



УДК 621.793.8

**PARAMETERS OF ELECTROCARRIED IN ASPECTS OF SIZE EFFECT  
ПАРАМЕТРИ ЕЛЕКТРОПЕРЕНЕСЕННЯ В АСПЕКТАХ РОЗМІРНОГО ЕФЕКТУ****Bibyk V. V. / Бібик В.В.***s.ph.-m.s., as. prof./ к.ф.-м.н., доц.**Konotop Institute of Sumy State University, Konotop, Myru Ave., 24, 41615**Конотопський Інститут СумДУ, м. Конотоп, пр. Муру, 24, 41615***Hrychanovska T.M. / Гричановська Т.М.***s.ph.-m.s. / к.ф.-м.н., ст.вик.**Konotop Institute of Sumy State University, Konotop, Myru Ave., 24, 41615**Конотопський Інститут СумДУ, м. Конотоп, пр. Муру, 24, 41615***Hrychanovska O.A. / Гричановська О.А.***Specialist / фахівець.**AVTOR LLC., 31-33, str. Simi Brodskykh, Kyiv, 03057, Ukraine**АВТОР ТОВ, м. Київ, вул. сім'ї Бродських, 31/33, 03057*

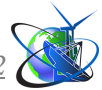
**Анотація.** В роботі, розглянуто методику визначення параметрів електроперенесення і особливості застосування теоретичних моделей. На основі даних про мікроструктуру і електрофізичні характеристики плівок Pd, Pt, Fe і Co в інтервалі товщин 10-100 нм, проведено розрахунок параметра дзеркальності, прозорості межі зерна і коефіцієнта розсіювання електронів на межі зерна. Встановлено характер розмірних залежностей середньої довжини вільного пробігу електронів і параметра  $\lambda_0(1-p)$ .

**Ключові слова:** параметри електроперенесення, середня довжина вільного пробігу електронів, розмірні ефекти.

**Вступ.**

Сучасне електронне приладобудування тісно пов'язане із пошуком нових плівкових матеріалів, які здатні забезпечити вищі і стабільніші робочі характеристики елементів [1-4]. Плівкові системи на основі феромагнітних (Fe, Co) та парамагнітних (Pd, Pt) металів є перспективними об'єктами в якості чутливих елементів багатофункціональних датчиків, завдяки унікальним магніторезистивним властивостям [3], тензочутливості [1, 2] та високій і регульованій коерцитивній силі в поєднанні з стійкістю до корозії [5].

Відомо, що при розробці і проектуванні багатофункціональних тонкоплівкових датчиків потрібно враховувати одночасний вплив на їх робочі характеристики таких зовнішніх факторів, як деформація, температура, електромагнітні поля та зважати на зовнішні і внутрішні розмірні ефекти [6]. Автори [7] вказують, що при інтерпретації результатів досліджень електричних властивостей полікристалічних плівок слід враховувати як поверхневе, так і зернограничне розсіювання електронів. При розгляді багатошарових плівок з'являється додатковий механізм розсіювання електронів на інтерфейсах, що також впливає на електричні властивості. Так, дослідження тензоефекту [6-8] свідчать про те, що експериментальні результати набагато краще узгоджуються з прогнозованими на основі класичних теоретичних моделей, з огляду на те, що деформація призводить до зміни параметрів електроперенесення. Автори [6, 7] мають на увазі залежність деформації не тільки від об'ємної довжини вільного пробігу ( $\lambda_0$ ), але і від параметра дзеркальності ( $p$ ), параметри прозорості межі



