

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ Ni И Mo ИЛИ Cr

И.П. Бурык, С.И. Воробьев, Л.В. Одиногорец

Сумский государственный университет

Украина

Поступила в редакцию 29.04.2009

Изучен эффект тензочувствительности, диффузионные процессы и фазовый состав двухслойных пленок на основе Ni и Mo или Ni и Cr. На основе исследований методом ВИМС произведен расчет эффективных коэффициентов взаимной диффузии атомов. Методом электронной микроскопии изучен фазовый состав двухслойных пленок Ni/Mo и Ni/Cr и сделан вывод о неполном сохранении индивидуальности отдельных слоев непосредственно после конденсации образцов. Получено, что величина коэффициента тензочувствительности двухслойных пленок лежит в пределах от 3 до 8 единиц, причем при увеличении общей толщины пленки монотонно уменьшается.

ВВЕДЕНИЕ

Тензорезистивный метод является одним из наиболее распространенных способов измерения продольной, поперечной и других видов деформации. Электрические сенсоры деформации (тензорезисторы), разработанные более 50 лет назад, сегодня технически усовершенствованы и доступны в различных вариантах исполнения [1]. В большинстве современных тензометрических датчиков, которые выпускаются промышленностью (Vis-hay, НВМ, ZEMIC, Kyowa, Uticell и др.), используют четыре чувствительных пленочных элемента, образующих схему моста Уитстона.

Количественной характеристикой тензорезистивного эффекта является коэффициент продольной тензочувствительности (КТ) γ_l , величина которого зависит от изменения геометрических размеров (длины и поперечного сечения) и удельного сопротивления чувствительного элемента тензодатчика в процессе деформации. Вследствие проявления размерных эффектов в электрофизических и механических свойствах, нанокристаллические и наноразмерные металлические пленки обладают большим значением КТ [2, 3] по сравнению с массивными материалами (фольги и проволоки). Дополнительное увеличение КТ в многослойных пленочных системах можно получить за счет рассеяния электронов на границах раздела слоев (интерфейсах), а увеличение интервала рабочих температур – за счет применения компонент из тугоплавких металлов [4].

В промышленном производстве тензодатчиков на основе массивных и пленочных [5, 6] материалов используют сплавы с высокой температурной стабильностью (нихром, константан, хастеллой и др.), однако значение КТ при этом остается низким (около 2 единиц). Применение Ni, Mo и Cr в качестве компонент многослойных пленочных систем позволяет получить более высокое значение КТ.

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения и исследования тензорезистивных свойств двухслойных пленок Ni/Mo и Ni/Cr использовалась вакуумная установка типа ВУП-5М с диффузионной откачкой (вакуум в рабочем объеме $\sim 10^{-4}$ Па). Получение пленочных образцов производилось методом электронно-лучевого (Mo) и терморезистивного (Ni и Cr) испарения. Температура подложки составляла $T_p = 350 \div 400$ К, скорость конденсации $\omega \approx 1 \div 3$ нм/с. Диффузионные процессы в двухслойных пленочных системах были изучены методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) с помощью прибора MS-7201M. Исследования структуры и фазового состава свободных пленок проведены на просвечивающем электронном микроскопе ПЕМ-125К.

Тензорезистивные свойства пленок на титановых подложках (Ti) были исследованы по схеме “нагрузка \leftrightarrow снятие нагрузки” в интервале от 0 до 1% с шагом 0,05%. На основе

экспериментальных зависимостей сопротивления R от продольной деформации ϵ_ℓ рассчитывался КТ по соотношению

$$\gamma_\ell = \frac{1}{R_n} \cdot \frac{\Delta R}{\epsilon_\ell}.$$

Для получения данных об особенностях протекания диффузионных процессов и структурно-фазовом составе производился отжиг образцов на ситалловой подложке в интервале температур $T = 300 - 700$ К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ

Результаты исследований, проведенных методами вторично-ионной масс-спектрометрии, показали, что в неотожженном состоянии пленочные системы Ni/Mo и Ni/Cr, несмотря на определенное конденсационно-стимулированное взаимное проникновение атомов, сохраняют индивидуальность отдельных слоев (на рис. 1а в качестве примера приведены диффузионные профили для системы Ni/Mo). Низкотемпературный отжиг образцов в вакууме приводит к дальнейшему взаимному проникновению атомов, однако термодиффузия протекает медленнее, чем конденсационно-стимулированная диффузия. После отжига при температуре $T \approx 700$ К в течение 15 минут индивидуальность слоев до значительной степени сохраняется, так что структурное состояние двухслойной пленки можно характеризовать как квазибиблина.

