

## ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В ОДНО- И ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ Cr, Cu И Sc

С.И.Проценко, А.Н.Чорноус

Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина

*Представлены экспериментальные результаты исследования тензочувствительности в однослойных пленках Cr, Cu и Sc и трехслойных на основе этих металлов. Проведено сравнение коэффициента продольной тензочувствительности однослойной пленки и трехслойной системы. Полученные отличия объясняются вкладом в тензоэффект рассеянием электронов на границе раздела слоев.*

### ВСТУПЛЕНИЕ

При экспериментальном исследовании напряженного состояния различных конструкций, при преобразовании деформации в электрический сигнал в различных измерительных устройствах очень широко применяются изготовленные из проволоки или фольги тензорезисторы [1,2]. Вместе с тем многие исследования говорят о большей эффективности пленочных тензодатчиков (см. литературу, цитируемую в [3]), хотя в случае металлических пленок величина коэффициента продольной тензоувствительности значительно меньше ( $\gamma_1 \sim 1$ ) по сравнению с полупроводниковыми, но последние имеют малую термическую устойчивость. В связи с этим постоянно ведется поиск возможностей увеличения  $\gamma_1$  для металлических пленок (использование пленочных сплавов, переход до многослойных пленочных структур и т.п.).

Целью настоящей работы является изучение вклада дополнительного рассеяния электронов на границах раздела отдельных слоев в величину коэффициента тензоувствительности. В качестве объектов исследования выступали одно- и трехслойные пленки на основе Cu, Cr и Sc. Выбор таких компонент многослойной пленочной структуры связан с тем обстоятельством, что эти металлы в массивном состоянии образуют системы (Cr-Cu) и (Cr-Sc) и (Cu-Sc) эвтектического типа без промежуточных фаз в первых двух случаях и с промежуточными фазами  $\text{Cu}_2\text{Sc}$ ,  $\text{Cu}_2\text{Sc}$  и  $\text{CuSc}$  с узкой областью гомогенности [4] в последнем. Кроме этого, объемная растворимость  $\text{Cr} \leftrightarrow \text{Cu}$ ,  $\text{Cr} \leftrightarrow \text{Sc}$  и  $\text{Cu} \leftrightarrow \text{Sc}$  составляет величину менее 1 ат. %.

### 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При измерении коэффициента тензоувствительности необходимо иметь в виду, что в процессе продольной статической деформации относительное изменение сопротивления пленок составляет величину до одного процента при деформации  $\epsilon_1 = 2\%$ . В связи с этим, важными вопросами в методике измерения тензоэффекта является под-

готовка пленочных контактов и измерение величины деформации.

Методика подготовки контактов, частично аналогична нашей, описана в работе [3] и состоит в следующем. На подложке из фторопласта Ф4 формируется токопроводящая дорожка на основе двухслойной пленки Cu/Cr, где пленка Cr ( $d \approx 20$  нм) обеспечивает адгезию к Ф4, а верхний слой Cu переменной толщины (толщина увеличивается ступенчато до 2 мкм в направлении электрического контакта) обеспечивает низкоомный контакт с пленочным образцом. Слой Cu является двухслойным и формируется таким образом. На подслое Cr конденсируется пленка Cu ( $d \approx 60$  нм), а затем электролитическим методом осаждается ступенчатое покрытие, обеспечивающее плавный переход исследуемая пленка/контакт. Исследуемая пленка размерами 5 мм×2 мм конденсируется непосредственно на подложку Ф4 между контактными площадками. Описанная методика формирования контактов достаточно эффективна при  $\epsilon_1 = 1\%$ . Для деформации образца до  $\epsilon_1 = 2\%$  применялся несколько другой вариант подготовки подложки. В этом случае вместо Ф4 использовалась фольга Ni, на которую конденсировался тонкий слой SiO (путем совместного испарения порошка  $\text{SiO}_2$  и Si в эквивалентных соотношениях при  $T \approx 1470$  К). На SiO формируется контакт на основе двухслойной системы Cu/Al. На верхний слой Cu, как и в предыдущем случае, электролитически осаждается ступенчатый контакт из Cu.

