УДК 539.292.539.2

АПРОБАЦІЯ ТРЬОХВИМІРНОЇ МОДЕЛІ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК

І.Ю.Проценко, Н.М.Опанасюк, А.М.Чорноус
(Сумський державний університет, м.Суми)

На прикладі тонких плівок Cr та Cu проведена апробація трьохвимірної моделі тензочутливості Ц.Тельє, А.Тоссе, Ц.Пішара. Одержано, що експериментальні результати з тензочутливості узгоджуються з розрахунковими лише при допущенні про розмірну залежність деформаційного коефіцієнта середньої довжини вільного пробігу електронів.

ВСТУП

У зв'язку з актуальністю питання про визначення параметрів електропереносу металевих плівок воно постійно знаходиться в полі зору як експериментаторів, так і теоретиків. В останній час було запропоновано декілька теоретичних моделей, які враховують зовнішній та внутрішній розмірні ефекти (РЕ). Зокрема, широке застосування одержали модель ефективної довжини вільного пробігу, лінеаризовані співвідношення моделі Маядаса-Шатцкеса, модель ізотропного розсіювання носіїв електричного струму для термічного коефіцієнту опору (ТКО) [1-3] та коефіцієнта тензочутливості (КТ) [4,2]. Загальним недоліком цих моделей є те, що вони можуть бути застосовані або при умові L ≥ d (L-середній розмір кристалітів, d-товщина) [1,2], або при довільному співвідношенні між L та d, але в припущенні ізотропності кристалітів. Як подальший розвиток теорії РЕ є трьохвимірна модель, для ТКО [5] та КТ [3], в якій допускається, що кристаліти мають довільну форму і L_x, L_y та L_z в загальному випадку не співпадають.

Метою даної роботи є апробація трьохвимірної моделі РЕ для КТ. Вибір об'єктів дослідження - плівок хрому та міді - визначався цією задачею, оскільки в плівках Cr L менше, а в Cu більше товщини зразків, що дозволяє провести апробацію для цих двох випадків.

ОСНОВНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Для врахування як зовнішнього, так і внутрішнього РЕ авторами [3] вводяться два параметра розсіювання електронів на межі кристалітів (ν) або на поверхні плівки (μ):

$$\nu = L\lambda_0^{-1}(\ln\frac{1}{r})^{-1}, \mu = d\lambda_0^{-1}(\ln\frac{1}{p})^{-1}, \quad (1)$$

де λ_0 - середня довжина вільного пробігу (СДВП) електронів в об'ємі зразка; r - коефіцієнт проходження межі кристалітів (МК), який пов'язаний з коефіцієнтом відбивання R від МК таким співвідношенням [3]: $R(1-R)^{-1} \cong \ln(r^{-1})$, де p - коефіцієнт дзеркальності поверхні плівки.

ТКО металевих плівок. В найбільш загальному вигляді співвідношення, яке пов'язує ТКО з параметрами ν, μ та $a = (\nu + c^2)(1-c)^{-1}$, де $c = 4/\pi$, було одержано в [5]:

$$\frac{\beta_s}{\beta_0} = \frac{\nu}{1-c}\,\frac{a^{-1}-2+2a\ln(1+a^{-1})}{a-1/2+(1-a^2)\ln(1+a^{-1})} = \frac{\nu}{1-c}\,\frac{V(a)}{U(a)}, \quad (2)$$

β_s- та β_0- ТКО нескінченно товстої ($d \to \infty$) полікристалічної плівки та масивного зразка, відповідно.

В роботі [6] співвідношення (2) було конкретизовано для випадку полікристалічної (індекс p), або такої, яка задовольняє умові монокристалічності (індекс m), плівок

$$\frac{\beta_p}{\beta_0}=\frac{a_p}{1+\frac{c^2}{\nu}}\frac{V(a_p)}{U(a_p)},\quad \frac{\beta_m}{\beta_0}=\frac{a_m}{1+\frac{c^2}{\nu}}\frac{V(a_m)}{U(a_m)},$$

