ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 7, № 2 (2006) С. 241-244

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 7, № 2 (2006) P. 241-244

УДК 539.23:537.311

ISSN 1729-4428

І.П. Бурик, Д.В. Великодний, Л.В. Однодворець, І.Ю. Проценко, Н.І. Шумакова

Деякі особливості тензорезистивного ефекту в металевих дротах при їх пластичній деформації

Сумський державний університет,
вул. Р.- Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна

Проведені дослідження тензорезистивного ефекту в тонких дротах Cu, Ni і Mo при їх пластичній деформації. На основі експериментальних даних здійснено розрахунок коефіцієнта повздовжньої тензочутливості, деформаційного коефіцієнта середньої довжини вільного пробігу (λ_0) та коефіцієнта Пуассона (μ) в залежності від деформації. Проаналізовано питання про можливу величину і знак деформаційних коефіцієнтів λ_0 і концентрації електронів. Зроблено висновок, що величина μ при пластичній деформації не дорівнює 0,5.

Ключові слова: дроти, тензоефект, пластична деформація, деформаційні коефіцієнти, коефіцієнт тензочутливості.

Стаття поступила до редакції 17.11.2005; прийнята до друку 15.03.2005

Вступ

Не дивлячись на довгу історію дослідження явища тензочутливості (було відкрите в 1856 р. Лордом Кельвіном [1]) і накопичення значного теоретичного [1-4] та експериментального [1, 2, 5] матеріалу (див. також [6-11] та цитовану в них літературу) деякі аспекти цієї проблеми залишаються ще не до кінця розробленими і вивченими. Це постійно стимулює проведення різнопланових досліджень [12-16], але, в основному, на прикладі тонких плівок [3,4,7-15] або товсто плівкових резисторів [17-19].

Не дивлячись на те, що теоретичні основи тензочутливості металевих дротів в області пружної деформації ($\varepsilon_l \leq 0{,}6\%$) були закладені ще в роботі [1], деякі проблеми залишаються невирішеними, оскільки спостерігається значна неузгодженість результатів різних авторів. Крім того, ефект тензочутливості залишається маловивченим в області пластичних деформації як тонких плівок, так і дротів (див., наприклад, [11]). Найбільш незрозумілою проблемою залишається питання про величину і знак т.зв. деформаційного коефіцієнта питомого опору

$$\gamma^{\rho}_{l,t} = \frac{d\ln\rho}{d\varepsilon_{l,t}} = \frac{d\rho}{\rho_п d\varepsilon_{l,t}}, \qquad (1)$$

де індекси l і t означають поздовжню або поперечну деформацію;

$\rho_п$ – початковий питомий опір;

ε – т.зв. інженерна деформація, яка пов'язана із істиною деформацією співвідношенням $e = \ln(1+\varepsilon)$.

Між деформаційним коефіцієнтом $\gamma^{\rho}_{l,t}$ і коефіцієнтом тензорезистивної чутливості (γ^{ρ}_{l}), який частіше за все (див. [2,5,11]) називають коефіцієнтом поздовжньої або поперечної тензочутливості (в англомовній літературі – gauge factor [1, 3,7-9,13,15,17,18,20]) існує просте співвідношення [1]:

$$\gamma_{l,t} = \gamma^{\rho}_{l,t} + 1 + 2\mu, \qquad (2)$$

де μ - коефіцієнт Пуассона для плівкового матеріалу.

Оскільки в класичному наближенні $\rho \sim (\lambda_0 \cdot n)^{-1}$, де λ_0 – середня довжина вільного пробігу електронів в об'ємі зразка (СДВП), а n –їх концентрація, то γ^{ρ}_{l} (для випадку поздовжньої деформації (для поперечної – аналогічно)) можна записати так [1]:

$$\gamma^{\rho}_{l} = -\frac{d\lambda_0}{\lambda_0 d\varepsilon_l} - \frac{dn}{n d\varepsilon_l} = \eta_{\lambda_0 l} + \eta_{nl}, \qquad (3)$$

де $\eta_{\lambda 0}$ і η_n – деформаційні коефіцієнті СДВП і концентрації n (їх можна представити і таким чином: $\eta_{\lambda_0 l} = -\frac{d\ln\lambda_0}{d\varepsilon_l}$, $\eta_{nl} = -\frac{d\ln n}{d\varepsilon_l}$). Враховуючи, що $n = 2\pi k$ (k – хвильове число) і $k \approx (1-\beta\cdot\varepsilon_l)$, де β – коефіцієнт в лінійному розкладенні хвильового числа по деформації, при відносно малих значеннях ε_l можна записати

