

01;05

## Особенности тензорезистивного эффекта в тонких металлических пленках в области упругой и пластической деформации

© И.П. Бурык, Д.В. Великодний, Л.В. Одиногорец, И.Е. Проценко, Е.П. Ткач

Сумский государственный университет,  
40007 Сумы, Украина  
e-mail: protsenko@aph.sumdu.edu.ua

(Поступило в Редакцию 22 апреля 2010 г.)

Изучены особенности тензорезистивного эффекта в одно- и двуслойных пленках Cr, Fe, Mo, Ni, Pd и Fe/Cr, Cu/Cr, Ni/Cr, Pd/Fe в области упругой и пластической деформации. Проанализирован вопрос о вкладе поверхностного и зернограничного рассеивания электронов в чувствительность к деформации однослойных пленок  $S^p$ . Проведено сравнение величины  $S^p$  одно- и двуслойных пленок при упругой и пластической деформации. Сделан вывод, что в случае пленочной системы Fe/Cr основной вклад в величину  $S^p$  вносит объемное и зернограничное рассеивание электронов. При этом зернограничное рассеивание одинаково эффективно как при упругой, так и при пластической деформации, о чем говорит большое значение коэффициента рассеивания электронов на границах зерен ( $R \cong 0.36-0.41$ ).

### Введение

Уникальные физико-механические свойства нанокристаллических массивных и пленочных образцов постоянно находятся в поле зрения исследователей. При этом большое внимание уделяется исследованию механических свойств и механизма пластической деформации этих материалов [1–11]. В частности, в работах [1–5] было показано, что начальная стадия пластической деформации массивных нанокристаллических материалов обусловлена процессом микропроскальзывания по границам зерен и не может быть описана в рамках классического дислокационного механизма [2,3]. В работах [4,5] проведены исследования механизма деформации растяжением массивных образцов Cu (размер нанозерен 40–60 nm) и сплава  $Fe_{73.5}CuNb_3Si_{13.5}B_9$  (10 nm) непосредственно в колонне электронного микроскопа. Был сделан вывод, что в этом случае деформация реализуется, главным образом, за счет разворота нанозерен (ротационные моды деформации) и взаимодействия дефектов в границах и приграничных зонах. Авторами работ [6,7] проведены исследования механических свойств и механизма деформации методом „*in situ*“ на примере тонких пленок алюминия микронной толщины. Было установлено, как и в работах [1–3], что механические характеристики свободных пленок и массивных образцов значительно различаются, что объясняется локальным уменьшением толщины зерен при возникновении внутренних напряжений в результате локализации дислокаций в их объеме.

Авторами работ [9,10] были получены диаграммы деформации крупнозернистых (размер зерен больше 1.5  $\mu\text{m}$ ) и мелкозернистых (менее 0.5  $\mu\text{m}$ ) пленок Au в интервале толщин 0.2–2  $\mu\text{m}$ . Установлено, что в первом случае механические свойства незначительно отличаются от массивных образцов, за исключением низкой пластичности пленок. При переходе к мелко-

зернистым образцам наблюдалась сильная зависимость механических свойств от скорости деформации.

Систематические исследования размерного эффекта в пластичности субмикронных (толщина от 0.2 до 1  $\mu\text{m}$ ) пленок Cu, Al и Au представлены в работе [11]. Полученные диаграммы деформации позволили авторам определить модуль Юнга и установить новые особенности механических свойств. Так, например, в пленках Cu при уменьшении толщины от 1 до 0.2  $\mu\text{m}$  границы текучести увеличиваются от 160 до 345 МПа, а в пленках Al толщиной 0.2  $\mu\text{m}$  не наблюдается пластичность, и они хрупко разрушаются при напряжении 375 МПа. Переход от упругой к пластической деформации наблюдается при продольной деформации  $\varepsilon_{tr} \cong 0.25\%$  (пленки Al); 0.1–0.2% (Cu) и 0.05–0.15% (Au), что соответствует аналогичной величине, полученной авторами [12] на примере пленок Pd толщиной 3 и 4  $\mu\text{m}$  ( $\varepsilon_{tr} \cong 0.25\%$ ) и многослойной пленочной гетероструктуры на основе Mo и Cu с толщиной отдельных слоев 15 nm ( $\varepsilon_{tr} \cong 0.235\%$ ). Анализ процитированных работ указывает на то, что основное внимание авторов уделено исследованию взаимосвязи между механическими свойствами и структурным состоянием образца. При этом, как и отмечалось нами в работах [13,14], практически отсутствуют исследования тензорезистивного эффекта в металлических пленках в области относительно больших деформаций (до 2%), которая включает в себя упругую, квазиупругую и пластическую деформацию.