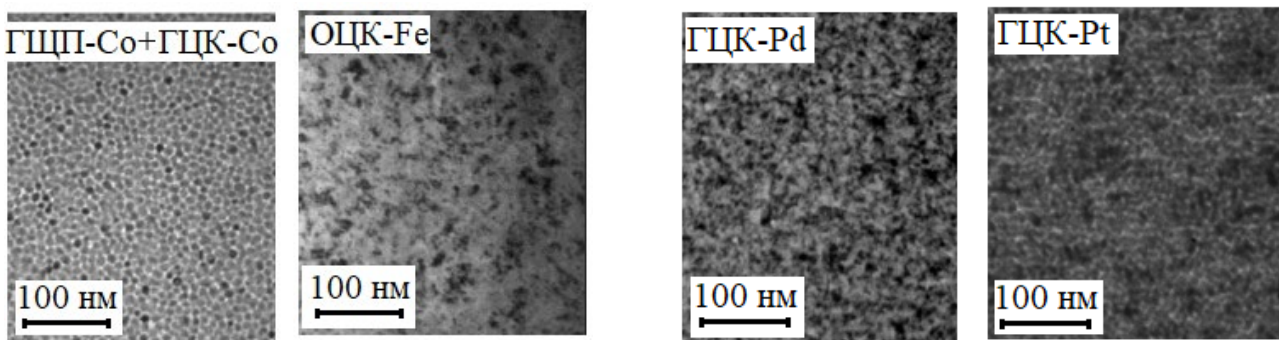
зерна ( $r$ ), коефіцієнта розсіювання електронів на межах ( $R$ ) та інші. В роботі [7] обґрунтовується, що такий підхід точніше опише фізичне процеси в багатошарових плівкових зразках, врахує зміни налаштування транспорту електронів і дозволить прогнозувати електрофізичні характеристики плівок в умовах одночасної дії деформаційних і магнітних полів.

Враховуючи наведені факти, метою роботи стало визначення параметрів електроперенесення одношарових полікристалічних плівок феромагнітних Fe і Co та парамагнітних Pd і Pt в інтервалі товщин 10-100 нм.

### Теоретичні моделі і методика розрахунків

Вибір теоретичних моделей, за допомогою яких можна здійснити розрахунок параметрів електроперенесення, суттєво залежить від структурного стану плівкових зразків. Визначальну роль при цьому відіграє співвідношення між товщиною зразка і середнім розміром кристалітів [6], Перш за все, при розрахунку параметрів електроперенесення, важливо мати інформацію і про середні розміри кристалітів ( $L$ ) отримані експериментально.

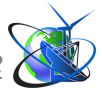
Середній розмір кристалітів у одношарових полікристалічних плівках парамагнітних Pd і Pt не перевищує величину  $L \sim 10$  нм (рисунок 1). В такому випадку структурний стан плівок можна вважати дрібнодисперсним. Відносно менш дисперсними є плівки Co і Fe ( $L < 25$  нм). Відомо, що низькотемпературною термоциклічною обробкою зразків можна штучно створити умови, за яких розмір кристалітів в такій плівці залишається приблизно однаковим у всьому інтервалі досліджуваних товщин і тим спростити розрахунки. Однак, для плівок Pd, Pt, Co і Fe характерне незначне збільшення середнього розміру кристалітів з товщиною (рисунок 2 а).



Авторська розробка

**Рисунок 1 – Мкроструктура невідпалених плівок товщиною  $d \cong 30$  нм**

Враховуючи зазначені вище властивості плівок, для розрахунку параметрів електроперенесення, було використано ряд теоретичних моделей серед яких лінеаризована модель та модель ізотропного розсіювання К. Тельє, А. Тоссе та К. Пішар (ТПП). Методика розрахунків, описана авторами [8], передбачає використання експериментальних розмірних залежностей у координатах  $\beta d$  від товщини зразка ( $d$ ), де  $\beta$ - температурний коефіцієнт опору (ТКО) плівки. Це дозволяє за кутовим коефіцієнт усередненої прямої знайти  $\beta_g \approx \beta_\infty$ , а відрізок, що відтинається на осі ординат, відповідатиме  $\beta_g \lambda_0 (1-p) H(\alpha)$  за співвідношенням:



$$\beta d \cong \beta_g d - \beta_g \lambda_0 (1-p) H(\alpha), \quad (1)$$

де  $\alpha = \lambda_0 L^{-1} R(1-R)^{-1}$  – параметр розсіювання електронів;  $H(\alpha)$  – відома і протабульована функція;  $\beta_g$  – ТКО плівки, пов'язаний із зерномежовим розсіюванням електронів;  $\beta_\infty = \lim_{d \rightarrow \infty} \beta$  і  $\beta_g \approx \beta_\infty$ .

