

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК МОЛІБДЕНУ В УМОВАХ ВНУТРІШНЬОГО РОЗМІРНОГО ЕФЕКТУ

О.А.Білоус, А.М.Чорноус

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

Стаття присвячена комплексному дослідженню кристалічної структури та електрофізичних властивостей (питомий опір, температурний коефіцієнт опору) плівок молибдену. Розрахунок параметрів електроперенесення (середня довжина вільного пробігу носіїв струму в плівці, коефіцієнтів проходження і розсіювання на межі зерна) проводиться на основі ізотропної моделі Тельє-Тоссе-Пішар та асимптотичних співвідношень моделі Ухлінова-Косаківської і теорії Майядаса-Шатцкеса.

ВСТУП

Широке практичне використання плівкових матеріалів, з однієї сторони, та інтерес з точки зору фундаментальної науки, з іншої, стимулює активні дослідження у плівковому матеріалознавстві, один з напрямків якого пов'язаний з електронними процесами розсіювання на зовнішніх та внутрішніх межах. Незважаючи на великий обсяг проробленої у цьому напрямку роботи залишаються ряд проблем, які ще потребують або додаткових досліджень, або систематизації і узагальнення існуючих результатів. До таких питань можна віднести пов'язане з розмірними ефектами у електрофізичних властивостях (питомий опір температурний коефіцієнт опору (ТКО)) плівок Мо, вивчення яких присвячено ряд робіт (див., наприклад, [1-6] та ін.)

У роботі [1] досліджений розмірний ефект у електропровідності плівок Мо товщиною $d \leq 23$ нм, отриманих в умовах надвисокого вакууму та стабілізованих при температурі 373К, що дало можливість у рамках теорії електропровідності Фукса-Зондгеймера розрахувати середню довжину вільного пробігу (СДВП), яка для електронів і дірок склала 12,5 і 8 нм відповідно. Розмірна залежність питомого опору плівок Мо товщиною до 1000 нм при різних температурах досліджена у роботі [2]. Оброблення експериментальних даних цими авторами здійснювалось з використанням формул для функції і параметру зерномежового розсіювання, що отримані в рамках теорії Майядаса-Шатцкеса [7] (теорія МШ). Ними розраховано значення коефіцієнта зерномежового розсіювання (R), який у інтервалі температур 573...873К змінюється від 0,41 до 0,21. Автори [3] на основі розмірної залежності питомого опору (інтервал товщин 5...150 нм) отримали величини $R = 0,28...0,44$, але при $T_{\text{пл}} \leq 47$ К. При розрахунках у [2, 3] використовувалось величина СДВП $\lambda = 32,5$ нм.

Результати дослідження електропровідності аморфних та кристалічних плівок Мо приведені у [4]. Згідно даних [4] аморфні плівки у інтервалі товщин 40...140 нм ($T_{\text{пл}} = 107$ К) мають від'ємне значення ТКО (змінюється від $-20,3 \cdot 10^{-5}$ до $-9,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$). Кристалічні плівки ($T_{\text{пл}} = 653$ К) мають як додатні, так і від'ємне значення ТКО, що було пояснено впливом домішкових атомів із залишкової атмосфери. Розрахунок параметрів електроперенесення для кристалічних плівок Мо авторами [4] проведено на основі

моделі ефективного довжини вільного пробігу. З отриманих ними результатів звертає на себе той факт, що СДВП та R є розмірно-залежними величинами, причому має місце зменшення коефіцієнта R від 0,45 до 0,10 при зростанні товщини плівки від 40 до 70 нм.

Авторами [5] вивчалась розмірна залежність питомого опору і ТКО плівок Мо товщиною $d < 45$ нм на підкладках із скла та NaCl з середнім розміром зерна $L = 6...10$ нм. З використанням теорії МШ та Тельє-Тоссе-Пішар (ТПП) [8] при $\lambda = 46$ нм визначені величини коефіцієнтів розсіювання (R) і проходження (r) меж зерен, що складають 0,30; 0,65 і 0,45; 0,42 відповідно, та не залежать від температури у діапазоні 78...370 К. У роботі [5] зроблено висновок, що значення коефіцієнтів розсіювання і проходження на межі зерна для плівок металів не залежить від лінійних розмірів кристалітів у інтервалі їх значення $8 < L < 30$ нм.

Аналізуючи наведені вище результати можна відмітити наступне.

