}(2p)$ тем больше, чем больше содержание кобальта в объемном составе (рис. 3, *e, f, h*). РФЭ спектр кобальта слабо зависит от длительности ионной очистки (рис. 3, *g*). Он имеет сложный вид для ИЛП всех составов и содержит ряд пиков, смещенных относительно значения энергии связи для металлического кобальта 778 eV в сторону больших значений, что свидетельствует о неоднородном характере окружения атомов кобальта в поверхностном слое [12].

АСМ изображения характерных участков поверхности подложки и пленок на примере ЭОП $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ и ИЛП $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ показаны на рис. 4. Видно, что текстура поверхности подложки, обусловленная прокаткой меди при изготовлении фольги (рис. 4, *a*) не проявляется на поверхности ЭОП (рис. 4, *b*). Поверхность ИЛП (рис. 4, *c*) является более однородной вдоль направления прокатки, чем поперек. Видно также, что даже относительно малой толщины $\sim 0.2 \mu\text{m}$ ИЛП оказывается достаточно для сглаживания характерных неровностей рельефа поверхности подложки от исходного значения около 30 nm до менее ~ 10 nm. Поверхность ЭОП состоит из сравнительно крупных островков, в основном с плавными формами и высотой в десятки нанометров, но с различными поперечными размерами. Между островками находятся относительно небольшие по площади мелкие впадины и редкие, но глубокие крупные впадины площадью более 100×100 nm. Такой вид поверхности характерен для пленок, полученных методом электроосаждения, а наличие крупных впадин можно связать с существованием

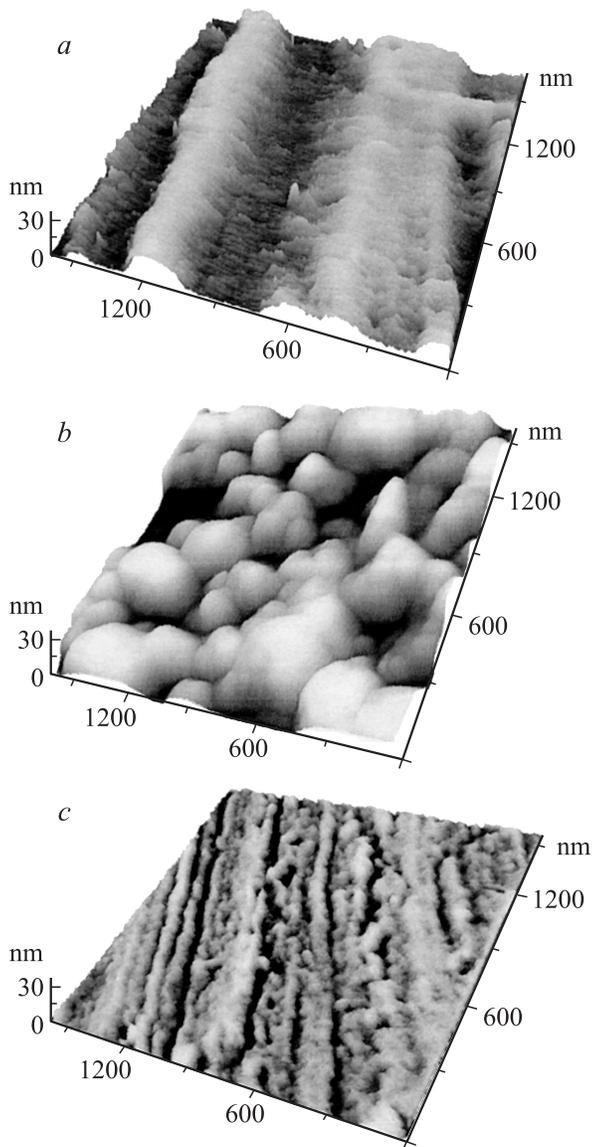


Рис. 4. АСМ изображения поверхностей медной подложки (а), электроосажденных пленок $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$ (б) и пленок $\text{Co}_{11}\text{Cu}_{89}$, полученных ионным распылением (с).

областей пониженной плотности в электроосажденных пленках или несквозных поверхностных пор [13].

