

Б.Л. Мельничук, Б.Р. Пенюх, З.В. Стасюк
Електропровідність та термоелектрорушійна сила тонких плівок марганцю і заліза

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, Львів, 79005*

В умовах надвисокого вакууму вивчено вплив поверхневого та зерномежового розсіювання носіїв струму на електропровідність та термоелектрорушійну силу плівок марганцю і заліза. Результати експерименту трактовано в рамках модифікованих квазікласичних модельних уявлень про перенос заряду в зразках обмежених розмірів. Вважається, що в тонкій плівці перехідного металу є дві незалежні групи носіїв струму. Поверхнєве і зерномежове розсіювання впливають на перенос заряду кожною з груп незалежно.

Ключові слова: тонкі металеві плівки, класичний і квантовий розмірний ефект, поверхнєве розсіювання носіїв струму.

Стаття поступила до редакції 25.12.2004; прийнята до друку 11.04.2005.

I. Вступ

Відомо, що кінетичні коефіцієнти тонких плівок відрізняються від аналогічних характеристик масивних монокристалічних зразків. Ця відмінність зумовлена наявністю у плівках додаткових центрів розсіювання носіїв струму. Питомий опір ρ полікристалічної плівки зумовлений сумарним впливом ізотропного фонового розсіювання фононами і точковими дефектами (ці типи розсіювання визначають питомий опір масивного матеріалу) та поверхневого і зерномежового розсіювання носіїв струму. Теорія розсіювання носіїв струму зовнішніми поверхнями плівки (теорія зовнішнього розмірного ефекту), в основному, розвинута в роботах Фукса, Зондгеймера, Юсті, Колера і Лаутца [1] і пізніше піддавалась лише незначним модифікаціям. Теорія зерномежового розсіювання (внутрішнього розмірного ефекту) вперше була створена Майадасом і Шацкесом [2] і пізніше вдосконалювалась в роботах Тельє, Тоссе, Пішара, Варкуша та інших авторів. Згадані теорії створені для плівок зоммерфельдівського металу і їх використання для пояснення властивостей плівок полівалентних та перехідних металів не завжди коректне. Тому в подальших роботах була здійснена модифікація модельних уявлень про зовнішній та внутрішній розмірні ефекти таким чином, щоби врахувати особливості електронної структури перехідних металів. Метою даної роботи було дослідження розмірних залежностей питомого опору та абсолютної диференціальної

термоелектрорушійної сили плівок заліза і марганцю та виявлення придатності існуючих теоретичних моделей для пояснення цих залежностей.

II. Методика експерименту

Дослідження проведено у відповідних надвисоковакуумних експериментальних приладах. Методика проведення досліджень у цілому подібна до описаної в наших попередніх роботах [3–5]. Особлива увага зверталася на забезпечення чистоти експерименту, зокрема, на знегаження підкладок (поліроване оплавлене скло) та випаровувачів досліджуваних металів. Тиск залишкових газів у приладі під час проведення досліджень не перевищував 10^{-7} Па.

Плівки металів наносили на охолоджені до 78 К скляні підкладки шляхом конденсації пари термічно випаровуваного металу із швидкістю 1,0–0,2 нм/хв. Товщину плівок оцінювали за зсувом резонансної частоти п'єзокарцового вібратора, поміщеного в потоці пари металу. Плівки зростаючої товщини одержували поступовим допиленням металу. Для стабілізації структури і електричних властивостей плівки відпалювали протягом однієї години при температурі 390 К. Електронно-мікроскопічне та електронографічне дослідження структури отриманих з використанням описаної методики препарування плівок дало такі результати. Плівки товщиною більшою за 8–10 нм були полікристалічними і суцільними, з кристалічною ґраткою, аналогічною до ґратки масивного металу.

Середні лінійні розміри кристалітів D у площині, паралельній підкладці, не залежали від товщини плівки ($D=7-10$ нм для плівок марганцю і $D=10-12$ нм для плівок заліза). Вимірювання термо-е.р.с. проводили у діапазоні температур 273–293 К фотокомпенсаційним нановольтамперметром Р341.

III. Результати експерименту та їх обговорення

На рис. 1 наведено залежності питомого опору ρ та абсолютної диференціальної термо-е.р.с. S плівок заліза від їх товщини d . Як видно з рисунка, питомий опір ρ проявляє типову для плівок металів розмірну залежність, в той час як величина S у межах точності експерименту (3-5%) не залежить від товщини плівки. Цей результат не можна пояснити у рамках моделі вільних електронів,

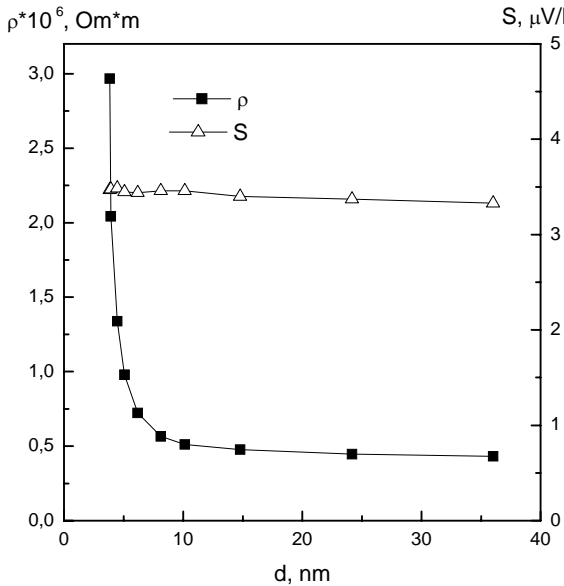


Рис. 1. Залежності питомого опору $\rho = \rho(d)$ та абсолютної диференціальної термо-е.р.с. S плівок заліза від їх товщини.