По-перше, не існує одностайної думки про температурну і розмірну залежність коефіцієнтів розсіювання і проходження на межі зерна. По-друге, лише в одному випадку [5] авторами для розрахунку параметрів електроперенесення використовувались модель ізотропного розсіювання ТПП [8]. Співвідношення цієї моделі, які отримані у рамках теорії МШ [7], дозволяють більш коректно проводити обробку експериментальних результатів з розмірної залежності ТКО у плівкових зразках, ніж на основі інших асимптотичних наближень теорії МШ, зокрема, моделі ефективного довжини вільного пробігу, яка застосовувалась в роботі [4]. По-третє, після публікації переважної більшості цитованих робіт з'явилась теоретична модель Ухлінова-Косаківської (модель УК) [9], яка описує залежність провідності металевих матеріалів від середнього розміру зерна. Певні асимптотичні співвідношення цієї моделі можуть бути використані як для оброблення експериментальних результатів у плівках з різним середнім розміром зерна, так у дротах і фольгах одного металу. Застосування цієї моделі може частково дати відповідь на питання про залежність СДВП та коефіцієнтів розсіювання і проходження на межі зерна від середнього розміру кристалітів. Таким чином, мета роботи полягає у комплексному дослідженні кристалічної структури та розмірної залежності пи-

тогому опору і ТКО плівок та проведенні розрахунків параметрів електроперенесення на основі моделі ізотропного розсіювання електронів ТПІ та моделі УК.

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ, ФАЗОВИЙ СКЛАД ТА КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА

Плівки молібдену були отримані методом електронно-променевого випаровування у вакуумі $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па одночасно на підкладки із скла з вплавленими молібденовими стрижнями (для вимірювання електроопору), скляну пластину (для визначення товщини) та на (001)NaCl і плівку з вуглецю (для проведення мікроскопічних досліджень). Термостабілізація електрофізичних властивостей плівкових зразків проводилась відпалюванням за схемою "нагрівання-охолодження" протягом трьох циклів в інтервалі температур 290...700К зі швидкістю 2...3 К/хв. Товщина плівок визначалась інтерферометричним методом (прилад МІІ-4). Для проведення структурних і дифракційних досліджень застосовувались електронний мікроскоп ПЕМ-125К та рентгенівський дифрактометр ДРОН-2.0.

При розробці методики одержання плівок молібдену нами був проведений аналіз існуючих літературних даних [4, 10-12] про фазоутворення у конденсатах цього металу. У вказаних роботах наводяться результати про вплив ступеню вакууму, швидкості конденсації, температури і матеріалу підкладки та режимів термообробки на фазовий склад. Варіація цих параметрів дає можливість отримати плівки із широким спектром фазового складу. При низьких температурах підкладки (<300 К) вони мають аморфну структуру, яка при відпалюванні кристалізується [4]. При збільшенні температури підкладки плівки молібдену конденсуються у кристалічну фазу, причому тип решітки істотним чином залежить від швидкості осадження. Так, згідно [10, 12], при швидкості конденсації (ω), меншій 0,8 та 0,45 нм/с, утворюється ГЦК-фаза. Підвищення швидкості осадження призводить до виникнення стабільної ОЦК-фази. На думку авторів [10, 11] кристалічна решітка з ГЦК - структурою утворюється внаслідок взаємодії конденсату з компонентами масел, які використовуються в дифузійних насосах.

Термообробка аморфних і кристалічних плівок призводить до наступних хімічних перетворень [12]:

- підкладка – плівка вуглецю:
 $a\text{-Mo} \rightarrow \text{ОЦК-Mo} \rightarrow \text{ГЦК-MoC}_x \rightarrow \text{ГПУ-MoC}_2$,
 $\text{ОЦК-Mo} \rightarrow \text{ГЦК-MoC}_x \rightarrow \text{ГПУ-MoC}_2$;
- підкладка –(001) NaCl:
 $a\text{-Mo} \rightarrow \text{ОЦК-Mo}, \text{ОЦК-Mo} \rightarrow \text{рекристалізація}.$

У роботі [13] аналізується питання про вплив ступеню вакууму (P), швидкості осадження та температури підкладки на фазовий склад плівок шляхом введення так званого параметру конденсації $\alpha = P \cdot \omega^{-1} \cdot T_p^{-1/2}$. Змінюючи цей параметр можна керувати фазовим складом плівкових зразків. Зменшуючи величину α за рахунок збільшення значень T_p , ω можна отримати плівки Мо з фазовим складом, який відповідає масивним зразкам. Розрахунок параметра α по даним робіт [10, 12], де були отримані плівки

ОЦК-Мо, показав, що його величина складає $(2,6 \dots 5,3) \cdot 10^4$ та $(2,2 \dots 8,3) \cdot 10^4$ (Па·с)/(м³·К^{-1/2}). Таким чином, для забезпечення значення $\alpha = (4 \dots 5) \cdot 10^4$ (Па·с)/(м³·К^{-1/2}) необхідно у вакуумі 10^{-3} Па проводити осадження плівок зі швидкістю $\omega \approx 1$ нм/с при температурі підкладки $T_p \approx 600$ К.