Из самых общих соображений исходя из соотношения для усредненного в измеряемом интервале деформаций коэффициента продольной тензочувствительности:

$$\gamma_l = \gamma_l^p + 1 + 2\mu, \quad (1)$$

где  $\gamma_l^p = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon_l}$ ,  $\rho$  — удельное сопротивление (индекс „ $\rho$ “ означает, что  $\gamma_l$  выражается через удельное сопротивление),  $\mu$  — коэффициент Пуассона (при пластической деформации равен 0.5), автор [15] в предположении,

что при зернограничном проскальзывании зерен их объемное сопротивление не изменяется (т.е.  $\gamma_l^0 \cong 0$ ), делает вывод, что при пластической деформации  $\gamma_l \cong 2$ . Этот результат в какой-то мере применим к массивным крупнокристаллическим образцам. Например, согласно нашим данным [16], полученным на проволоках Cu, Ni и Mo (диаметр  $D$  от 0.06 до 0.44 mm; длина от 7 до 50 cm), величина  $\gamma_l^0 \cong 0.2-0.3$  при  $\mu \cong 0.4-0.5$  (Cu); 0.25–0.50 при  $\mu \cong 0.35-0.40$  (Ni) или  $-0.75$  при  $\mu \cong 0.37-0.40$  (Mo) соответственно. Отметим, что растяжение образцов продолжалось до разрыва проволок, что позволило определить деформацию разрушения исследуемых образцов:  $\varepsilon_{\max}^{\text{Cu}} \cong 0.8$  или 1.6% ( $D = 0.06$  и 0.12 mm);  $\varepsilon_{\max}^{\text{Ni}} \cong 0.5\%$  ( $D = 0.44$  mm) и  $\varepsilon_{\max}^{\text{Mo}} \cong 1.06\%$  ( $D = 0.21$  mm).

В пленочных материалах значительный вклад в величину коэффициента тензочувствительности дает зернограничное рассеивание электронов (см., например, [14,17]), что обуславливает величину коэффициента  $\gamma_l$  до нескольких десятков единиц [13,18]. Очевидно, что этот механизм рассеивания, приводящий к уменьшению средней длины свободного пробега ( $\lambda_0$ ) и соответствующее ее увеличение за счет увеличения размеров кристаллитов, обуславливают как два конкурирующих механизма результирующее значение  $\gamma_l^0 < 0$  (проволоки Cu и Mo) и  $\gamma_l^0 > 0$  (проволоки Ni).

В связи с этим цель настоящей работы заключалась в изучении особенностей тензоэффекта в однослойных (Cr, Fe, Mo, Ni и Pd) и двухслойных (Fe/Cr, Cu/Cr, Ni/Cr и Pd/Fe) пленках в области упругой и пластической деформации.

## Методика и техника эксперимента

Одно- и двухслойные пленки (толщина отдельных слоев от 10 до 80 nm) были получены методом термического испарения с использованием специально разработанной автоматизированной системы вакуумной конденсации в камере установки ВУП-5М (давление остаточных газов  $\sim 10^{-4}$  Pa) на подложку из полистирола с заранее подготовленными контактными площадками [13,17]. Преимущество этой подложки по сравнению с подложками из стеклотекстолита, фторопласта или никелевой фольги, покрытой диэлектриком, которые использовались нами ранее, состоит в том, что она обладает упругими свойствами в диапазоне деформации до 2%. Необходимо особенно подчеркнуть, что высокая адгезия металлических пленок к полистиролу приводит к тому, что измерение тензорезистивных свойств осуществлялось нами на системе пленка/подложка. При этом так как граница упругости металлических пленок  $\varepsilon_l$  менее 2%, то все измерения были проведены в условиях упруго или пластически деформированной пленки и упруго деформированной подложки. При определении