Для деформации пленочного образца непосредственно в вакуумной камере (вакуум  $\sim 10^{-4}$  Па) использовалось специально разработанное устройство, которое позволяет деформировать образец до  $\epsilon_1 = 2\%$  в интервале температур 300...700 К. Шаг деформации  $\Delta \epsilon_1 = 0,05\%$  обеспечивается точным микровинтом.

Фазовый состав пленочных образцов изучался дифракционным (прибор ЭММА 4), а толщина измерялась интерференционным (МИИ 4) методами.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИХ ОБРАБОТКА

### 2.1. ОДНОСЛОЙНЫЕ ПЛЕНКИ

Согласно описанной методике, были получены серии деформационных зависимостей  $\Delta R/R_n$  от  $\epsilon_1$  ( $R_n$  и  $\Delta R$  – начальное сопротивление и его изме-

нение при деформации соответственно) для пленок Cr, Cu и Sc различной толщины, по тангенсу угла наклона которых рассчитывается коэффициент продольной тензочувствительности. На рис. 1 для примера показаны зависимости  $\Delta R/R_n$  от  $\epsilon_1$  для пленок Sc (а) и Cr (б).

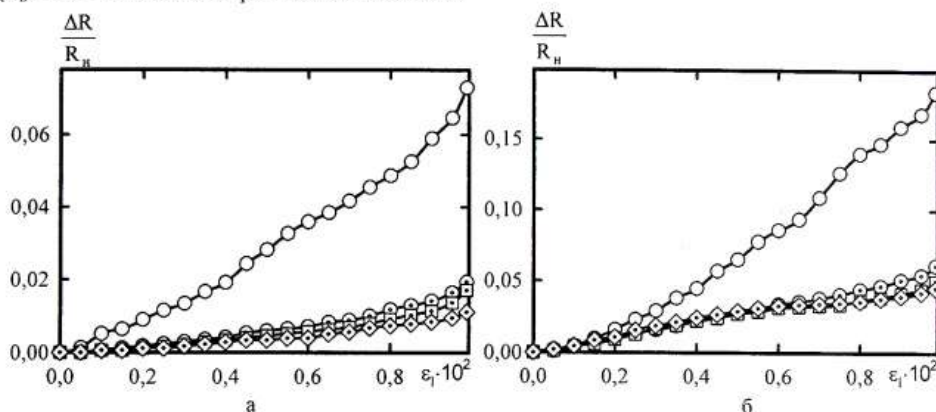


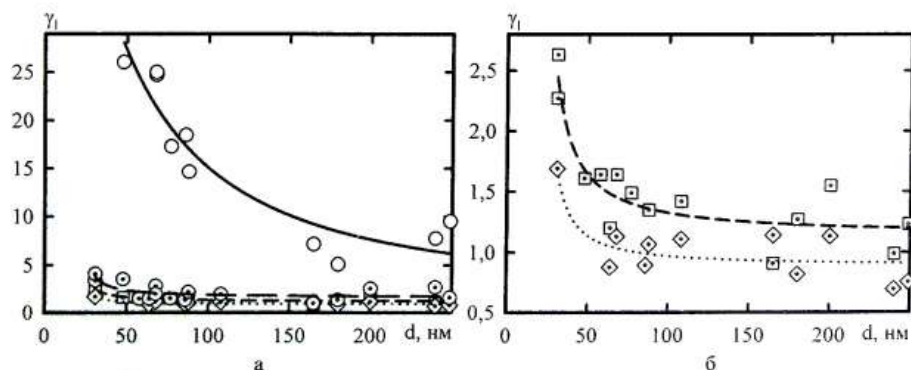
Рис. 1. Зависимость  $\Delta R/R_n$  от  $\epsilon_1$  для первых четырех деформационных циклов «нагрузка – снятие нагрузки» для пленок Sc (а) и Cr (б). Номер цикла: ○-I, ⊙-II, ▴-III и ◇-IV.  
Толщина пленок, нм: 64 (Sc) и 56 (Cr)

Особенностью этих зависимостей является то, что все релаксационные процессы в пленке (разворот зерен, образование дефектов, микропластическая деформация и т.п.) практически заканчиваются после первого деформационного цикла, и поэтому, начиная со второго цикла, величина  $\gamma_1$  почти не изменяется. В случае пленок Cu аналогичный эффект будет наблюдаться лишь после IV-V деформационных циклов. Таким образом, в пленках Sc и Cr после первого деформационного цикла основной вклад в тензоэффект будет давать эффект увеличения пара-

метра решетки и деформация границы зерен. Вместе с тем, необходимо подчеркнуть, что после каждого цикла имеет место увеличение начального сопротивления, что, безусловно, связано с деформационными процессами.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены на рис. 2 в виде размерных зависимостей  $\gamma_1$  от толщины  $d$  однослойной пленки.