$\ln k \cong \ln(1-\beta\varepsilon_l) = -\beta\varepsilon_l$,

або

$$\eta_{nl} \cong \beta \cong \begin{cases} -1, \text{ якщо при деформації } dn > 0, \\ +1, \text{ якщо при деформації } dn < 0. \end{cases}$$

Таким чином співвідношення для деформаційного коефіцієнта СДВП можна представити так:

$$\gamma_l^{\rho} \cong -\frac{\ln \lambda_0}{d\varepsilon_l} + \beta, \qquad (4)$$

де $\eta_{\lambda_0 l}<0$ у випадку, коли при деформації збільшується СДВП ($d_{\lambda 0}>0$ – електрон прискорюється) і $\eta_{\lambda_0 l}>0$, коли СДВП зменшується ($d\lambda_0<0$ – електрон гальмується).

Із (4) витікає, що в залежності від знака $\eta_{\lambda 0l}$ і β значення γ_l^{ρ} може бути більше або менше нуля. Проведений в [10] аналіз показав, що величина і знак $\Delta\lambda_0$ визначаються конкурентною, дією по крайній мірі, трьох факторів: об'ємною, зерномежове і поверхневого розсіювання. Ці ж автори отримали для тонких плівок деяких металів, здеформованих до 1%, $\Delta\lambda_0$=+5÷6 нм і $\eta_{\lambda 0}$= –(3–4) (Cr і Sc) та $\Delta\lambda_0$= –0,4нм і η_{0l} =+0,30(Cu). Однак, трудність вимірювання питомого опору плівок не дозволяє визначити величину параметра β, хоча із загальних міркувань [1] його величина $|\beta| \sim 1$ (автор [1] не аналізував можливість $\beta<0$, оскільки виходить із допущення, що в процесі деформації $dn<0$). В той же час ми повинні констатувати факт, що доступні експериментальні можливості не дозволяють однозначно встановити кореляцію між dn і $d\lambda_0$.

Крім проаналізованої вище проблеми, у полі зору дослідників (наприклад, [5]) знаходиться також питання про можливу величину γ_l і μ в області пластичної деформації. Якісний аналіз [5] вказує на те, що в цьому випадку величина γ_l визначається тільки геометричними факторами (кількісна характеристика $\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_n}$ та $\varepsilon_t = \frac{\Delta a}{a_n}$), оскільки при пластичній деформації відбувається лише перегрупування кристалів, а деформація в об'ємі зерна відсутня (з цієї причини γ_l^{ρ} = 0, хоча зерномежове розсіювання електронів [10] повинно давати значний внесок у величину ρ). Якщо виходити із міркувань [5], то γ_l^{ρ} = 0, а μ=0,5 і тоді, у відповідності 3(2), $\gamma_l \approx 2$ для усіх металів. Отримані нами експериментальні результати не підтверджують якісних міркувань [5]. Відмітимо, також, що при розрахунках γ_l^{ρ} необхідно враховувати зміну довжини і діаметра зразків.

I. Методика експерименту

Нами досліджувався ефект тензочутливості на прикладі дротів Cu (діаметр D=6·10^{-2}; 12·10^{-2} та 28·10^{-2}мм і l=0,501; 0,500 та 0,600м відповідно), Ni (D=44·10^{-2}мм і l=0,07м) та Mo (D=21·10^{-2}мм і l=0,165м). Деформаційний пристрій був змонтований на основі деяких вузлів токарного верстату, абсолютне видовження Δl вимірювалося індикатором довжини з ціною поділки 0,01 мм. Опір вимірювався за чотириточковою схемою за допомогою моста Р-334 (діапазон вимірювання