Наприклад, для плівок Pd і Pt, зразки яких знаходяться у надзвичайно дисперсному стані,  $f(\alpha) \approx 0,6 - 0,9$ . Отже, після таких математичних операцій з'являється можливість обчислити  $\lambda_0(1-p)$ , а знаючи величину  $\alpha$ , в дифузному наближенні ( $p=0$ ) можна визначити  $\lambda_0$  і  $\lambda_g = \lambda_0 f(\alpha)$ . Однією з умов застосування розглянутої моделі є те, що в досліджуваному інтервалі товщин потрібно витримати  $L = const$ , яке в дійсності (рисунок 2 а) росте з ростом товщини зразка. Інша умова, яка звужує рамки застосування лінеаризованого співвідношення ТТП, пов'язана з тим, що розглянуту методику можна застосовувати лише за умови  $L \geq d$ . Очевидно, що, з досліджуваних в роботі зразків, останній умові задовольняють лише Fe і Co в інтервалі  $d \approx 10-20$  нм.

Перевагою моделі ізотропного розсіювання електронів на межах зерен є її придатність для  $L < d$ . Методика обробки результатів за співвідношеннями (2) аналогічна розглянутій вище.

$$\beta^{-1} d \cong \beta_g^{-1} d + \frac{3}{8} \beta_0^{-1} \lambda_0 \ln(p^{-1})$$

$$\beta_g \beta_0^{-1} \cong \left[ 1 + 1,45 L^{-1} \lambda_0 \ln(r^{-1}) \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$R(1-R)^{-1} = 2(1-r)(1+r)^{-1} \text{ або при } r > 0,3 \quad R(1-R)^{-1} = 0,97 \ln(r^{-1}),$$

В цьому випадку, для розрахунків використовується залежність  $\beta^{-1} d$  від  $d$ . Окрім того, що модель ізотропного розсіювання може бути використана для довільного співвідношення між товщиною і середнім розміром зерна, вона дозволяє розрахувати значення величин  $\beta_\infty$ ,  $\lambda_0$ ,  $p$ ,  $r$  та  $R$ , але для цього одним із перелічених параметрів необхідно задатись. Така методика дозволяє провести розрахунки, як для крупнокристалічних плівок, так і для дрібнодисперсних плівок. Слід відмітити ще раз, що моделі ТТП дають коректний результат, якщо  $L$  не залежить від  $d$ , але як свідчить рисунок 2 а, найкраще цій умові задовольняють плівки Pd і Pt, у яких порівняно незначне зростання середнього розміру кристалітів з товщиною. Отже, розрахунки дають середні, в усьому інтервалі товщин значення, наприклад  $\beta_\infty$  та середньої довжини вільного пробігу (СДВП).

Додатково для обробки експериментальних результатів у дрібнодисперсних плівках Pd і Pt застосовувалась модель ефективної СДВП основне робоче співвідношення якої має вигляд:

$$\frac{\beta}{\beta_0} \cong \left( 1 - \frac{3 \lambda_0 (1-p)}{8 d} f(\alpha) \right) f(\alpha) \quad (3)$$

Вцілому, аналіз літературних даних підтверджує висновок, зроблений ще авторами [9] про послідовність і коректність моделей ТТП при використанні їх



для обробки експериментальних даних. Однак, достатня кількість даних вказує на значні розходження результатів при визначенні СДВП. Причиною таких неоднозначних результатів можуть бути і різна концентрація дефектів у плівкових зразках, і неможливість повного відтворення експериментальних умов отримання плівок, і неспроможність самих моделей враховувати анізотропію реальних кристалів.

### Параметри електроперенесення

Результати обробки експериментальних даних розмірної залежності ТКО для плівок Pd, Pt, Co, і Fe та результати обчислень параметрів електроперенесення, в рамках розглянутих моделей (формули (1) – (3)), наведено в таблиці 1. Аналізуючи отримані результати, можна відмітити залежність коефіцієнта дзеркальності зовнішніх поверхонь від середнього розміру кристалітів плівкових зразків. Для дрібнодисперсних зразків, якими є Pt і Pd, коефіцієнт дзеркальності ( $p$ ) приймає значення менші за 0,1, що збігається з результатами отриманими автором [8,9].