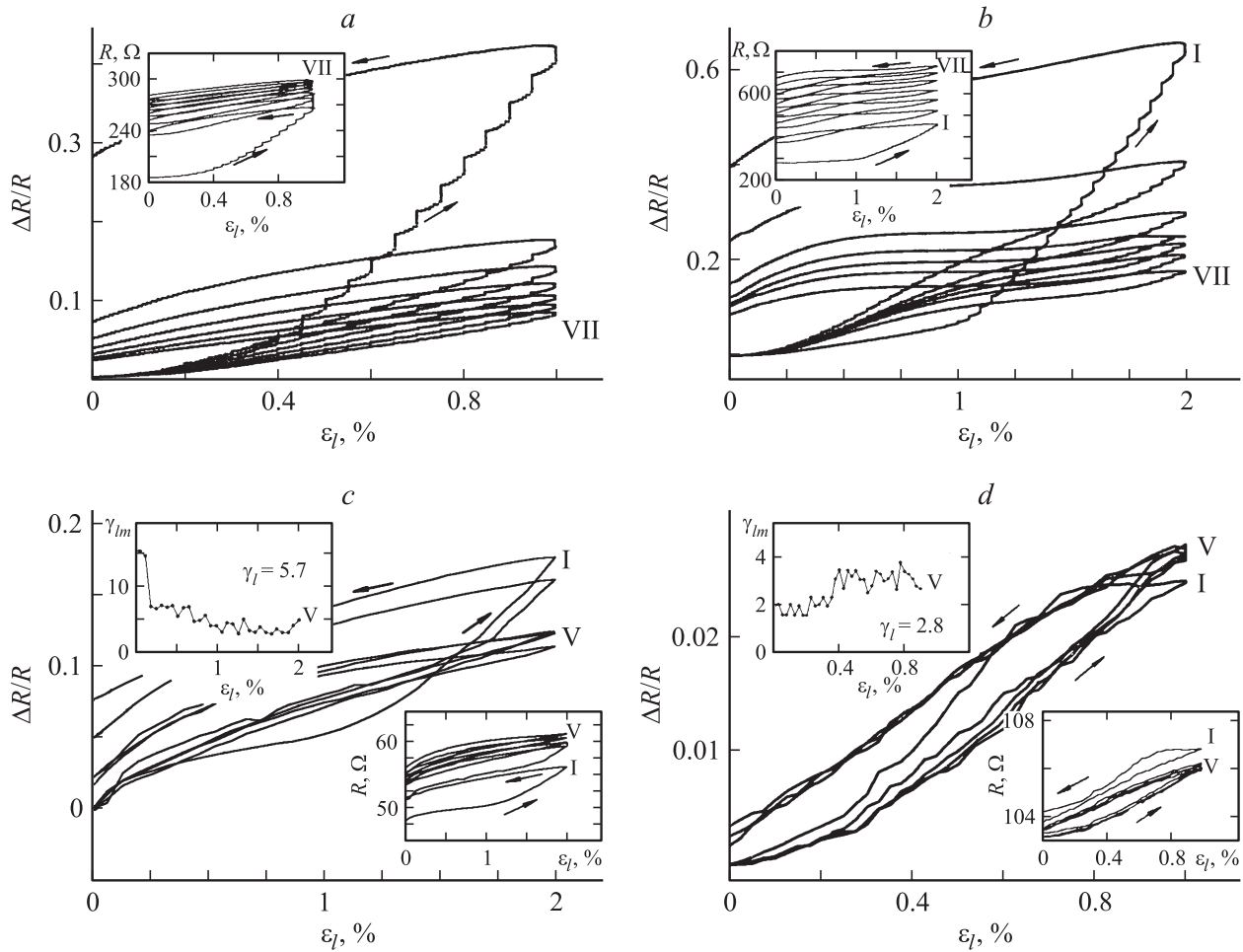
величины  $\varepsilon_{lrr}$  косвенным путем по зависимости сопротивления  $R$  от  $\varepsilon_l$  авторы ориентировались на результаты работ [9–12].

Исследование тензорезистивных свойств проводилось с помощью разработанной автоматизированной системы [13,17], что дало возможность осуществить большое количество деформационных циклов „растяжение–сжатие“ в статическом и динамическом режимах работы при скорости деформации от 0 до 0.1%/s. Аппаратную основу этой системы составляют частотомер, 8-канальный 16-битный сигма-дельта АЦП ADAM-4018, при помощи которого по четырехточечной схеме проводится измерение сопротивления образца; релейный модуль ADAM-4068 — источник управляющего напряжения электродвигателя; преобразователь интерфейсов USB → RS232/422/485 ADAM-4561; асинхронный конденсаторный электродвигатель и веб-камера Creative Labs. Управление экспериментом и обработка результатов осуществлялись на основе программного обеспечения, разработанного в среде LabVIEW 8.50 с использованием модуля машинного зрения LabVIEW Vision Development Module 8.2.