Обсуждение результатов

Представленные экспериментальные данные свидетельствуют о существовании отличий в процессах упорядочения в объеме и на поверхности пленок неоднородных сплавов CoCu . Относительно однородное распределение кобальта наблюдается только по объему ЭОП, включая поверхностный слой толщиной $\sim 0.1 \mu\text{m}$, что согласуется с ранее полученными результатами [8–10]. Непосредственно на поверхности компоненты сплава перераспределяются таким образом, что кобальт, соглас-

но данным РФЭС, отсутствует (рис. 2, *e, f*). Если происходит непрерывное ионное распыление поверхности (в нашем случае со скоростью $\sim 10 \dots 30 \text{ nm/min}$), то поверхностное перераспределение кобальта не успевает происходить, он распыляется вместе с медной матрицей, причем его доля в распыляемом потоке пропорциональна объемной концентрации. Поэтому составы ИЛП и их мишеней из ЭОП соответствуют друг другу. Прерывание процессов ионной очистки в РФЭС спектрометре или ионного распыления в ионно-лучевой установке приводит к восстановлению дефицита кобальта на поверхности ЭОП (рис. 2, *g, h*). Согласно данным конверсионной электронной мессбауэровской спектроскопии [9], где резонансный атом железа фиксировался только в чисто медном или в смешанном окружении кобальт–медь в поверхностном слое толщиной до $0.15 \mu\text{m}$, можно предположить, что кобальт в области свободной поверхности также находится в виде мелких наноразмерных образований, распределенных по поверхности медной матрицы. Если считать островки правильной формы (рис. 4, *b*) свободной поверхностью медной матрицы, формирующейся во время роста ЭОП путем слияния субзерен размерами $\sim 10 \text{ nm}$, как это было показано ранее в [10], то можно предположить, что при этом в результате миграции по поверхности атомы кобальта занимают более энергетически выгодные положения в окрестности областей пониженной плотности (поверхностных пор), а не непосредственно на свободной поверхности медной матрицы (если дополнительно принять во внимание отсутствие сплавляемости между медью и кобальтом в массивном состоянии). Во время ионного распыления на поверхность оказывается воздействие ионно-пучковой плазмы и ионным облучением, поэтому она перестает быть свободной, одновременно изменяются условия для поверхностного перераспределения кобальта и в результате наблюдается обычное послойное распыление поверхности, т.е. за относительно большие промежутки времени распыляются как медь, так и кобальт пропорционально объемным концентрациям. После прекращения действия облучения свободная поверхность вновь приобретает внешний вид, близкий к исходному состоянию, что было ранее показано и в [8]. В рассматриваемом нами случае ЭОП поверхностный дефицит кобальта существует как до (рис. 3, *e, f*), так и после (рис. 3, *g, h*) воздействия ионного облучения, т.е. является в определенном смысле восстанавливаемым и его происхождение связано не со спецификой применения РФЭС для анализа состояния поверхности [12], а с особенностями протекания процессов упорядочения на поверхностях рассматриваемых неоднородных сплавов.

Для объяснения различий между состоянием поверхности ЭОП и ИЛП одного состава на однотипных подложках нужно принять во внимание, что осаждение ИЛП протекает в более неравновесных условиях, чем для ЭОП. Одна из причин неравновесности условий распыления заключается в характере функции распределения по энергиям потока распыляемых атомов кобальта