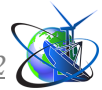
**Таблиця 1 - Параметри електроперенесення для плівок**

Плівка	$d$ , нм	$\beta_{\infty} \cdot 10^3, K^{-1}$	$\lambda_0(1-p)$ , нм, (формула)	$p$	$R$	$r$
Pd	10-100	2,53	37,1 (2)	0,04	0,40-0,42	0,15-0,12
			34,3 (3)	-	-	-
Pt	10-100	3,46	39,4 (2)	0,05	0,36-0,39	0,30-0,27
			35,6 (3)	-	-	-
Co	10-100	4,06	49,4 (2)	0,12	0,28-0,43	0,77-0,55
	10-30		37,2 (1)	-	-	-
Fe	10-100	4,25	53,3 (2)	0,16	0,24-0,47	0,65-0,51
	10-30		45,1 (1)	-	-	-

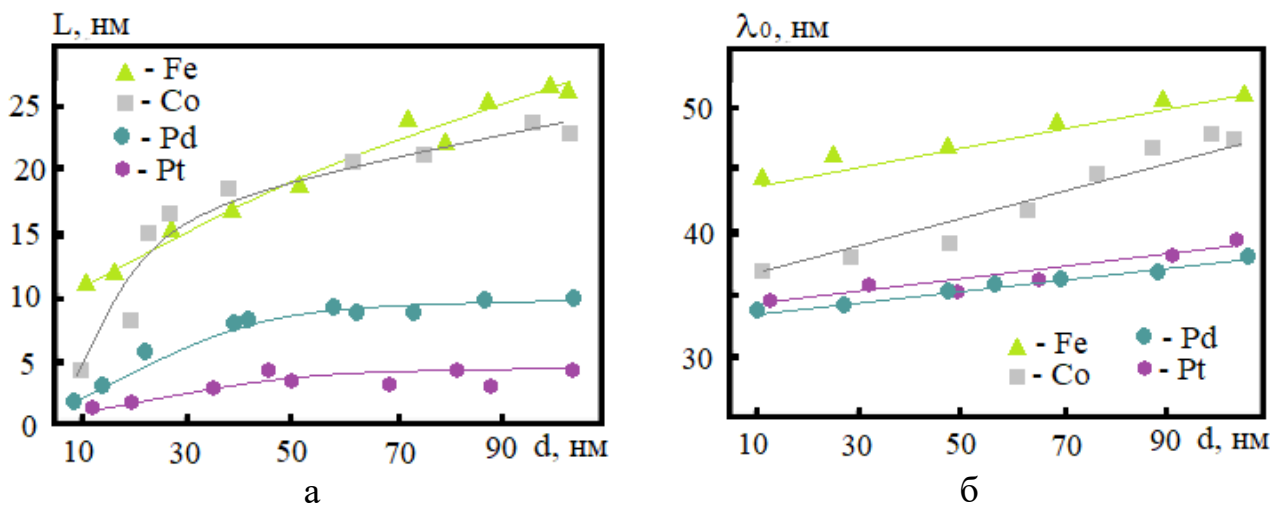
*Авторська розробка*

За даними таблиці 1 видно, що збільшення розміру зерен зразків супроводжується зростанням значення  $p$ . Такий результат знайшов своє пояснення в роботах [6, 8, 9]. На думку зазначених авторів, поверхні плівок, що складаються з граней окремих кристалів, при збільшенні  $L$  вдосконалюються і тим самим знижують імовірність дзеркального відбиття електронів. Враховуючи зазначені вище причини, зроблено припущення, що для більшості полікристалічних плівок, з  $L \geq 100$  нм, значення  $p \geq 0,1$ . Одночасно, із збільшенням середнього розміру кристалітів плівкових зразків, зменшуються коефіцієнти розсіювання електронів межами зерен ( $R$ ) і зростають коефіцієнти проходження меж зерен ( $r$ ). Якщо у зразках ступінь дисперсності збільшується то росте і питомий опір обумовлений поверхневим розсіюванням, тоді як питомий опір обумовлений зерномежовим розсіюванням падає.