Отметим, что аналогичные размерные зависимости имеются и в случае пленок меди.



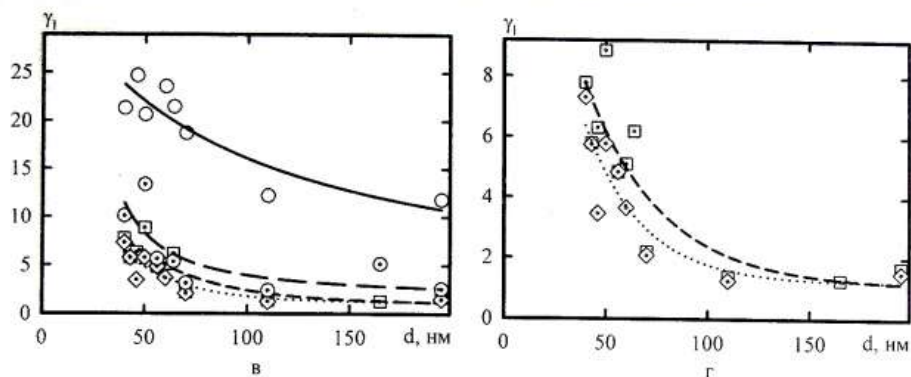


Рис. 2. Размерная зависимость коэффициента продольной тензочувствительности для пленок Sc (а, б) и Cr (в, г). Нумерация деформационных циклов такая же, как и на рис. 1

## 2.2. МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ Cu, Cr И Sc

Поскольку компоненты трехслойной пленочной системы имеют крайне ограниченную объемную растворимость, то последовательность чередования слоев может влиять на величину  $\gamma_1$  не в связи с фазообразованием, а лишь с точки зрения дополнительного рассеяния электронов на внешних и внутренних поверхностях пленочных слоев и различного уровня макронапряжений термического происхождения ( $S_T$ ) на границе раздела различных слоев. Хотя теоретические оценки влияния  $S_T$  на удельное сопротивление дает величину  $\frac{\Delta\rho}{\rho_n} \sim 1\%$ . Переход до трехслойной пленочной системы не изменяет характер деформационной зависимости (на рис. 3 представлен пример для системы Cr/Cu/Sc/П, где П - подложка).

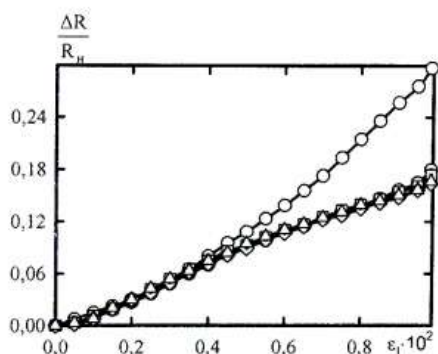


Рис. 3. Деформационная зависимость для трехслойной пленки Cr(70)/Cu(44,5)/Sc(55)/П. В скобках указана толщина в нанометрах. Номер цикла: O-I, ⊙-II, ▀-III, ◆-IV и Δ-V

Результаты измерения коэффициентов  $\gamma_1$  для трехслойных пленок для первых пяти деформационных циклов даны в табл. 1 и 2.

В табл. 1 приведены данные сравнения величины коэффициента тензочувствительности каждого из слоев (обозначено  $\gamma_1^{Me}$ ) и всей трехслойной системы. В табл. 2 – данные о  $\gamma_1$  для одно- и трехслойных пленок примерно одинаковой толщины.