Исследования кристаллической структуры и фазового состава проводились методом просвечивающей электронной микроскопии и электронографии, согласно которым пленки Cr, Fe и Mo имеют ОЦК, а Cu, Ni и Pd — ГЦК-решетки с параметрами, близкими к величинам в массивных образцах. Фазовый состав двухслойных пленок Fe/Cr и Pd/Fe соответствует ОЦК или ГЦК твердому раствору ( $\alpha$ -Fe, Cr) и (Pd, Fe) или Cr/Ni–ОЦК Cr + ГЦК Ni (бипластина) и Cr/Cu–ОЦК Cr + ГЦК Cu (бипластина). Структурное состояние пленочных образцов вплоть до его разрушения контролировалось оптическим методом с помощью свето- и фотодиода, которые размещались над подложкой и под ней соответственно.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены примеры деформационных зависимостей для одно- и двухслойных пленок для двух интервалов деформаций  $\Delta\varepsilon_{l1} = 0-1\%$  и  $\Delta\varepsilon_{l2} = 1-2\%$ . Характерными их особенностями является то, что после перехода от упругой к пластической деформации при первом деформационном цикле (например, при  $\varepsilon_{lrr} \cong 0.2\%$  на рис. 1, *a*) при последующих деформационных циклах образец находится в пластическом состоянии и изменение  $\frac{\Delta R}{R}$  (например, при  $\varepsilon_l \cong 1.0\%$  на рис. 1, *b, c*) обусловлено, на наш взгляд, различными механизмами пластической деформации [3–7,11], а именно движением дислокаций к границам зерен, разворотом и утонением зерен и зернограничным проскальзыванием. Отметим, что на рис. 1, *a, b* представлены деформационные зависимости для одного и того же образца, который сначала был деформирован на протяжении семи циклов



**Рис. 1.** Зависимости относительного изменения сопротивления ( $\Delta R/R$ ), сопротивления ( $R$ ) и мгновенного значения коэффициента тензочувствительности ( $\gamma_{lm}$ ) от величины продольной деформации для пленок Cr(30 nm) (a, b), Ni(40) (c) и Pd(30) (d). На вставках приведено среднее значение коэффициента  $\gamma_{lm}$ . Римскими цифрами обозначены номера деформационных циклов „растяжение–сжатие“.

в интервале  $\Delta \epsilon_{l1} = 0-1\%$ , а затем —  $\Delta \epsilon_{l2} = 1-2\%$ . В случае двуслойных пленок (рис. 2) результаты в большой степени носят аналогичный характер.

На основе полученных деформационных зависимостей были рассчитаны усредненные по деформационному интервалу значения коэффициента тензочувствительности  $\gamma_l$ , типичные размерные зависимости которого для однослойных пленок Mo, Cr, Ni, Fe и Pd представлены на рис. 3. Результаты такого рода дают возможность найти путем экстраполяции на бесконечную толщину  $\gamma_{gl}^\rho$  (отметим, что  $\rho_g$  определяется аналогичным методом).

Так как удельное сопротивление однослойной пленки обусловлено объемным рассеиванием электронов на фонах и дефектах ( $\rho_0$ ), на внешних поверхностях пленки ( $\rho_d$ ) и на межзеренных границах ( $\rho_{gb}$ ), то, считая вклад этих механизмов аддитивным, можно записать

$$\rho = \rho_0 + \rho_{gb} + \rho_d = \rho_g + \rho_d, \quad (2)$$

где  $\rho_0 + \rho_{gb} = \rho_g + \lim_{d \rightarrow \infty} \rho_d$ .

В соответствии с уравнением (2)  $\gamma_l^\rho = \frac{S^\rho}{\rho}$ , где  $S^\rho = \frac{d\rho}{d\epsilon_l}$  — чувствительность пленки к деформации, которую можно представить таким образом:

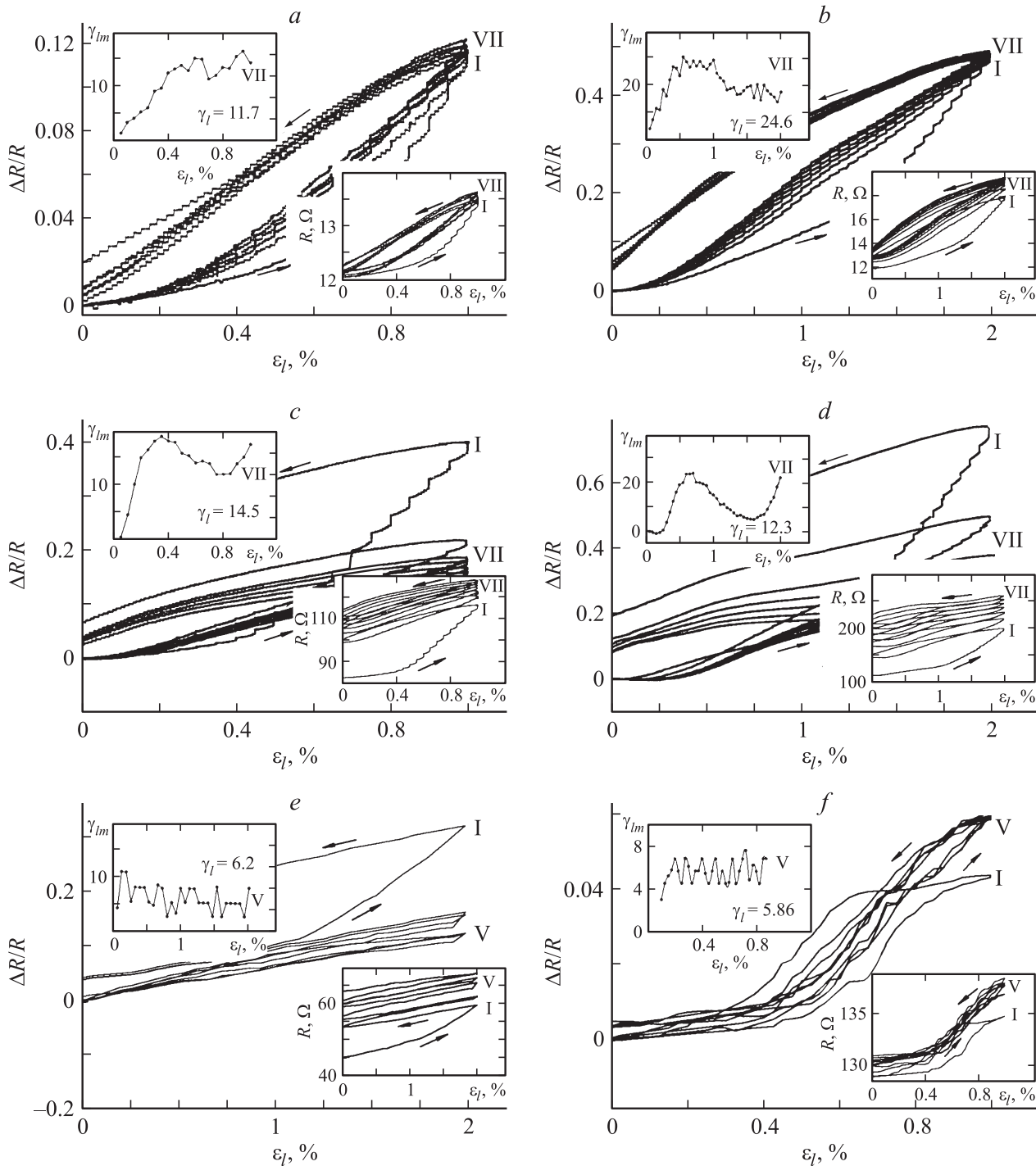
$$S^\rho \cong S_{0l}^\rho + S_{gb}^\rho + S_d^\rho = S_g^\rho + S_d^\rho.$$

Соотношения для  $S_{dl}^\rho$  и  $S_{gbl}^\rho$  будут иметь следующий вид:

$$S_{dl}^\rho = \frac{\partial \rho_d}{\partial \epsilon_l} = \gamma_{0l}^\rho \rho - \gamma_{gl}^\rho \rho_g \quad \text{и} \quad S_{gbl}^\rho = \frac{\partial \rho_{gb}}{\partial \epsilon_l} = \gamma_{gl}^\rho \rho_g - \gamma_{0l}^\rho \rho_0, \quad (3)$$

где  $\gamma_{gl}^\rho = \lim_{d \rightarrow \infty} \gamma_l^\rho$ , а в качестве  $\rho_0$  и  $\gamma_{0l}^\rho$  можно взять удельное сопротивление и коэффициент тензочувствительности для массивных поликристаллов.