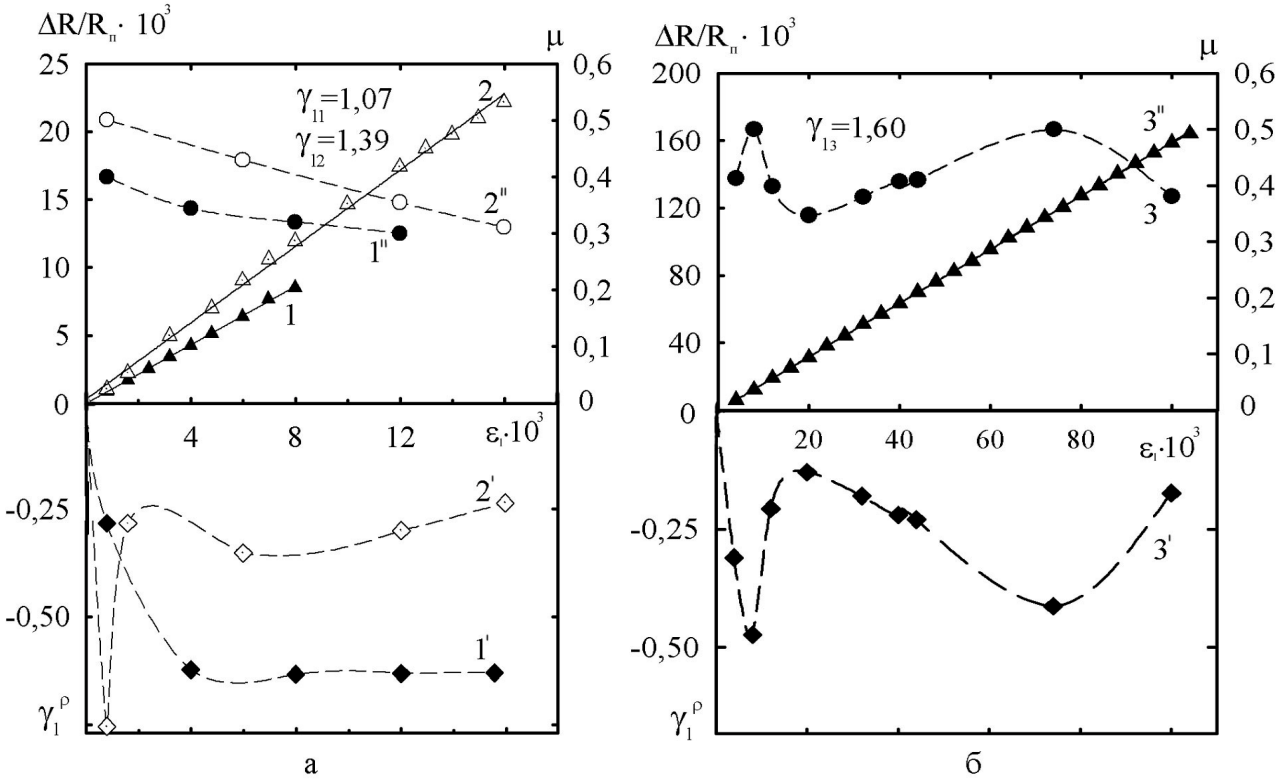

Рис. 1. Залежність відносної зміни опору R (1-3), γ_l^{ρ} (1′-3′) та розрахункової на основі (2) величини μ (1″- 3″) для дротів Cu. Діаметр, мм: 6·10^{-2} (1), 12·10^{-2} (2) (а) та 28·10^{-2} (3) (б) мм.

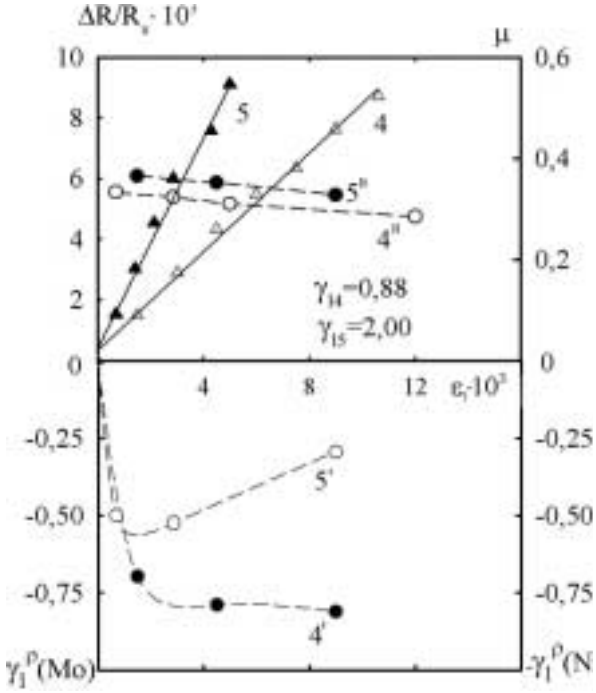

Рис. 2. Залежність відносної зміни опору (4, 5), γ_l^{ρ} (4′ ,5′) та розрахункової на основі (2) величини μ (4″, 5″) для дротів Mo (4) і Ni (5).