де $\quad a_p=(1+\frac{c^2}{\nu})b_p^{-1},\qquad a_m=(1+\frac{c^2}{\nu})b_m^{-1},$

$$b_p=\frac{1}{\mu}+\frac{1-c}{\mu},\qquad b_m=\frac{1}{\mu}-\frac{c}{\nu}.$$

В цій же роботі було одержане лінеаризоване за параметрами ν і μ співвідношення для ТКО полікристалічних плівок при умові $0,1<\nu<4$ та $\mu>0,1$. Аналогічне спрощення було здійснено в [7] при умові монокристалічності плівкового зразка, тобто при $\mu \ll 1 \ll \nu$ та $p<1$, $r\cong 1$:

$$(\beta_m \ln\frac{\lambda_0}{d})^{-1}\approx \beta_0^{-1}(1+\frac{c^2}{\nu})(1+ \\ +(\ln\frac{\lambda_0}{d})^{-1}\ln\frac{\ln(1/p)}{1+c^2/\nu}) . \qquad (3)$$

В тому випадку, коли плівки полікристалічні і виконується умова $\mu<1$ та $\nu>1$, можна користуватися аналогічним лінеаризованим співвідношенням [8]:

$$(\beta_p \ln\frac{\lambda_0}{d})^{-1}\approx 1{,}43\beta_0^{-1}(1+\frac{c^2}{\nu})(1+ \\ +(\ln\frac{\lambda_0}{d})^{-1}\ln\frac{\ln(1/p)}{1+c^2/\nu}) . \qquad (4)$$

КТ металевих плівок. Трьохвимірна модель тензочутливості може бути застосована при умові $\nu>0,4$ і для коефіцієнта повздовжньої тензочутливості (γ_1) має такий вигляд:

$$\gamma_1=(\eta_l+1)-\eta_l\frac{F^*(\nu_x)+G^*(\nu_y)+G^*(\alpha^*)}{M(\nu_x,\nu_y,\alpha^*)}+ \\ +\frac{\mu_s G^*(\nu_y)-F^*(\nu_x)-\mu' G^*(\alpha^*)}{M(\nu_x,\nu_y,\alpha^*)}, \qquad (5)$$

де

$$M(\nu_x,\nu_y,\alpha^*)=F(\nu_x)^{-1}+G(\nu_y)^{-1}+G(\alpha^*)^{-1}-2=\frac{\rho}{\rho_0}$$

(ρ,ρ_0 - питомий опір плівки та масивного зразка відповідно); $(\alpha^*)^{-1}=\mu^{-1}+\nu_z^{-1}$; функції $F(\nu_x)$, $G(\nu_y)$, $G^*(\alpha^*)$, їх похідні

$$f(\nu_x)=\frac{dF}{d\nu_x},\ g(\nu_y)=\frac{dG}{d\nu_y},\ g(\alpha^*)=\frac{dG}{d\alpha^*}$$

- відомі функції [3] і нами табульовані (рис.1), а $F^*(\nu_x)=\nu_x f(\nu_x)F(\nu_x)^{-2}$;

$$G^*(\nu_y)=\nu_y g(\nu_y)G(\nu_y)^{-2};$$

$$G^*(\alpha^*)=\alpha^* g(\alpha^*)G^*(\alpha^*)^{-2},$$

де μ_s,μ' - коефіцієнт Пуассона для матеріалу підкладки та приведений коефіцієнт Пуассона відповідно; $\eta_l=-\lambda_0^{-1}\frac{d\lambda_0}{d\varepsilon_l}$ - деформаційний коефіцієнт СДВП (ε_l - поздовжня деформація).

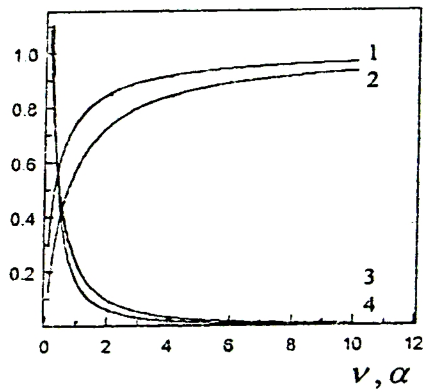

Рис.1. Графічне табулювання функцій розсіювання електронів: 1 - G(ν), G(α); 2 - F(ν); 3 - f(ν); 4 - g(ν), g(α*)*