Розрахунки СДВП, проведені при дослідженні металевих плівок показали, що найбільші зміни характерні для зразків з нижчим ступенем дисперсності. Так для плівок Co і Fe, в інтервалі товщин 10-100 нм, зміни СДВП становлять 30-35%. У випадку нанокристалічних плівок Pd і Pt такі зміни становлять 10-



20%. Як приклад, на рисунку 2 б наведено розрахункові залежності СДВП від товщини зразка. Характер зміни СДВП при збільшенні середнього розміру зерна узгоджується з даними робіт [7-9], які отримані з використанням різних методик. Для пояснення отриманого результату, про вплив на величину СДВП середнього розміру зерна, в роботі [9] скористались адитивністю різних механізмів розсіювання і прийшли до висновку, що при малих значеннях товщини величина СДВП визначатиметься саме розмірами плівки. Високий опір такого зразка, у першу чергу, буде спричиняти поверхневе розсіювання електронів. У полікристалічних плівках загальне значення СДВП залежить від складової, яка пов'язана з розсіюванням на межах зерен -  $\lambda_{gb}$ . При цьому, на думку автора [9],  $\lambda_{gb}$  та відповідно  $\lambda_0$  будуть збільшуватись доти, доки фононне розсіювання не стане переважати.



Авторська розробка

**Рисунок 2 - Розмірні залежності  $L$  (а) і  $\lambda_0$  (б) одношарових плівок**

Отже, ступінь дисперсності кристалітів впливає на електрофізичні властивості та параметри електроперенесення плівок. Таким чином, формуючи плівкові зразки з тим чи іншим розміром зерна можна керувати електрофізичними властивостями та враховувати їх при переході від одно- до дво- і багатошарових зразків.

### Висновки.

Було встановлено, що при розрахунку параметрів електроперенесення для полікристалічних одношарових плівок Fe, Co, Pd і Pt в інтервалі товщин від 10 до 100 нм найоптимальнішою є модель ізотропного розсіювання ТТП.

Показано, що ступінь дисперсності кристалітів впливає на параметри електроперенесення, а отже, і на електрофізичні характеристики плівкових зразків на основі Fe, Co, Pd і Pt, що можна використати для прогнозування цих характеристик в умовах дії деформаційних і магнітних полів.

### Література:

1. Magneto-strain effect in double-layer film system / Z. M. Makukha, S. I. Protsenko, L.V. Odnodvoretz [et al.] // J. Nano- Electron. Phys. – 2012. – V. 4, № 2. – P.02043-1 – 02043-3.



2. Deformation effects in the tensoresistive properties of film materials as sensitive elements of electronics / A.S Kulak, O.S. Lobodyuk, A.K Rylova, K.V. Tyschenko // Materials and Program of the Scientific and Technical Conference [Physics, electronics, electrical engineering – 2018], Sumy: SSU. – 2018. – P. 73

3. Giant Magnetoresistance: Basic Concepts, Microstructure, Magnetic Interactions and Applications / I. Ennen, D. Kappe, T. Rempel, C. Glenske, A. Hütten, Sensors, 2016. V. 16(6). 904 <https://doi.org/10.3390/s16060904>

4. K. Sato and E. Saitoh, Spintronics for Next Generation Innovative Devices (Wiley: 2015).

5. Mohapatra J, Xing M, Elkins J and Liu J P 2020 Hard and semi-hard magnetic materials based on cobalt and cobalt alloys J. Alloys Compd. 824 153874

6. Проценко С. І., Олгодворець Л. В., Чешко І. В., Пазуха І.М. Структура, дифузійні процеси і магніторезистивні та електрофізичні властивості плівкових матеріалів: Монографія / За загальною редкцією проф. І.Ю. Проценка. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 197 с.

7. The contribution to the scattering of electrons in the magnetoresistance of multilayers of nonmagnetic metals / I.Yu. Protsenko, L.V. Odnodvoret, S.I. Protsenko, M.O. Shumakova. 2016. PAST, V. 101. №1. P. 121–123.

8. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія і властивості). – Суми: СумДУ, 2002. – 187 с.

9. Protsenko I.Yu, Odnodvoret's L.V., Chornous A.M. Electroconductivity tenso-sensibility of multi-layer films // Met. Phys. Adv. Tech. – 1999. – V. 18, – P. 47–75.

**Abstract.** In the work, the method of determining the electrocarried parameters and the features of the application of theoretical models are considered. Based on data on the microstructure and electrophysical characteristics of Pd, Pt, Fe, and Co films in the thickness range of 10-100 nm, the specularity parameter, grain boundary transparency, and electron scattering coefficient at the grain boundary were calculated. The nature of the dimensional dependences of the mean electron free path length and the parameter  $\lambda_0(1-p)$  has been established.

**Key words:** electrocarried parameters, mean free path length of electrons, dimensional effects.

Стаття відправлена: 19.02.2023 р.

© Гричановська Т.М.