опорів $10^{-4}\div1$ Ом). Кожний зразок деформувався до руйнування (розриву).При цьому мав місце розмірний ефект, тобто залежність ε_{max} від D: ε^{Cu}_{max} =0,8 ($D_1=6\cdot10^{-2}$мм); 1,60% ($D_2=12\cdot10^{-2}$мм) та 9,6% ($D_3=28\cdot10^{-2}$мм); ε^{Ni}_{max}=0,5% і ε^{Mo}_{max}=1,06%. Питомий опір розрахувався за співвідношенням

$$\rho = \frac{\pi R}{4 l_п}\left(D_п - \Delta D\right)^2, \qquad (5)$$

де $\left|\Delta D\right| = \mu \frac{D_п}{l_п}\Delta l$, ($D_n$, l_n – початковий діаметр і довжина зразка). При розрахунках використовувались такі величини коефіцієнта Пуассона [1]: μ=0,35 (Cu); 0,31 (Ni) та 0,32 (Mo). При використанні μ ≈0,5 результати розрахунків γ_l^{ρ} суттєво не змінюються.

II. Результати експерименту та їх обговорення

На рис. 1 і 2 представлені залежності $\frac{\Delta R}{R_п}$, γ_l^{ρ} і μ від деформації ε_l для дротів Cu, які в перших двох випадках ілюструють розмірний ефект, аналогічний для деформації руйнування. Величину μ розраховували на основі співвідношення (2) (хоча в (5) підставлялися табличні дані [1] для) при допущенні, що β=1.

Результати, представлені на рис 1 і 2, дозволяють говорити що такі особливості тензоефекту в масивних дротах (Cu і Mo) при пластичні деформації.

По-перше, звертає на себе увагу мале значення γ_l^{ρ} . Для порівняння для пружно здеформованих дротів приблизно таких же діаметрів, які і наших експериментах, згідно [1] γ_l^{ρ}=1,20-1,60, (Cu), 0,80 (Mo) і -12 (Ni), що в принципі відрізняється від наших даних як абсолютною величиною, так і знаком. Хоча додатне значення γ_l^{ρ} для дроту Ni в нашому випадку, вузький інтервал деформації (до 0,5%) і розрахункова величина μ ≈0,32 говорять на користь пружної деформації, а від'ємне значення γ_l^{ρ} у випадку [1] – на користь пластичної деформації. На наш погляд, відміна наших і автора [1] результатів може бути пов'язано не тільки з типом деформації, а і з структурним станом зразків.

По-друге, необхідно вказати, що розрахункова на основі (2) величина μ лежить далеко за межами величини 0,50, згідно висновку [5] (із рис.1,б видно, що μ ≈0,50 лише в максимумах кривої 3″), що може бути пояснено виходом кристалітів на бокову поверхню дроту.

По-третє, в дротах Cu на залежності γ_l^{ρ} (ε_l) спостерігаються мінімуми (у зразках з D =$28\cdot10^{-2}$м їх два, оскільки інтервал деформації складає 9,6%), природа яких може бути пов'язана з різними механізмами деформації.

Насамкінець відмітимо, що скориставшись величиною γ_l^{ρ} ≈ -0,62 (для Cu з [10] можна оцінити параметр β за співвідношенням (4). Така оцінка дає величину β ≈ -0,92, що дуже близько до -1. Це означає, що у випадку Cu зменшення величини СДВП призводить до збільшення концентрації електронів (dn > 0), ймовірно причиною чого може бути збільшення числа зіткнень електронів в одиниці об'єму.

Автори виражають подяку магістранту Редьку Р.О. за допомогу при проведенні експерименту.

Роботу виконано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (держбюджетна тема № 0103U000773).

Бурик І.П. – пошукач;
Великодний Д.В. – аспірант;
Однодворець Л.В. – доцент, кандидат фізико-математичних наук;
Проценко І.Ю. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики;
Шумакова Н.І. – доцент, кандидат фізико-математичних наук.

[1] G.C. Kuczynski. Effect of elastic strain on the electrical resistance of metals // *Phys. Rev.*, **94**(1), pp. 61-64 (1954).