Отметим, что величины  $\rho_g$  и  $\gamma_{gl}^\rho$  определяются путем экстраполяции на нуль и зависимости  $\rho$  или  $\gamma_l^\rho$  от обратной толщины. В табл. 1 представлены результаты расчета размерной зависимости рассматриваемых тензорезистивных величин для однослойных пленок, деформированных в области упругой деформации. Из этих



**Рис. 2.** Зависимости  $\Delta R/R$ ,  $R$  и  $\gamma_{lm}$  от величины продольной деформации для пленочных систем Cu(20)/Cr(30)/Sub (a, b), Fe(20)/Cr(30)/Sub (c, d), Cr(40)/Ni(40)/Su (e) и Pd(30)/Fe(15)/Sub (f).

данных следует, что вклад в величину  $\gamma_{gl}^o$  и  $S^o$  поверхностного рассеяния электронов является определяющим лишь при относительно малых толщинах, что находится в рамках представлений о размерных эффектах.

При переходе к пластической деформации (интервал  $\Delta \epsilon_l = 1-2\%$ ) наблюдается увеличение чувствительности к деформации  $S_{pl}^o$  по сравнению с  $S_{el}^o$  при упругой дефор-

мации. Данные табл. 2 иллюстрируют эту особенность на примере одно- и двуслойных пленок Cr, Fe, Ni, Pd, Fe/Cr/Sub, Cu/Cr/Sub, Cr/Ni/Sub и Pd/Fe/Sub. Отметим, что величины  $S_{el}^o$  и  $S_{pl}^o$  были рассчитаны в точках, симметричных относительно точки перехода от упругой и пластической деформации. Как следует из этих расчетов, чувствительность к деформации при пластической

**Таблица 1.** Влияние зернограничного и поверхностного рассеиваний электронов на величины  $\gamma_i^o$  и  $S_i^o$  пленок Mo, Ni, Fe и Cr

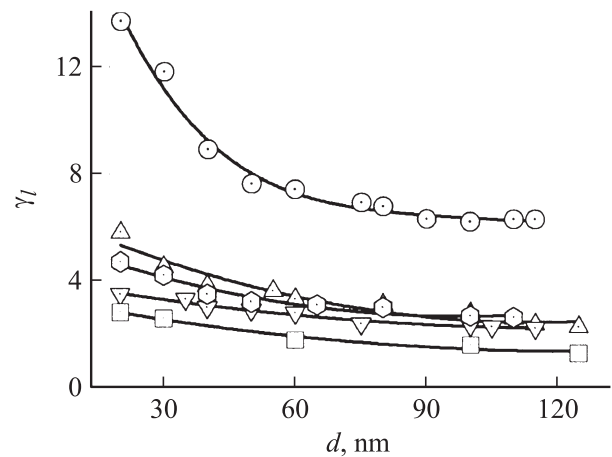
Пленка	$d, \text{nm}$	$\frac{\rho_a}{\rho}$	$\frac{\rho_{gb}}{\rho}$	$\frac{\rho_d}{\rho}$	$\gamma_{dl}^o$	$\gamma_{gbl}^o$	$S_{dl}^o \cdot 10^7, \Omega\text{m}\%$	$S_{gbl}^o, \Omega\text{m}\%$
Mo	20	0.08	0.55	0.37	21.02	4.66	62.0	116.3
	60	0.11	0.78	0.11	9.38		9.6	
	75	0.11	0.80	0.09	7.42		6.6	
	100	0.11	0.81	0.08	4.39		3.7	
Ni	20	0.16	0.18	0.66	6.07	4.59	16.8	4.5
	50	0.29	0.32	0.39	4.21		4.0	
	80	0.36	0.40	0.25	4.42		2.1	
	115	0.42	0.47	0.11	2.98		0.5	
Fe	20	0.15	0.17	0.69	4.19	1.19	9.9	13.1
	60	0.28	0.32	0.39	2.63		1.8	
	90	0.35	0.39	0.26	3.14		1.2	
	110	0.44	0.50	0.06	5.07		0.3	
Cr	20	0.06	0.40	0.60	2.92	0.10	5.2	0.7
	50	0.09	0.56	0.43	2.60		2.4	
	80	0.10	0.66	0.34	1.92		1.1	
	110	0.11	0.68	0.32	1.86		91.2	