При проведенні електронно-мікроскопічних досліджень потрібно вибирати підкладки, структурний стан яких відповідає підкладкам для вивчення електричних властивостей. Оскільки електропровідність вимірювалась на аморфних скляних підкладках, то підкладка для структурних досліджень повинна також бути аморфною. Найбільш поширений матеріал у таких випадках є вуглець.

Як показують результати електроннографічних досліджень (рис. 1, а), у відпалених плівках молібдену, сконденсованих на підкладках з вуглецю, спостерігається ГЦК-фаза з параметром решітки $a = 0,415 \dots 0,418 \pm 0,001$ нм. Величина параметра решітки для ГЦК-фази добре узгоджується з даними робіт [10-12], у яких обговорювалось питання про природу аномальних фаз у плівках Мо, та відповідає значенням $a = 0,414 \dots 0,428$ нм для твердого розчину Мо-С, який спостерігався у масивних зразках [14]. Враховуючи результати [10-12, 14], можна вважати, що отримана ГЦК-фаза у відпалених плівках Мо відповідає складу MoC_x ($x \approx 1$), утворення якого відбувається, у першу чергу, у результаті взаємодії атомів молібдену із матеріалом підкладки у процесі відпалювання у вакуумній камері, або пучком електронів при електронно-мікроскопічних дослідженнях.

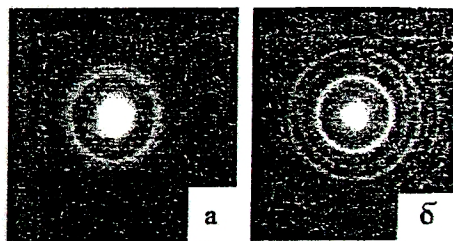


Рис. 1. Електроннографи відпалених плівок Мо товщиною $d = 35$ нм. Підкладка: а – вуглець, б –(001)NaCl

При використанні в якості підкладок монокристалів NaCl у відпалених плівках, отриманих при швидкості конденсації ~ 1 нм/с, спостерігається ОЦК – фаза, про що свідчать дані електроннографічних досліджень (рис. 1, б). Параметр решітки ОЦК-Мо складає величину $a = 0,318 \dots 0,314 \pm 0,001$ нм, який є розмірно-залежним у інтервалі товщин 30...70 нм. Якщо порівняти отримані нами дані з літературними для плівок [4] та масивних зразків [15] молібдену, то можна зробити висновки про їх узгодження, оскільки, згідно [15] $a_0 = 0,314$ нм. Для плівок параметр решітки змінюється з ростом товщини та залежить від швидкості конденсації [4]. Так, якщо товщина змінюється від 10 до 45 нм, то $a = 0,317 \dots 0,315$ нм ($\omega = 0,2$ нм/с) та $a = 0,314$ нм ($\omega = 1,8$ нм/с).

Результати для подвійно відпалених плівок молібдену, отриманих на підкладці з вуглецю (спочатку у вакуумній камері, а потім у колоні мікроскопа при проведенні досліджень), показують, що вони мають ГЦК-структуру, у той час, як зразки, сконденсовані

при тих же параметрах конденсації, але на підкладках із NaCl мають ОЦК-структуру. Вище сказане у сукупності з аналізом літературних даних дає підставу зробити висновок, що у нашому випадку утворення ГЦК- фази зумовлене взаємодією атомів Мо з матеріалом підкладки – вуглецем. Таким чином, нами досліджувались електрофізичні властивості плівок молібдену, які мають ОЦК- структуру з параметром решітки $a=0,318\dots 0,314$ нм.

Користуючись результатами мікроскопічних досліджень (див. рис.2), розраховано середній розмір зерна, який в інтервалі товщин 30...70 нм має величину 10 нм. Обмеження інтервалу товщин обумовлено неможливістю провести мікроскопічні дослідження зразків більшої товщини внаслідок значного непружного розсіювання електронів. Підготовка достатньо тонких зразків Мо методом травлення викликає ряд ускладнень технічного характеру. У зв'язку з цим для визначення залежності середнього розміру зерна у конденсатах від товщини, необхідно скористатись відомими літературними даними [1,2,5,6,16]. Їх аналіз показує, що середній розмір зерна у конденсатах Мо слабо залежить від товщини. Тому в інтервалі відносно малих товщин (менше 100 нм) можна вважати, що $L=10$ нм \approx const. Хоча при значеннях $d>250$ нм згідно рентгеноструктурного аналізу середній розмір області когерентного розсіювання становить близько 20 нм.