Эффективные коэффициенты диффузии (D) были рассчитаны по методике, описанной в работах [7–9]. Получено, что для пленки Ni(30)/Mo(30)/П величины $D_{Ni \rightarrow Mo} \approx 54,3 \cdot 10^{-19}$ м²/с, $D_{Mo \rightarrow Ni} \approx 14,5 \cdot 10^{-19}$ м²/с (при $T \approx 300$ К) и $D_{Ni \rightarrow Mo} \approx 1,34 \cdot 10^{-19}$ м²/с, $D_{Mo \rightarrow Ni} \approx 0,5 \cdot 10^{-19}$ м²/с (при $T \approx 500$ К). Авторами работы [7] получены аналогичные результаты для пленочной системы Cr(50)/Ni(55)/П: $D_{Cr \rightarrow Ni} \approx 15,8 \cdot 10^{-19}$ м²/с и $D_{Ni \rightarrow Cr} \approx 9,5 \cdot 10^{-19}$ м²/с (при $T \approx 300$ К); $D_{Cr \rightarrow Ni} \approx 3,8 \cdot 10^{-19}$ м²/с и $D_{Ni \rightarrow Cr} \approx 0,41 \cdot 10^{-19}$ м²/с (при $T \approx 500$ К). Относительно высокое значение эффективных коэффициентов диффузии указывает на зна-

чительную роль конденсационно-стимулированной диффузии при формировании пленочных образцов.

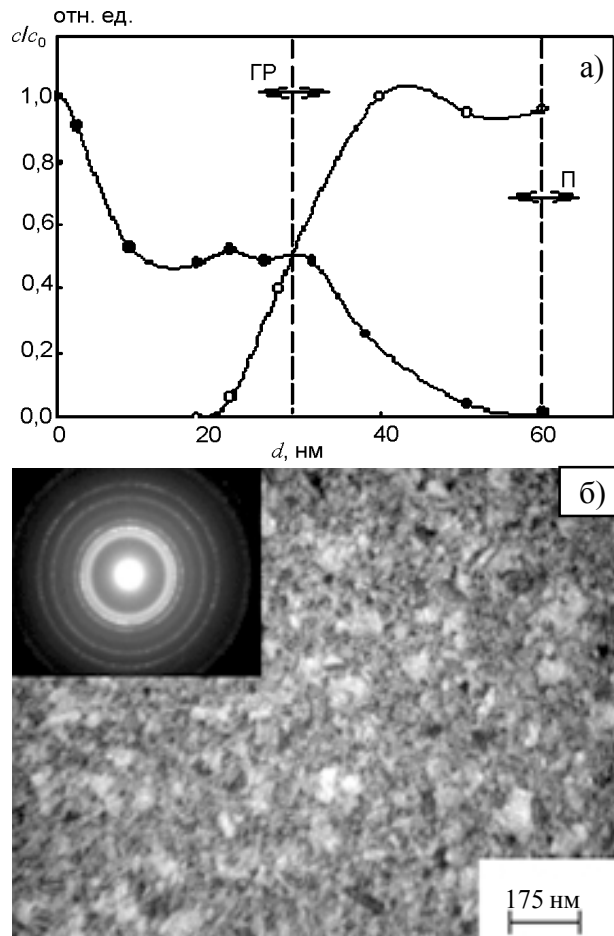


Рис. 1. Диффузионные профили (а) для неотожженной пленочной системы Ni(30)/Mo(30)/П (• – Ni, o – Mo) и микрокристаллическая структура (б) пленки Ni(30)/Mo(20)/П после отжига до температуры $T_{отж} = 700$ К.

Результаты исследований микроструктуры проведенных методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что в неотожженных пленках Mo и Cr средний размер зерен $L \approx 10$ нм, в то время как в пленках Ni – $L \approx d$. При отжиге до температуры $T = 700$ К в пленках Mo и Cr практически не изменялся (рис. 1б), в то время, как в пленках Ni – увеличивался в 1,5–2 раза. Согласно электронографическим исследованиям двухслойные пленки Ni/Mo и Ni/Cr как в неотожженном, так и отожженном состоянии имеют двухфазный состав ГЦК-Ni + ОЦК-Mo или ОЦК-Cr, т.е. с точки зрения электронографии сохраняется индивидуальность отдельных слоев, хотя размытие диффузионных профилей свидетельствует о возможности стаби-

лизации узкого промежуточного слоя в виде твердого раствора или интерметаллида. В случае пленочной системы Ni/Cr полученные результаты согласуются с данными работы [10], где также отмечается дисперсность кристаллической структуры и частичное сохранение индивидуальности пленочных слоев в температурном интервале до 700 К (отметим, что авторы [9] получили аналогичные результаты для пленочной системы Cu/Cr). Стабилизацию структурного состояния близкого к квазибиблистине можно объяснить как низкой взаимной растворимостью атомов, так и образованием барьеров вследствие взаимодействия поверхностных атомов пленок с остаточными газами.