**Таблица 2.** Чувствительность пленок деформации в области упругой и пластической деформации

Пленка (толщина, nm)	$\epsilon_{ltr}, \%$	$S_{el}^o \cdot 10^7, \Omega\text{m}\%$	$S_{pl}^o \cdot 10^7, \Omega\text{m}\%$	$\frac{S_{pl}^o}{S_{el}^o}$
Cr(30)	0.20	16.3	28.7	1.8
Cr(50)	0.15	11.5	24.5	2.1
Cr(75)	0.10	8.8	18.8	2.3
Fe(35)	0.10	1.7	31.6	18.8
Fe(60)	0.30	2.5	6.9	2.8
Fe(100)	0.40	3.9	7.0	1.4
Ni(20)	0.20	6.3	7.3	1.2
Ni(40)	0.15	2.4	7.2	3.0
Pd(18)	0.52	10.2	16.4	1.6
Pd(30)	0.30	4.1	5.0	1.2
Pd(100)	0.25	3.7	3.9	1.1
Fe(20)/Cr(30)	0.40	14.6	17.5	2.6
Fe(40)/Cr(30)	0.30	7.9	22.5	2.8
Fe(50)/Cr(30)	0.25	5.2	16.2	3.1
Cu(20)/Cr(20)	0.40	14.6	17.5	2.6
Cu(20)/Cr(30)	0.30	7.9	22.5	2.8
Cu(20)/Cr(35)	0.25	5.2	16.2	3.1
Cu(20)/Ni(20)	0.40	14.6	17.5	2.6
Cu(20)/Ni(40)	0.30	7.9	22.5	2.8
Pd(30)/Fe(15)	0.57	3.0	6.2	2.1
Pd(10)/Fe(20)	0.48	2.8	5.0	1.8

деформации в несколько раз больше по сравнению с чувствительностью при упругой деформации. Для всех трех тензорезистивных величин наблюдается размерный эффект, хотя размерная зависимость  $\epsilon_{ltr}$  для однослойных пленок Fe противоположного характера не нашла нашего объяснения.

Нами также проанализирован вопрос о роли различных механизмов рассеивания электронов (объемного, поверхностного или зернограничного) в тензорезистивных свойствах в рамках линеаризованной модели Телье,



**Рис. 3.** Размерные зависимости коэффициентов продольной тензочувствительности:  $\diamond$  — Mo,  $\nabla$  — Cr,  $\triangle$  — Ni,  $\circ$  — Fe и  $\square$  — Pd.

**Таблица 3.** Чувствительность к деформации пленок Fe/Cr в области упругой и пластической деформации

Пленка	Упругая деформация $\Delta\epsilon_l = 0 - (\epsilon_{lir} - 0.1)$ , %					Пластическая деформация $\Delta\epsilon_l = 0 - (\epsilon_{lir} + 0.1)$ , %				
	$\gamma_l$	$\lambda_0$ , nm	$\lambda_g$ , nm	$\Delta\lambda_g$ , nm	$R$	$\gamma_l$	$\lambda_0$ , nm	$\lambda_g$ , nm	$\Delta\lambda_g$ , nm	$R$
Fe(20)/Cr(30)	3.4	94	42	-1.0	0.36	5.6	87	40	-3.4	0.38
Fe(50)/Cr(30)	9.9			-1.1	0.40	10.7			-3.2	0.41

Тоссэ и Пишар [18] на примере пленочной системы на основе Fe и Cr, по всей толщине которой образуется гомогенный ОЦК твердый раствор [13]. Это позволяет провести анализ с помощью указанной модели для однослойных пленок, рабочее соотношение которой имеет такой вид:

$$\gamma_l d \cong (\eta_{\lambda_{gl}} + 1)f(\alpha)d - \lambda_0(1 - p) \times [(\eta_{\lambda_{gl}} + 1)f(\alpha)H(\alpha) - (1 - \mu)U(\alpha)],$$

$\lambda_0$  и  $\lambda_g = \lambda_0 f(\alpha)$  — средняя длина свободного пробега электронов в объеме кристаллитов и лимитируемая границами зерен,  $p$  — коэффициент зеркальности внешней поверхности пленки;  $f(\alpha) = \frac{\rho_0}{\rho_g}$  — функция зернограничного рассеивания электронов;  $\alpha = \frac{\lambda_0}{L} \frac{R}{1-R}$  — параметр зернограничного рассеивания, где  $L$  — средний размер кристаллитов,  $R$  — коэффициент рассеивания электронов на границе кристаллитов;  $\eta_{\lambda_{gl}} = -\frac{1}{\lambda_g} \frac{\Delta\lambda_g}{\Delta\epsilon_l}$  — деформационный коэффициент;  $H(\alpha)$  и  $U(\alpha)$  — известные протабулированные функции. Результаты расчетов  $\lambda_0$  и  $\lambda_g$  в диффузном приближении ( $p = 0$ ),  $\Delta\lambda_g$  при деформации и  $R$  представлены в табл. 3. Отметим, что особенностью этих расчетов является то, что  $\lambda_0$  и  $\lambda_g$  представляют собой величины, усредненные по всему интервалу толщин от 30 (пленка Fe(10)/Cr(20)) до 80 nm (пленка Fe(50)/Cr(30)), в то время как величины  $\Delta\lambda_g$  и  $R$  рассчитываются для каждого образца в отдельности.