Общей особенностью этих результатов является то, что однослойные пленки и в качестве компонента трехслойной системы, и при толщине равной толщине трехслойной пленки, имеют меньший коэффициент тензочувствительности. Поскольку согласно электронографическим исследованиям в трехслойных системах не происходит фазообразование и при этом согласно [6] индивидуальность слоев сохраняется, то, надо полагать, большее значение  $\gamma_1$  по сравнению с  $\gamma_1^{Me}$  должно быть связано с процессами рассеяния электронов на границе раздела слоев в процессе деформации. С такой точки зрения необходимо критически рассмотреть теоретическую оценку [3,6] вклада в  $\gamma_1$  деформационного эффекта коэффициента прохождения ( $\tau$ ) границы зерна  $\frac{1}{\tau} \frac{\Delta\tau}{\Delta\epsilon_1} \frac{\tau}{k} \frac{\Delta k}{\Delta\tau}$  ( $k = \frac{d}{\lambda_0}$  - приведенная толщина,  $\lambda_0$  - СДВП электрона в массивном образце), который оценивается вместе с величинами  $\frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta\epsilon_1} \frac{\rho}{k} \frac{\Delta k}{\Delta\rho}$  и  $\frac{1}{Q} \frac{\Delta Q}{\Delta\epsilon_1} \frac{Q}{k} \frac{\Delta k}{\Delta Q}$  ( $\rho$  – эффективный коэффициент зеркальности и  $Q$  – коэффициент прохождения границы раздела двух слоев) на уровне нескольких процентов. Отметим, что, если два первых вклада рассчитываются на основе экспериментальных данных, то деформационный эффект, связанный с величиной  $Q$ , предполагается таким же, как эффект, связанный с коэффициентом  $\tau$ . Полученные данные (см. табл. 1 и 2) не

подтверждают такую оценку, но и не позволяют сделать количественное сравнение величин

$$\frac{1}{r} \frac{\Delta r}{\Delta \epsilon_1} \frac{r}{k} \frac{\Delta k}{\Delta r} \text{ и } \frac{1}{Q} \frac{\Delta Q}{\Delta \epsilon_1} \frac{Q}{k} \frac{\Delta k}{\Delta Q}$$

Таблица 1

Сравнение  $\gamma_1$  для одно- и трехслойных пленочных систем

Пленочная система, нм	d, нм	Коэффициент тензочувствительности $\gamma_1$					$\gamma_1^{Me}/\gamma_1$		
		I	II	III	IV	V	$\gamma_1^{Cr}/\gamma_1$	$\gamma_1^{Sc}/\gamma_1$	$\gamma_1^{Cu}/\gamma_1$
Cu(140)/Sc(124)/Cr(66)/П	330	4,7	6,2	7,1	7,5	7,9	0,43	0,10	0,23
Cu(119)/Sc(72)/Cr(73)/П	252	5,8	7	7,1	7,8	7,7	0,36	0,11	0,28
Cu(34)/Cr(70)/Sc(54)/П	158	9,5	7,1	7,8	8,2	9,9	0,35	0,11	-
Cu(143)/Cr(66)/Sc(203)/П	412	5,5	7,2	7,0	8,2	8,2	0,39	0,09	0,26
Cr(70)/Cu(44)/Sc(55)/П	169	26	18	18	17	17	0,17	0,05	0,36
Cr(42)/Cu(20)/Sc(145)/П	207	14	10	10	10	11	0,61	0,08	-
Cr(57)/Cu(121)/Sc(248)/П	402	11	7,3	7,3	7,4	7,5	0,56	0,10	0,29
Cr(47)/Cu(141)/Cr(52)/П	214	3,3	3,0	2,9	2,9	3,1	3,00	-	0,76
Cr(71)/Sc(25)/Cu(145)/П	241	14	16	19	20	19	0,16	0,06	0,12
Cr(88)/Sc(101)/Cu(145)/П	334	14	16	18	18	20	0,12	0,04	0,12
Cu(24)/Cr(74)/Cu(136)/П	234	20	22	25	24	25	0,09	-	-
Cu(26)/Cr(72)/Cu(48)/П	156	14	11	11	10	10	0,24	-	-
Cu(143)/Cr(80)/Cu(76)/П	299	6,0	6,0	6,0	8,0	7,0	0,33	-	0,30

Таблица 2

Сравнение  $\gamma_1$  для одно- и трехслойных пленочных систем одинаковой толщины