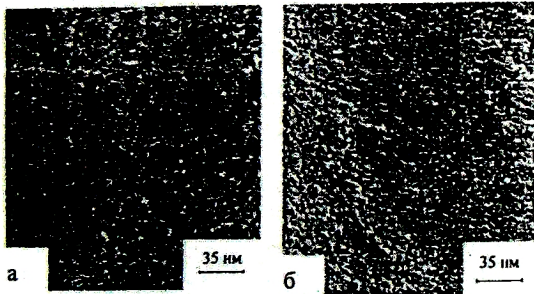


Рис. 2. Мікроструктура відпалених плівок Мо. Товщина, нм: 35 (а), 55 (б)

ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Для стабілізації електрофізичних властивостей плівок з метою їх рекристалізації свіжосконденсовані зразки підлягали відпалюванню протягом трьох циклів "нагрівання-охолодження". Під час нагріву протягом першого циклу зміна опору з температурою була немонотонною. Розглянемо характер залежності питомого опору (ρ) та ТКО (β) зразків, які пройшли термообробку. На залежностях $\rho(T)$ і $\beta(T)$ (рис.3) спостерігається особливість поблизу температури Дебая ($\theta_{DP}=470$ К [15]) та $2/3\theta_{DP}$, причому остання особливість проявляється сильніше для зразків товщиною до 100 нм. Залежність $\rho(T)$ до температури Дебая може бути спрямлена у координатах $\rho \cdot T^{2/3}$, що є характерним для плівок металів з ОЦК-структурою (див., наприклад, [17]), а при більш високих температурах є лінійною.

На думку авторів [17] залежність $\rho \cdot T^{2/3}$ у плівкових зразках пов'язана з особливостями електрон-

фононного розсіювання електронів в умовах прояву розмірних ефектів. Аналізуючи отримані результати можна відмітити, що при побудові розмірних залежностей $\rho(d)$ та $\beta(d)$ з подальшою їх обробленням для розрахунку параметрів електроперенесення потрібно виключити інтервал температур поблизу точок $2/3\theta_D$ і θ_D .

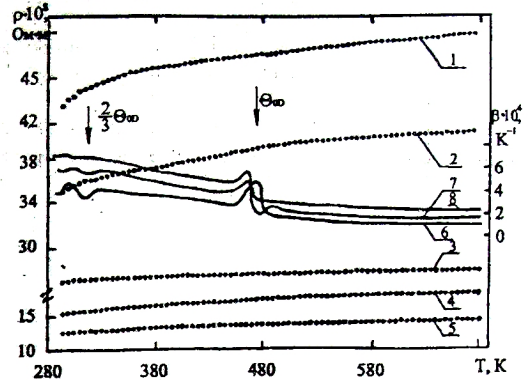


Рис. 3. Температурна залежність питомого опору (криві 1-5) та ТКО (криві 6-8) для плівок Мо. Товщина, нм: 45 (криві 1,6), 65 (2), 115 (3,7), 225 (4), 260 (5,8)

На основі експериментальних результатів для лінійної ділянки залежності $\rho(T)$ (вище температури Дебая) було визначено значення тангенса кута нахилу $tg\alpha$ та ефективного параметра електрон-фононної взаємодії $c^* = tg\alpha \cdot \theta_{DP}^3 T^2 J_3^{-1}$ (J_3 – третій інтеграл Дебая). Розрахунки показують, що у інтервалі товщин 45...545 нм величина $tg\alpha$ зменшується від $7,1 \cdot 10^{-11}$ до $1,9 \cdot 10^{-11}$ Ом·м·К⁻¹, а c^* змінюється від $2,62 \cdot 10^{-8}$ до $0,70 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($T=600$ К) та від $2,41 \cdot 10^{-8}$ до $0,64 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($T=650$ К). Тенденція до розмірної залежності $tg\alpha$ і c^* узгоджується з відомими літературними даними для плівок інших металів [17-19]. Збільшення параметра c^* із зменшенням товщини пов'язано з підсиленням високо-температурної електрон-фононної взаємодії, яка проявляється внаслідок зсуву фононного спектру із області низьких частот в область більш високих та дією макронапружень [17]. Не виключено, що на характер температурної залежності $\rho(T)$ і, як наслідок, на величину $tg\alpha$ і c^* впливає зерномежеве розсіювання, але на відміну від поверхневого, воно може проявитись і при відносно великих товщинах зразків.