Анализ этих данных указывает на то, что основной вклад в чувствительность пленок к деформации дает зернограничное и объемное рассеивание электронов (об этом говорит относительно большое значение  $\Delta\lambda_g$  и величина  $R$ ). Особенность этого рассеивания электронов состоит в том, что характер зернограничного рассеивания по сути не зависит от механизма деформации, поскольку различие величины  $R$  при упругой и пластической деформации находится в пределах точности его расчета.

## Выводы

1. Установлено, что при упругой и пластической деформации одно- и двухслойных пленок основной вклад в чувствительность к деформации дают процессы рассеивания электронов на границе и в объеме зерен, в то время как поверхностное рассеивание дает заметный вклад только при малой толщине образцов.

2. Чувствительность пленок к пластической деформации в несколько раз больше по сравнению с чувствительностью при упругой деформации.

3. Величина деформации, при которой осуществляется переход от упругой к пластической деформации, зависит от толщины образцов и монотонно уменьшается при увеличении толщины (исключение составляют пленки Fe, в которых этот размерный эффект имеет противоположный характер).

4. На примере пленок Fe/Cr, которые представляют собой гомогенный твердый раствор по всей толщине, показано, что зернограничное рассеивание электронов одинаково эффективно как при упругой, так и при пластической деформации, поскольку различие коэффициентов зернограничного рассеивания электронов, имеющих величину около 0.4, лежит в пределах точности его определения.

5. Рассеивание электронов в объеме и границе зерен обуславливает уменьшение средней длины свободного пробега электронов до 30%.

## Список литературы

- [1] Андриевский Р.А., Глезер А.М. // ФММ. 2000. Т. 89. № 1. С. 91–112.
- [2] Поздняков В.А., Глезер А.М. // ФТТ. 2002. Т. 44. Вып. 4. С. 705–709.
- [3] Глезер А.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67. № 6. С. 810–817.
- [4] Носкова Н.И., Волкова Е.Г. // ФММ. 2001. Т. 91. № 6. С. 100–107.
- [5] Носкова Н.И., Волкова Е.Г. // ФММ. 2001. Т. 92. № 4. С. 107–111.
- [6] Lee H.-J., Cornella G., Bravman J.C. // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 76. N 23. P. 3415–3417.
- [7] Lee H., Zhang P., Bravman J.C. // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. N 3. P. 1443–1451.
- [8] Legros M., Cabie M., Gianola D.S. // Microsc. Res. Techniq. 2009. Vol. 2. N 3. P. 270–283.
- [9] Emery R.D., Povirk G.L. // Acta Mater. 2003. Vol. 51. P. 2067–2078.
- [10] Emery R.D., Povirk G.L. // Acta Mater. 2003. Vol. 51. P. 2079–2087.
- [11] Espinosa H.D., Prorok B.C., Peng B. // J. Appl. Phys. 2004. Vol. 52. P. 667–689.
- [12] Иевлев В.М., Белоногов Е.К., Максименко А.А., Агапов Б.Л., Шкатов В.В. Деформация и разрушение материалов. Т. 1. М.: Изд-во МГИУ, 2006. С. 468–471.

- [13] *Protsenko S.I., Velykodnyi D.V., Kheraj V.A., Desai M.S., Panchal C.J., Protsenko I.Yu.* // J. J. Mater. Sci. 2009. Vol. 44. N 18. P. 4905–4910.
- [14] *Odnodvorets L., Protsenko S., Synashenko O., Velykodnyi D., Protsenko I.* // Cryst. Res. Technol. 2009. Vol. 44. N 1. P. 74–81.
- [15] *Клокова Н.П.* Тензорезисторы. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
- [16] *Lasyuchenko O., Odnodvorets L., Protsenko I.* // Cryst. Res. Technol. 2000. Vol. 35. N 3. P. 329–332.
- [17] *Великодный Д.В., Проценко С.И., Проценко И.Е.* // ФИП. 2008. Т. 6. № 1–2. С. 37–42.
- [18] *Tellier C.R., Tosser A.J.* Size effects in thin films. Amsterdam–Oxford–NY: ESPC, 1982. 309 p.