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА

Типичные примеры деформационных зависимостей для двухслойных пленок Ni/Mo и Ni/Cr приведены на рис. 2. При первом цикле “нагрузка↔снятие нагрузки” наблюдается значительное увеличение сопротивления, обусловленное релаксационными процессами,

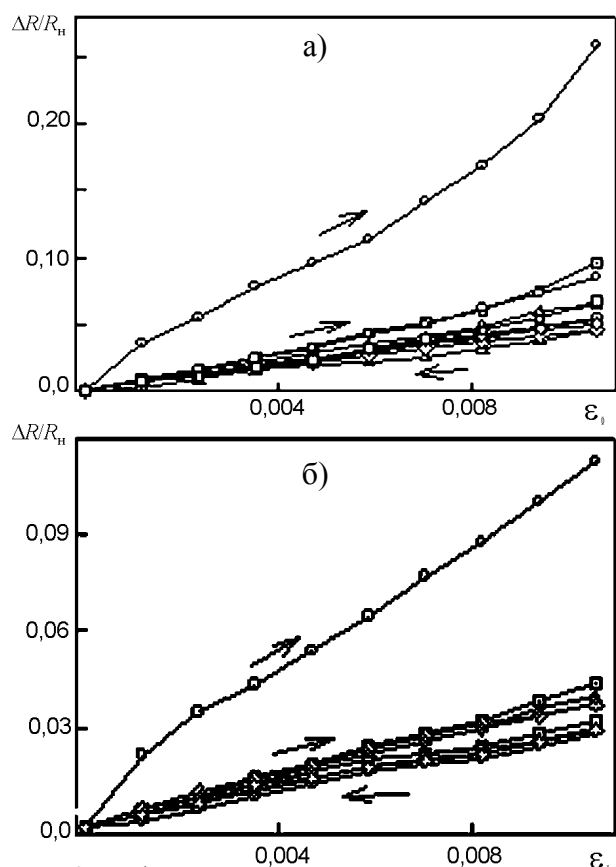


Рис. 2. Деформационные зависимости для двухслойных пленок Ni(50)/Mo(20)/П – а) и Ni(40)/Cr(20)/П – б).

ми, связанными с поворотом зерен, перегруппировкой дефектов и микропластической деформацией [1]. Среднее значения коэффициента γ_l определялось по V – VII деформационным циклам по всему интервалу деформации как тангенс угла наклона зависимостей $\Delta R/R_n$ от ϵ_l .

Как и предполагалось ранее, полученные значения КТ (табл. 1) превысили аналогичную величину значения для массивных тензодатчиков на основе сплавов Ni-Cr и Ni-Mo, в несколько раз. На основе полученных нами результатов можно сделать вывод о том, что фактором, определяющим величину КТ, является общая толщина образцов, т.е. проявляется классический размерный эффект в тензочувствительности. Хотя при переходе к многослойным системам (в нашем случае – трехслойные системы) дополнительное увеличение КТ также обуславливается повышением эффективности интерфейсного рассеяния электронов.

Работа выполнена в рамках государственной тематики № 68.01.05.09 – 11 при финансовой поддержке МОН Украины.

Таблица 1
Зависимость коэффициентов продольной тензочувствительности для пленочных систем на основе Ni и Mo или Ni и Cr от общей толщины образцов

Пленочная система, нм	Общая толщина, нм	γ_l
Ni(25)/Mo(15)/П	40	8,1
Ni(50)/Mo(20)/П	70	5,4
Mo(20)/Ni(15)/П	40	7,4
Mo(15)/Ni(25)/П	40	6,8
Ni(20)/Mo(20)/Ni(20)/П	60	9,1
Cr(20)/Ni(20)/П	40	4,3
Cr(20)/Ni(40)/П	60	3,8
Ni(20)/Cr(20)/П	40	3,9
Ni(40)/Cr(20)/П	60	3,6
Ni(40)/Cr(40)/П	80	3,5
Ni(150)/Cr(40)/П	190	2,9
Cr(40)/Ni(20)/П	60	2,9
Cr(40)/Ni(40)/П	80	2,8
Ni(20)/Cr(20)/Ni(20)/П	60	6,6

БЛАГОДАРНОСТІ

Автори виражають благодарність Проценко І.Е. за проявлений інтерес і обговорення результатів.