РОЗМІРНІ ЕФЕКТИ

У ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЯХ

На розмірних залежностях питомого опору і ТКО у плівках Мо при температурі вимірювання 350 К (рис.5) можна виділити дві ділянки, які мають різну тенденцію зміни ρ і β . Залежність β від $1/d$ (див. рис.5, в) дає можливість визначити ту товщину $d^* \approx 190$ нм, при якій спостерігається розрив графіків $\rho(d)$ та $\beta(d)$. Ця особливість обумовлена різним середнім розміром зерна у плівках товщиною більше та менше d^* : при $d > d^*$ плівки молібдену можна розглядати як квазідвошарову структуру, товщина нижнього шару якої $d_1 = d^*$, має середній розмір зерна 10 нм, а верхній шар товщиною $d_2 = d - d^*$ має більші

крупні зерна. Така ситуація стала можливою у наслідок того, що при збільшенні товщини відбувається автокристалізація плівок у процесі осадження.

Для розрахунку параметрів електроперенесення можна застосовувати ізотропну модель ТПІ [8].

Відмітимо, що оброблення результатів експерименту в рамках лінеаризованої моделі ТПІ у даному випадку є некоректно, тому що вона придатна для моноблочних плівок по товщині. Основні співвідношення ізотропної моделі мають такий вигляд:

$$\beta^{-1} \cdot d = \beta_{\infty}^{-1} d + \frac{3}{8} \beta_0^{-1} \lambda \ln\left(\frac{1}{r}\right), \quad (1)$$

$$\beta_{\infty} \cdot \beta_0^{-1} = \left[1 + 1,45L^{-1} \lambda \ln\left(\frac{1}{r}\right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$\frac{R}{1-R} = \frac{2(1-r)}{1+r}, \quad (3)$$

де β_0, β_{∞} - ТКО масивного зразка і плівки при $d \rightarrow \infty$; r - коефіцієнт дзеркальності зовнішніх поверхонь.

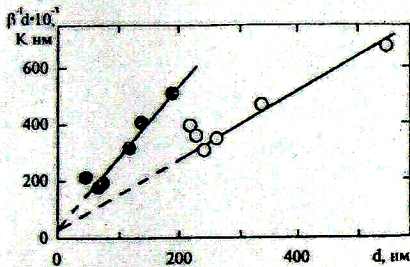


Рис.4. Залежність $\beta^{-1} \cdot d$ від d для плівок Мо

У зв'язку з тим, що на розмірній залежності ТКО спостерігаються дві ділянки, то і визначення параметрів електроперенесення проводилось для двох інтервалів товщин. При обробці експериментальних даних залежність $\beta(d)$ перебудовується у ко-

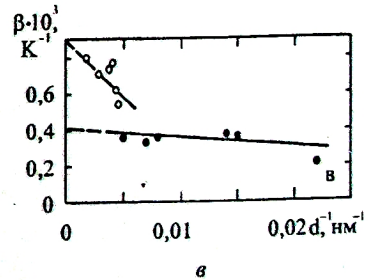
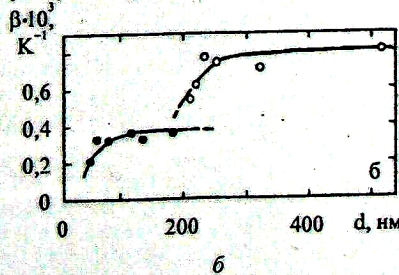
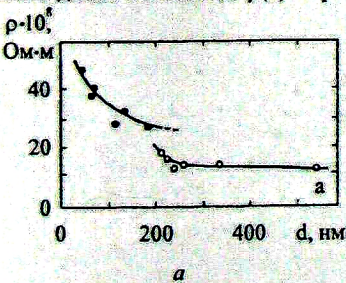


Рис.5. Залежність питомого опору (а) та ТКО (б, в) від товщини (а, б) та оберненої товщини (в) для плівок Мо

Таблиця 1

Параметри електроперенесення плівок молібдену, розраховані на основі ізотропної моделі ТПІ

d , нм	$\beta_{\infty} \cdot 10^3$, K^{-1}	λ , нм	r	r	R
$d < d^*$	0,40	12-19	0,01-0,05	0,005-0,034	0,66-0,65
$d > d^*$	0,80	28-45	0,01-0,05	0,13-0,28	0,61-0,53

Таблиця 2

Параметри електроперенесення плівок молібдену, розраховані на основі моделі УК

d , нм	$\rho_{\infty} \cdot 10^7$, Ом·см	$\lambda(1-R)$, нм	$f(\alpha)$	α	R	λ , нм
$D < d^*$	2,0	3,2	0,25	2,25	0,69	10
$D > d^*$	1,1	4,8	0,45	0,90	0,60	12