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Плівки Cr та Cu конденсувалися і термооброблялися в установці ВУП-ГМ та установці на основі магніто-розрядного насоса (вакуум $\approx 10^{-4}...10^{-5}$ Па). В якості підкладок використовувалися скляні (вимірювання ТКО) чи текстолітові (вимірювання КТ) пластини та вуглецеві плівки (для проведення електронно-мікроскопічних досліджень). Елементний склад зразків вивчався методом вторинно-іонної мас-спектрометрії (МС 7201 М). В плівках Cu були зафіксовані сліди CuO^+, хоча електронографічно оксиди Cu не спостерігаються. Для вимірювання середнього розміру L_x та L_y зразок для електронно-мікроскопічних досліджень орієнтувався таким чином, що напрямок осі x співпадав з напрямком протікання струму при вимірюванні опору. Розмір L_z брали рівним товщині плівки.

КТ розраховувався за кутовим коефіцієнтом деформаційної залежності $\Delta R/R_п$ від ε_l ($R_п$ - початковий опір, ΔR - його зміна при деформації, $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_п}$, де $l_п$ - початкова довжина плівки), яка одержувалася при повздовжній деформації плівки з підкладкою методом розтягу за допомогою мікрогвинта ($\varepsilon_{max} = 2 \cdot 10^{-2}$).

Відпалювання зразків з метою рекристалізації та стабілізації їх електричних властивостей здійснювалося у вакуумній камері за схемою "нагрівання - охолодження" (від 300 до 700 К) зі швидкістю 3 К/хв.

ОБРОБКА ТА ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Експериментальні залежності для ТКО представлені на рис.2.

Оцінка параметрів μ, ν та значення коефіцієнтів p і r вказують на те, що результати для плівок Cu можуть бути оброблені в рамках співвідношення (3), в той час як для Cr - за співвідношенням (4). Використовуючи значення λ_0, одержане в рамках моделі ізотропного розсіювання, було проведено розрахунок параметрів p і r (таблиця), які потім використовувалися в співвідношенні (5).

ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОПЕРЕНОСУ, ЯКІ ОДЕРЖАНІ ІЗ СПІВВІДНОШЕНЬ (3) І (4)

Плівка	λ_0,нм [9]	r	p
Cu	38,7	0,80-0,72	0
Cr	129	0,99	0,01

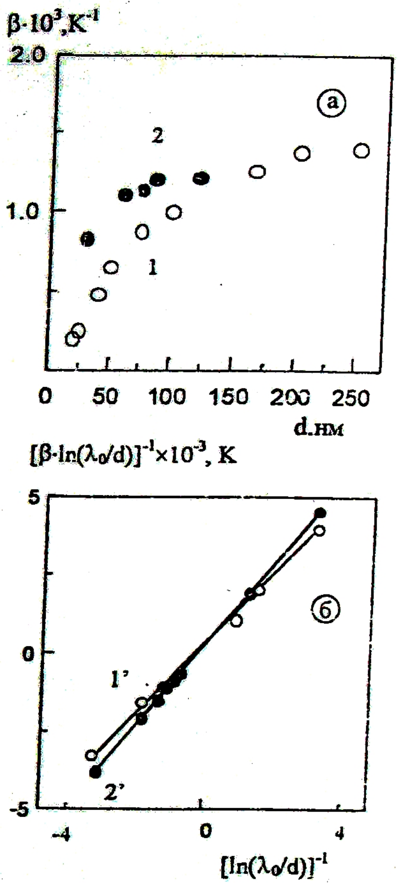

Рис.2. Розмірна залежність ТКО для плівок Cr (1,1') та Cu (2,2') в різних координатах (T=300 K)

На рис.3 представлені крім експериментальних даних для КТ γ_l також і розрахункові. Як видно із цього рисунка, найбільш погана відповідність має місце, коли величина $M(\nu_x, \nu_y, \alpha^*) = \rho/\rho_0$ розраховується теоретично. В той же час використання експериментальних значень ρ/ρ_0 або ρ/ρ_g (ρ_g - питомий опір нескінченно товстої ($d \to \infty$) плівки, тобто масивного зразка з таким же типом і концентрацією дефектів, як і плівкового зразка) дає приблизно однакову величину γ_l, яка помітно відрізняється від експериментального. Це наводить на думку, що деформаційний коефіцієнт СДВП є сам розмірнозалежним параметром електропереносу (рис.3).