Пленочная система, нм	$d^{Me}$ , d, нм	$\gamma_1^{Me}/\gamma_1$		
		$\gamma_1^{Cr}/\gamma_{1lexc}$	$\gamma_1^{Sc}/\gamma_{1lexc}$	$\gamma_1^{Cu}/\gamma_{1lexc}$
Cu(140)/Sc(124)/Cr(66)/П	330	0,15	0,10	0,26
Cu(119)/Sc(72)/Cr(73)/П	252	0,16	0,10	0,27
Cu(34)/Cr(70)/Sc(54)/П	158	0,16	0,09	0,21
Cu(143)/Cr(66)/Sc(203)/П	412	0,13	0,09	0,22
Cr(70)/Cu(44)/Sc(55)/П	169	0,07	0,05	0,12
Cr(42)/Cu(20)/Sc(145)/П	207	0,12	0,08	0,20
Cr(57)/Cu(121)/Sc(248)/П	402	0,15	0,10	0,24
Cr(47)/Cu(141)/Cr(52)/П	214	0,41	0,25	0,66
Cr(71)/Sc(25)/Cu(145)/П	241	0,07	0,04	0,12
Cr(88)/Sc(101)/Cu(145)/П	334	0,06	0,04	0,10
Cu(24)/Cr(74)/Cu(136)/П	234	0,05	0,03	0,08
Cu(26)/Cr(72)/Cu(48)/П	156	0,13	0,08	0,22
Cu(143)/Cr(80)/Cu(76)/П	299	0,16	0,11	0,29

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе данные позволяют говорить о таких особенностях тензоэффекта в металлических пленочных системах на основе Cr, Cu и Sc:

- все релаксационные процессы в одно- и трехслойных пленках практически заканчиваются в течение первого деформационного цикла;
- при каждом последующем деформационном цикле в пленках накапливается остаточная деформация, что и обуславливает монотонное возрастание начального сопротивления;
- величина коэффициента продольной тензочувствительности трехслойной пленочной системы имеет большую в несколько раз величину по сравнению с однослойными пленками, как компо-

нентами трехслойной системы, или имеющими такую же толщину, как и трехслойная пленка, что можно объяснить процессами рассеяния электронов на границе раздела слоев при статической деформации;

- деформационные эффекты в коэффициенте прохождения границы раздела слоев, по-видимому, играют значительно большую роль по сравнению с аналогичными эффектами на границе зерен; совершенно не выясненной остается роль промежуточных слоев на границе раздела в виде твердых растворов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Клокова Н.П., Лукашник В.Ф., Воробьева Л.М., Волчек А.В. Тензодачики для экспери-

- ментальных исследований. М.: «Машиностроение», 1972.- 151 с.
2. Клокова Н.П. Тензорезисторы. М.: «Машиностроение», 1990.- 222 с.
  3. Ласюченко О.Б., Проценко І.Ю., Хворост В.А., Черноус А.М. Вплив статичної деформації на фізичні процеси у металевих плівках / Тонкие пленки в электронике. ISTFE-12. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2001.- С. 122-125.
  4. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Том 2/ Под ред. Н.П. Лекишева. М. «Машиностроение», 1997.- 1023 с.
  5. Ласюченко О.Б. Ефект тензочутливості у плівкових системах на основі Cu, Cr і Sc: Автореферат дисертації к.ф.-м.н. 01.04.07 / Сумський державний університет.- Суми, 2001.- 19 с.
  6. Ласюченко Е.Б., Одноворец Л.В., Проценко И.Е. К вопросу о микроскопической теории

эфекта тензочувствительности в многослойных пленочных структурах // ВАХТ. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники, 1998, вып. 6-7, с. 198-199.

**SINGULARITIES OF SIZE EFFECT OF THE TENSOSENSIBILITY IN ONE- AND THREE-LAYERED**

**Cr, Cu AND Sc – BASED FILMS**

**S.I. Procenko, A.M. Chornous  
Sumy State University, Sumy, Ukraine**

*Experimental results of investigation of the tensosensibility of the one- and three-layered Cr-, Cu- and Sc-based films are presented. The difference between coefficients of tensosensibility one- and three-layered films has explain with scattering of conductivity electrons on external and internal surfaces of separate layers and boundaries of crystalline.*