ординатах $\beta^{-1} d(d)$ (рис.4). Тангенс кута нахилу цієї залежності дає можливість визначити для кожного інтервалу товщин величину β_{∞} . Оскільки ізотропна модель не дозволяє одночасно розрахувати по відрітку, який відтинається на осі $\beta^{-1} d$ СДВП та коефіцієнт дзеркальності, нам довелося задатись значенням r в інтервалі 0,01-0,05. Про величину параметрів електроперенесення можна судити із табл.1. Аналіз наведених у табл.1 результатів показує, що збільшення розміру кристалітів у плівці призводить до збільшення СДВП і коефіцієнту проходження межі зерен, та зменшення коефіцієнта зерномежевого розсіювання.

Для розрахунку параметрів електроперенесення у плівках Мо також може бути використане співвідношення моделі УК [9] для питомої провідності (σ), яке спрощене нами із припущення, що більша доля електронів розсіюються лише боковими поверхнями зерен (перпендикулярно лініям напруженості електричного поля):

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = \frac{\rho_{\infty}}{\rho} = \frac{2}{3} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^3 \Theta}{1 + \frac{1}{K} \sin \Theta} d\Theta, \quad (4)$$

де $\sigma_{\infty} (\rho_{\infty})$ - питома провідність (опір) плівки при $d \rightarrow \infty$; $K = L(\lambda(1-R))^{-1}$ - приведена висота зерна у напрямку z (перпендикулярно до руху електронів); Θ - кут підльоту електрона до осі z .

Після інтегрування отримаємо:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\infty}} = \frac{\rho_{\infty}}{\rho} = \frac{3K}{8\sqrt{K^2-1}} \left\{ \pi - 4K + 2\pi K^2 \sqrt{K^2-1} - 8K^2 \arctg \sqrt{\frac{K-1}{K+1}} \right\}. \quad (5)$$

У граничних випадках крупнозернистих та дрібнозернистих зразків, останнє співвідношення перетворюється до вигляду:

$$\frac{\sigma}{\rho_{\infty}} = \frac{\rho_{\infty}}{\rho} = \frac{3}{8} \pi \frac{L}{\lambda(1-R)} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma}{\rho_{\infty}} = \frac{\rho_{\infty}}{\rho} = 1 - \frac{9\pi \lambda(1-R)}{32 L} \quad (7)$$

У нашому випадку можна застосувати вираз (7). Ця формула враховує розмірну залежність питомої провідності (опору), якщо середній розмір зерна є функцією товщини. Розрахунок, проведений на основі (7), буде коректним для тих інтервалів товщин на двох ділянках кривої $\rho(d)$, де питомий опір слабо змінюється з товщиною. Вираз (7) дозволив визначити величину $\lambda(1-R)$, яка складає 3,2 та 4,8 нм при $d < d^*$ та $d > d^*$ відповідно при умові, що для цих інтервалів товщини ρ_{∞} становить $2 \cdot 10^{-7}$ та $1,1 \cdot 10^{-7}$ Ом·м (ρ_{∞} визначалось шляхом перебудови залежності $\rho(d)$ у координатах $\rho(d^*)$).

При розрахунку СДВП та R було використано вираз для параметра зерномежового розсіювання, який був запропонований Майядасом-Шатцкесом [7] $\alpha = \lambda L^{-1} R(1-R)^{-1}$. Значення α розраховувалось за величиною функції $f(\alpha) = \rho_0 \rho_{\infty}^{-1}$ (ρ_0 – питомий опір масивного зразка).

Визначивши формулу для λ та прирівнявши її до результатів розрахунку на основі (7), було отримано квадратне рівняння, у якому невідомим виступає R . Розв'язок цього рівняння дав можливість знайти величину коефіцієнта розсіювання на межі зерна, і як наслідок, СДВП. Отриманий результат представлено у табл.2. Приведені у табл.1 і 2 дані говорять про їх узгодження, за виключенням значень СДВП у інтервалі $d > d^*$.