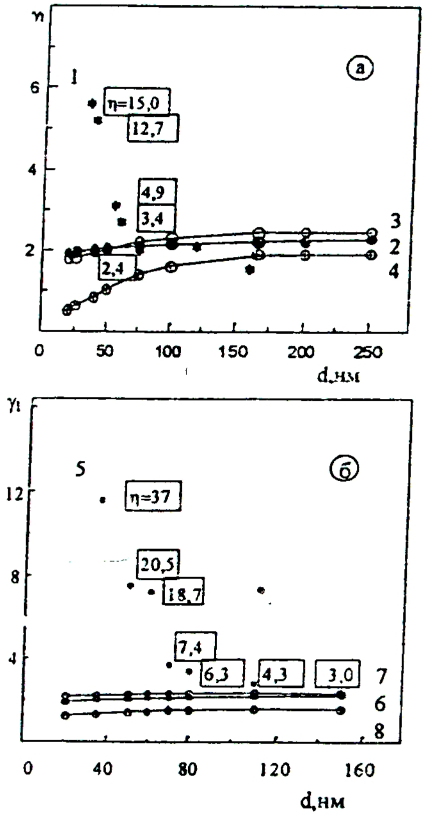

Рис.3 Розмірна залежність КТ для плівок Cr (а) та Cu (б): 1,5 - експериментальні результати; 2-4,6-8 - розрахункові дані при використанні розрахункового (2,6) і експериментального значення ρ/ρ_0 (3,7) або експериментального значення ρ/ρ_g (4,8); □ - розрахункові величини деформаційного коефіцієнту СДВП η_l (числа приведені біля точок) при використанні експериментального значення ρ/ρ_g

Сама ідея про такий розмірний ефект не може викликати великих заперечень, хоча би з тієї причини, що багато фізичних величин залежать від товщини плівки. З іншого боку необхідно також підкреслити, що в трьохвимірній моделі тензочутливості використовуються величини, які важко проконтролювати експериментально: L_x, L_y, L_z і відповідно - ν_x, ν_y та α^*. Нами спостерігалося, що навіть незначні зміни розмірів та форми кристалітів обумовлюють значну зміну ρ та γ_l . При цьому велику роль відіграють межі розділу кристалітів та їх тип (мало - чи великокутові), концентрація домішкових атомів, які локалізуються на межах, та інше. З цієї точки зору, деформаційний коефіцієнт можна розглядати не як розмірний, а підгоночний параметр. Однак нам здається, більш правильно говорити в цьому випадку про розмірний ефект параметра η_l від товщини плівки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tellier C.R., Tosser A.J.// Thin Solid Films. 1977. Vol. 43. №3. P. 261.
2. Pichard C.R., Tellier C.R.// Rev. Phys. Appl. 1979. Vol. 14. №8. P. 743.
3. Tosser A.J., Tellier C.R., Pichard C.R. // J. Mater. Sci. 1981. Vol. 16. №7. P. 944
4. Tellier C.R., Tosser A.J.// Thin Solid Films. 1979. Vol. 59. №1. P. 163.
5. Pichard C.R., Tellier C.R., Tosser A.J. // Phys. Stat. Sol.(a). 1981. Vol. 65. №1. P. 327.
6. Guendouz L.,Tellier C.R., Tosser A.J., Pichard C.R. // J.Mater. Sci. Lett. 1984. Vol. 3. №5.P. 377.
7. Pichard C.R., Komnik Yu. F., Belevsev B.I., Tosser A.J. // J. Mater. Sci. 1983. Vol. 2. №7. P. 360.
8. Проценко И.Е.// Изв. вузов. Физика. 1988. №6. С.42.

Статья поступила:
в редколлегию 21.10.97
в редакцию 25.11.97