и меди. Этот поток условно можно разбить на две части: основную, состоящую из распыленных атомов со средней энергией, примерно равной теплоте испарения (для кобальта — 4.43 eV/atom, для меди — 3.52 eV/atom), и высокоэнергетическую (до 10% от общего потока), состоящую из атомов с энергией $\sim 40 \dots 200$ eV [14]. Энергия атомов высокоэнергетического „хвоста“ функции распределения оказывается достаточной для реализации режима „автооблучения“ поверхности роста ИЛП. Согласно оценкам, проведенным с использованием программы SRIM2000 [www.srim.org], средний пробег атомов кобальта с энергией 50 eV в массивной матрице меди составляет 0.4 ± 0.1 nm и сопровождается образованием 0.6 вакансии/ион, с энергией 100 eV — 0.5 ± 0.1 nm и 1.4 вакансии/ион, с энергией 150 eV — 0.5 ± 0.2 nm и 2.2 вакансии/ион соответственно. Следовательно, часть атомов кобальта высокоэнергетического „хвоста“ в состоянии внедряться в процессе осаждения в медную матрицу в виде точечных дефектов. Естественно, что концентрация этих атомов кобальта в поверхностном слое значительно меньше объемной, а их РФЭ спектры из-за плотного медного окружения существенно отличаются от РФЭ спектра поверхности чистого кобальта [12], что согласуется с приведенными данными (рис. 3, $e-h$). Косвенно существование режима „автооблучения“ подтверждается преимущественным заполнением впадин рельефа подложки по сравнению с выступами во время роста ИЛП и большей однородностью последних вдоль направления прокатки (рис. 4, c). Эти особенности свидетельствуют о существовании определенной анизотропии в самом процессе осаждения, которая как раз и может быть обусловлена существованием высокоэнергетической части потока распыленных атомов, стимулирующей при столкновении с поверхностью поверхностную миграцию адатомов вдоль линий прокатки, а не поперек. Наличие облучения при осаждении также способствует образованию более мелких островков с более плотной упаковкой в случае ИЛП по сравнению с ЭОП одного состава.

Заключение

Приведенные результаты сравнительных исследований состояния поверхностей пленок неоднородных сплавов CoCu, полученных электроосаждением и ионно-лучевым распылением, указывают на существование принципиальных различий в распределении кобальта, которые необходимо учитывать при анализе свойств этих сплавов. Перераспределение несвязанной компоненты кобальта по свободной поверхности медной матрицы в процессе осаждения и наличие внедренных в виде точечных дефектов атомов кобальта в зерна меди при ионно-лучевом распылении необходимо учитывать при рассмотрении вопросов формирования интерфейса в пленках неоднородных сплавов CoCu, особенно при получении многослойных структур.

В заключение авторы выражают свою благодарность В.М. Федосюку и Т.А. Тоичкому за дискуссии, которые стимулировали появление данной работы и особую благодарность О.М. Стукалову и К.Н. Каспарову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Stratmann M., Rohwerder M.* // Nature. 2001. Vol. 410. P. 420–423.
- [2] *Erlebacher J., Aziz M.J., Karma A. et al.* // Nature. 2001. Vol. 410. P. 450–453.
- [3] *Davies A., Strosio J.A., Priece D.T., Celotta R.J.* // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 76. N 22. P. 4175–4178.
- [4] *Choi Y.J., Jeong I.C., Park J.-Y. et al.* // Phys. Rev. 1999. Vol. 59. N 16. P. 10 918–10 291.
- [5] *Keefe A.P., Kasyutich O.I., Schwarzacher W. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1998. Vol. 73. N 7. P. 1002–1004.
- [6] *Shima M., Salamanca-Riba L., Moffat T.P., McMichael R.D.* // JMMM. 1999. Vol. 198–199. P. 52–54.
- [7] *Allenspach R., Bischof A., Dürig U.* // Surf. Sci. 1997. Vol. 381. P. L573–L580.
- [8] *Стогний А.И., Корякин С.В.* // Поверхность. 2001. № 6. С. 74–79.
- [9] *Стогний А.И., Корякин С.В., Вирченко В.А.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 6. С. 87–94.
- [10] *Tochitskii T.A., Jones G.A., Blythe H.J. et al.* // JMMM. 2001. Vol. 224. P. 221–232.
- [11] *Стогний А.И., Свирин В.Т., Тушина С.Д. и др.* // ПТЭ. 2001. № 3. С. 151–154.
- [12] *Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy / Ed. by D. Briggs, M.P. Seah.* New York: John Wiley & Sons Ltd., 1983. 600 p.
- [13] *Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И.* // Поры в твердом теле. М.: Энергоатомиздат, 1990. 376 с.
- [14] *Thompson M.V.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 1987. Vol. B 18. P. 411–429.