[2] З.Г. Мейксин. Несплошные керметные пленки / *Физика тонких пленок. Том VIII. / Под ред. Г.Хасса, М. Франкомба и Р. Гофмана.* Мир, М. (1979).
[3] C.R. Tellier, A.J.Tosser. *Size effects in thin films.* ESPC, Amsterdam, Oxford, New-York (1982).
[4] O. Lasyuchenko, L. Odnodvoretz, I. Protsenko. Microscopy theory of the tensosensibility of multilayer polycrystalline films // *Cryst. Res. Technol.,* **35**(3), pp. 329-332 (2000).
[5] Н.П. Клокова. *Тензорезисторы.* Машиностроение. М. (1990).
[6] І.Ю. Проценко, В.А. Саєнко. *Тонкі металеві плівки (технологія та властивості).* Вид-во СумДУ, Суми (2002).
[7] K. Rajanna, M.M. Nayak. Strain sensitivity and temperature behavior in invar alloy films // *Mat. Scien. Engin.* **77** B, pp. 288-292 (2000).
[8] S.U. Jen, C.C. Wu, C.H. Lin et al. Piezoresistance and electrical resistivuty of Pd, Au and Cu films // *Thin Solid Films*. **434**(1), pp. 316-322 (2003).
[9] I.H. Kazi, P.M. Wild, T.N.Moore et al. The electromechanical behavior on nichrome (80/20 wt%) film // *Thin Solid Films.* **433**, pp. 337-343 (2003).
[10] С.І. Проценко, А.М. Чорноус. Дослідження і прогнозування тензорезистивних властивостей плівкових систем на основі Cr, Cu і Sc // *Металлофиз. Новейшие технол.* **25**(5), сс. 587-601 (2003).
[11] Є.О. Забіла, І.Ю. Проценко Методика вивчення тензорезистивних властивостей плівок Cr при відносно малих і великих деформаціях // *Укр. фіз. журн.* **50**(7), сс. 729-736 (2005).
[12] С.І. Проценко. Про температурну залежність коефіцієнтів повздовжньої і поперечної тензочутливості металевих плівок // *ФХТТ.* **3**(3), сс. 401-403 (2002).
[13] O.J. Gregory, Q. Luo, J.M. Bienkiewicz et al. An apparent on top transition in reactively sputtered indium-tin-oxide high temperature strain gages // *Thin Solid Films.* **405**, pp. 263-269 (2002).
[14] F. Loffler, C. Siewert, C. Ascher. Manganin thin sensor for force sensing // *Surf. Coat. Technol.* **174-175**, pp. 1287-1292 (2003).
[15] H. Chiriac. M. Urse, F. Rusu et al. Ni-Ag thin films as straine-sensitive materials for piezoresistive sensors // *Sensors and Actuat.* **76A**, pp. 376-380 (1999).
[16] А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, О.П. Кутраков та ін. Вплив деформації на домішкову провідність ниткоподібних кристалів Si в області переходу мметал-діелектрик // *ФХТТ.* **4**(4), сс. 720-728 (2003).
[17] M.Hrovat, D.Belavic, Z. Samardazija. Charactesation of thick film resistor series for strain sensors // *J. European Cer. Soc.* **21**, pp. 2001-2004 (2001).
[18] M.Hrovat, A.Bencan, D.Belavic et al. The influence of firing temperature on the electrical and microstructural characteristics of thick-film resistors for strain gauge applications // *Sensors and Actuat.* **103A**, pp. 341-352 (2003).
[19] C. Crimaldi, P. Ryser, S. Strassler. Piezoresistive anisotropy of thick-film resistors // *J. Europen Cer. Soc.* **24**, pp. 1893-1896 (2004).
[20] C. Jacq, Th. Maeder, P. Ryser. High-strain response of piezoresistive thick resistors on titanium alloy substrates // *J. Europen Cer. Soc.* **24**, pp. 1897-1900.

I.P. Buryk, D.V. Velykodnyi, L.V. Odnodvorets, I.Yu. Protsenko, N.I. Shumakova

The Some Especially of Strain-Resistance Effect on Metal Wires at the Plastic Deformation

Sumy State University, R.-Korsakova street, 2,.Sumy, 40007, Ukraine

The strain-resistance effect on thin wires Cu, Ni i Mo at plastic deformation was investigated. On base of experimental data was calculated of longitudinally gauge factor, deformation coefficient of the mean free path (λ_0) and Poisson's coefficient (μ) on dependence of deformation. Question about value and sign of deformation coefficients λ_0 and electrons concentration was analysed. Conclusion what value μ at the plastic deformation not equal 0,5 have been draw.