У роботі [20] було отримано точні та асимптотичні співвідношення для питомого опору (провідності) та ТКО полікристалічних плівок металів. Для дрібнозернистих металевих зразків вираз для ТКО є таким:

$$\frac{\beta}{\beta_{\infty}} = \frac{4}{5\alpha} - \frac{3\lambda(1-p)}{16d\alpha^2} \left(1 - \frac{3}{2\alpha} \right). \quad (8)$$

Обробка експериментальних результатів на основі цього співвідношення здійснювалась таким чином. Задавши величиною СДВП на ділянках $d < d^*$ $\lambda = 10$ нм та $d > d^*$ $\lambda = 12$ нм при $p = 0,01$, було спочатку визначено у кожній конкретній точці значення α , а потім розраховували величину коефіцієнта R . У результаті було отримано, що для двох ділянок середні значення коефіцієнта R складає 0,66 та 0,60. Таким чином, розрахунок параметрів електроперенесення на основі трьох теоретичних моделей показав, що вони приблизно однаково враховують зерномежеве розсіювання в плівках. З отриманих результатів звертає на себе увагу той факт, що СДВП та коефіцієнт розсіювання (проходження) на межі зерна є розмірно залежними величинами. Причому спостерігається збільшення СДВП та зменшення коефіцієнта R . Порівняння даних про параметри електроперенесення у плівках Мо та дротах ($R = 0,3$, $\lambda = 0,5$ мкм) де розрахунок проводився з використан-

ням співвідношення моделі УК, підтверджує цей висновок.

ВИСНОВКИ

Методом електронграфії, рентгенографії та просвічуючої електронної мікроскопії проведено структурні дослідження плівок Мо. Показано, що плівкові зразки, отримані на підкладці з (001)NaCl із швидкістю конденсації $\omega = 1$ нм/с ($T_{\text{пл}} = 600$ К, $P \sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па), мають ОЦК-структуру з параметром решітки $a = 0,318 \dots 0,314 \pm 0,001$ нм, який близький до параметра решітки масивних зразків Мо. Для плівок, які отримані при таких же умовах, але на вуглецевих підкладках при відпалюванні утворюється ГЦК-фаза з параметром решітки $a = 0,414 \dots 0,428 \pm 0,001$ нм, утворення якої обумовлено взаємодією атомів Мо з матеріалом підкладки.

Експериментально показано, що на температурній залежності питомого опору та ТКО у плівках Мо спостерігаються особливості при температурі $2/3 \Theta_D$ та Θ_D . При товщинах плівок менше 115 нм має місце відчутне збільшення тангенсу кута нахилу лінійної ділянки залежності $\rho(T)$ та ефективної константи електрон-фононної взаємодії, що можливо пояснюється зсувом фононного спектру із області низьких в область більш високих частот, дією макронапружень та впливом зерномежового розсіювання електронів.

На залежностях питомого опору та ТКО від товщини спостерігаються дві ділянки (при $d = 45 \dots 190$ нм та $240 \dots 545$ нм) з відмінним значенням ρ_{∞} і β_{∞} , що пов'язано із різною величиною середнього розміру зерна.

Здійснено розрахунок СДВП та коефіцієнта зерномежового розсіювання при температурі вимірювання 350 К із застосуванням співвідношення ізотропної ГТП і моделі УК та асимптотичної формули для ТКО, отриманих в рамках теорії Майядаса-Шатцкеса. Показано, що всі використані робочі вирази приблизно однаково описують внутрішній розмірний ефект. Спостерігається збільшення СДВП та зменшення коефіцієнта розсіювання межі зерна з ростом середнього розміру зерна.

Представлені результати досліджень мають неповний характер, оскільки проведені в інтервалі проміжних температур 300...700 К. Очевидно, що для більш широкого узагальнення результатів про температурні залежності електрофізичних властивостей і параметрів електроперенесення слід розширити інтервал досліджень як в область низьких, так і високих температур. Це буде предметом наших подальших досліджень.

Автори виражають подяку проф. Проценку І.Ю. за обговорення результатів цієї роботи.

ЛІТЕРАТУРА

- З.В.Стасюк, Р.В.Панчишин, Б.Л.Мельничук. Гальваномангнитные явления в тонких пленках молибдена, иттрия и скандия // ФММ. 1972, т.34, № 4, с.49-53.
- H.Oikawa. Electrical resistivity of vacuum deposited molybdenum films // J.Vac.Sci. and Technol. 1978, v.15, №3, p. 1117-1122.