ЛИТЕРАТУРА

1. Великодний Д.В., Гричановська Т.М., Однорець Л.В., Проценко І.Ю., Проценко С.І. Тензочутливість металевих плівок: теоретичні моделі, експериментальні результати, застосування (огляд)//Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2007. – № 1. – С. 5-51.
2. Protsenko I., Odnodvoretz L., Chornous A. Electroconductivity and tensosensibility of multilayer films//Металлофиз. новейшие технол. – 1998. – Т 20, № 1. – С. 36-44.
3. Lasyuchenko O.B., Protsenko I.Yu., Chornous A.M. Contribution of the grain-boundary and surface scattering electrons in the size effect of tensosensibility//Functional Materials. – 1999. – Vol. 6, № 5. – P. 880-883.
4. Ayerdi I., Castano E., Garcia-Alonso A. Characterization of tantalum oxynitride thin films as high-temperature strain gauge//Sens. Actuat.A. – 1995. – Vol. 46-47. – P. 218-221.
5. Kazi I.H., Wild P.M., Moore T.N. The electromechanical behavior of nichrome (80/20 wt.%) film //Thin Sol. Films.– 2003.–Vol. 433. – P. 337-343.
6. Kazi I.H., Wild P.M., Moore T.N. Characterization of sputtered nichrome (80/20 wt.%) films for strain gauge applications//Thin Sol. Films. – 2006. – Vol. 515. – P. 2602-2606.
7. Пазуха І.М., Проценко С.І., Проценко І.Ю. Дифузійні процеси та інтерфейсне розсіювання електронів в багатошарових металевих плівках (огляд)//Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2006. – № 9(93). – С. 7-37.
8. Бурик І.П., Шпетний І.О., Однорець Л.В. Кристалічна структура, фазовий склад та дифузійні процеси в двошарових плівкових матеріалах на основі Ni і Мо//Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2008. – № 2. – С. 118-123.
9. Бібик В.В., Гричановська Т.М., Маршалек М., Проценко О.Б., Проценко С.І. Дифузійні процеси в нанокристалічних двошарових плівкових системах на основі металів//Металлофиз. новейшие технолог. – 2006. – Т. 28, № 6. – С. 707-715.
10. Проценко І.Ю., Токмань В.В., Черноус А.М., Шпетний І.О. Фазоутворення та структурні зміни в двошарових плівкових системах Ti/Co і Ni/(Ti, V, Co, Cr) у процесі ізохронного відпалу//Металлофиз. новейшие технол. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 319-331.

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ Ni І Мо АБО Cr

І.П. Бурик, С.І. Воробйов, Л.В. Однорець
Вивчений ефект тензочутливості, дифузійні процеси і фазовий склад двошарових плівок на основі Ni і Мо або Ni і Cr. На основі досліджень методом ВІМС проведений розрахунок ефективних коефіцієнтів взаємної дифузії атомів. Методом електронної мікроскопії вивчений фазовий склад двошарових плівок Ni/Мо і Ni/Cr і зроблений висновок про неповне збереження індивідуальності окремих шарів безпосередньо після конденсації зразків. Одержано, що величина коефіцієнта тензочутливості двошарових плівок лежить в межах від 3 до 8 одиниць, причому при збільшенні загальної товщини плівки монотонно зменшується.

TENSORESISTIVITY PROPERTIES OF FILM MATERIALS BASE ON Ni AND Mo OR Cr

I.P. Buryk, S.I. Vorob'jov, L.V. Odnodvoretz
The effect of strain deformation, diffusion processes and phase composition of double-layer films base on Ni and Mo or Ni and Cr is studied. On the basis of researches by SIMS method the calculation of effective coefficients mutual diffusion of atoms is produced. The method of electronic microscopy studies phase composition of the double-layer films Ni/Mo and Ni/Cr and conclusion about partially saving of individuality separate layers directly after condensation of standards is done. It is got, that the size of coefficient strain deformation of double-layer in limits from 3 to 8 units, thus at the increase of general thickness of film monotonous decrease.