3. J.Nagano. Electrical resistivity of sputtered molybdenum films // *Thin Solid Films*. 1980, v.67, №1, p. 2-8.
4. И.Е.Проценко, А.В.Яременко. Исследование структуры и электрофизических свойств тонких пленок молибдена // *Металлофизика*. 1982, т.4, №1, с.71-75.
5. Б.Л.Мельничук, А.И.Лопатинский, З.В.Стасюк. Электропроводность та терморухійна сила плівок паладію, нікелю та молибдену // *Фізичний збірник НТШ*. 1998, вип.3, с.124-132.
6. J.Vavra, S.Luby. Resistivity and structure evaporated polycrystalline molybdenum films // *Thin Solid Films*. 1980, v.69, №2, p. 169-173.
7. A.F.Mayadas, M.Shatzkes. Electrical-resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection on external surface // *Phys. Rev. B*. 1970, v.1, №4, p. 1382-1389.
8. C.R.Tellier, A.J.Tosser. Size effects in thin films. Amsterdam-Oxford-New-York: Elsevier Scientific Publ. Company, 1982.
9. Г.А.Ухлинов, З.Я.Косаковская. Электропроводность поликристаллических образцов металлов с формразмерной текстурой // *ФММ*. 1983, т.53, №1, с.61-64.
10. Ю.И.Суров, С.А.Молодежникова, В.А.Зуев и др. Влияние остаточной атмосферы на структуру вакуумных конденсатов молибдена // *ФИХОМ*. 1980, №2, с. 59-61.
11. Ю.И.Суров, С.А.Молодежникова. Структурно-фазовые превращения в вакуумно-осажденных пленках молибдена с ГЦК-структурой при отжиге // *Изв. АН СССР. Неорг. материалы*. 1990, т.6, с.1333-1334.
12. Е.И.Проценко, В.Г.Шамоля, А.В.Яременко. О возможной природе ГЦК-фаз, наблюдаемых в тонких пленках титана и молибдена // *Ультрадис-*
- персные частицы и их ансамбли*. Сб. научных трудов. Київ: "Наукова думка", 1982, с.42-46.
13. V.B.Loboda, I.E.Protsenko, A.V.Yaremenko. Scandium thin films structure and electrical resistance. (1). Study on films obtained in a vacuum of 10^{-5} up to 10^{-6} Torr // *Krystall und Technik*. 1980, v.15, №1, p.43-53.
14. А.А.Бабад-Захряпин, П.Г.Лысенко, Л.М.Герт. Получение и рентгенографическое изучение фаз с кубической решеткой в системах W-C, Mo-C // *ФММ*. 1966, т.2, №21, с.782-786.
15. *Физико-химические свойства элементов*. Справочник / Под. редак. Г.В.Самсонова. Київ: "Наукова думка", 1965.
16. С.В.Петренко, И.Е.Проценко, В.Г.Шамоля. Эффект тензочувствительности в дисперсных металлических пленках // *Металлы*. 1989, №1, с.180-186.
17. В.Б. Лобода, Ю.Ю.Проценко, М.Д.Смолин и др. Исследование размерных и температурных эффектов в тонких пленках переходных металлов // *УФЖ*. 1985, т.30, №3, с.435-440.
18. И.Е.Проценко, М.Д.Смолин, А.В.Яременко и др. Температурная зависимость удельного сопротивления тонких пленок переходных d-металлов // *УФЖ*. 1988, т.33, №6, с.875-880.
19. И.Е.Проценко, М.Д.Смолин, В.Г.Шамоля и др. Размерная и температурная зависимости электросопротивления пленок кобальта в области промежуточных температур // *УФЖ*. 1984, т.29, №6, с.920-925.
20. О.А.Білоус, Л.В.Дехтярук, С.І.Проценко, А.М.Чорноус. Розмірні ефекти в термічному коефіцієнті опору та коефіцієнті розсіювання електронів на межі зерен в тонких металевих плівках // *Вісник Сумського державного університету*. 2001, №3(24), 4(25), с.67-73.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК МОЛИБДЕНА В УСЛОВИЯХ ВНУТРЕННЕГО РАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА

О.А.Белоус, А.М.Чорноус

Сумской государственной университет, 40007, г.Сумы, ул.Римского-Корсакова, 2

Статья посвящена комплексному исследованию кристаллической структуры и электрофизических свойств (удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления) пленок молибдена. Расчет параметров электропереноса (средней длины свободного пробега носителей тока в пленке, коэффициент прохождения и рассеивания на границе зерна) проводился на основе изотропной модели Телье-Тоссе-Пишар и асимптотических соотношений модели Ухлинова-Косаковской и теории Майядаса-Шатцкеса.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF MOLYBDENUM FILMS IN CONDITIONS OF INTERNAL DIMENSION EFFECT

O.A.Bilous, A.M.Chornous

Sumy state university, 40007, Sumy, 2, Rymsky-Korsakov St.

This article is devoted to complex research of crystal structure and electrophysical properties (resistivity and temperature coefficient of resistance) molybdenum films. Calculation of electro carry parameters (mean free path of electrons in film, the transmission and reflectivity coefficient at the grain boundary) isotropic model of Tellier-Tosser-Pichard and asymptotic expression Ukhlinov-Kosacivska model and Mayadas-Shatzkes theories.