покладеної в основу теорій класичного розмірного ефекту.

Розмірні залежності ρ та S плівок марганцю, які взяті з нашої попередньої роботи [5], наведено на рис. 2. У [5] відзначалося, що теорія [1] також непридатна для достатньо коректного пояснення розмірної залежності термо-е.р.с. плівок марганцю. Зокрема, при спробі співставити залежність $S = S(d)$ з теоретичними кривими, виявилось, що енергетична залежність вільного пробігу λ носіїв струму повинна описуватись виразом типу $\lambda \sim \varepsilon^{-0.76}$, в той час як у моделі вільних електронів $\lambda \sim \varepsilon^2$ (тут ε – енергія електрона).

Таким чином, для пояснення залежностей $S = S(d)$, наведених на рис. 1 та рис. 2, доцільно використати модифіковану модель трактування

розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів плівок перехідних металів, яка використовувалась нами в [3,4]. Основні особливості даної моделі наступні [4]:

- a) в плівці перехідного металу ϵ , щонайменше дві взаємно незалежні групи носіїв струму з різними ефективними масами;
- b) поверхневе та зерномежове розсіювання незалежно впливають на перенос струму кожною з груп зокрема, а тому теорії класичного розмірного ефекту можуть бути використані для носіїв струму кожною з груп незалежно.

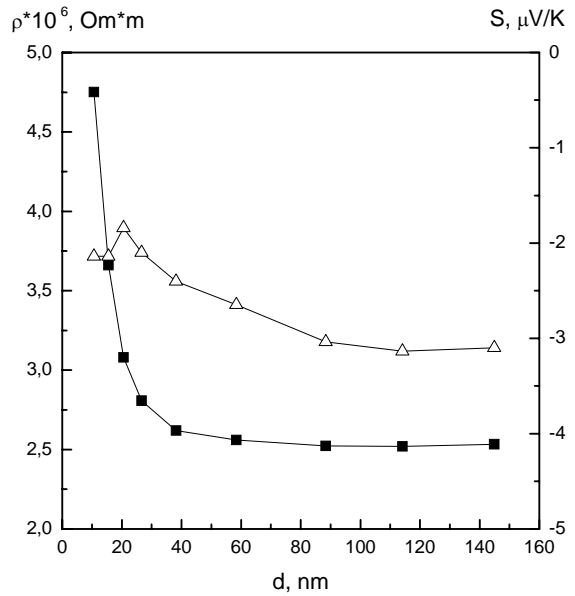


Рис. 2. Розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів плівок марганцю.

Тому для опису питомої провідності $\sigma = 1/\rho$ та термо-е.р.с. S плівки товщиною d при наявності двох груп носіїв струму (одні з них перебувають на електронних траєкторіях, а інші – на діркових) можна записати:

$$\sigma(d) = \sigma^-(d) + \sigma^+(d) \tag{1}$$

$$S(d) = - \frac{x\pi^2 k^2 T}{e\varepsilon_F} \cdot \frac{\sigma^-(d) - F\sigma^+(d)}{\sigma(d)} \tag{2}$$

де k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, ε_F – енергія Фермі металу, e – елементарний заряд, $\sigma^-(d) = 1/\rho^-(d)$ та $\sigma^+(d) = 1/\rho^+(d)$ – відповідно питома провідність (питомий опір) за рахунок електронних та діркових траєкторій, x та F – параметри зонної енергетичної структури матеріалу. Для металів з кубічною ґраткою $x=1$ та $F=1$. Вирази (1) і (2) мають форму, аналогічну до виразів, що описують масивний метал [6].

Описана вище модель переносу заряду в плівках перехідних металів використовувалась для пояснення ряду особливостей розмірних залежностей

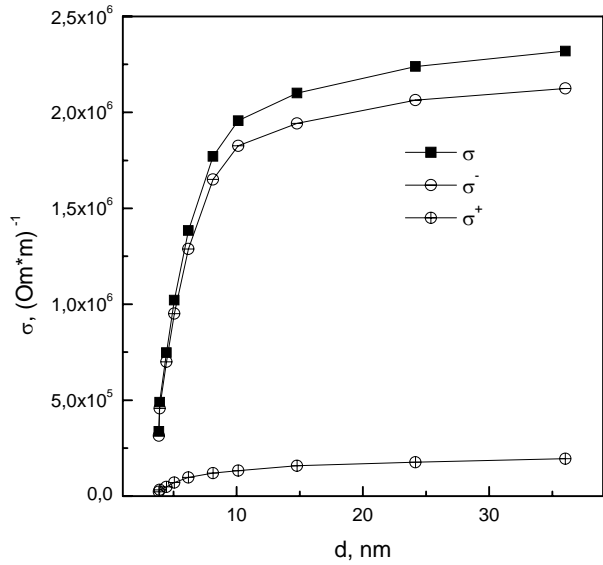


Рис. 3. Розмірні залежності питомих провідностей σ , σ^+ та σ^- плівок заліза.

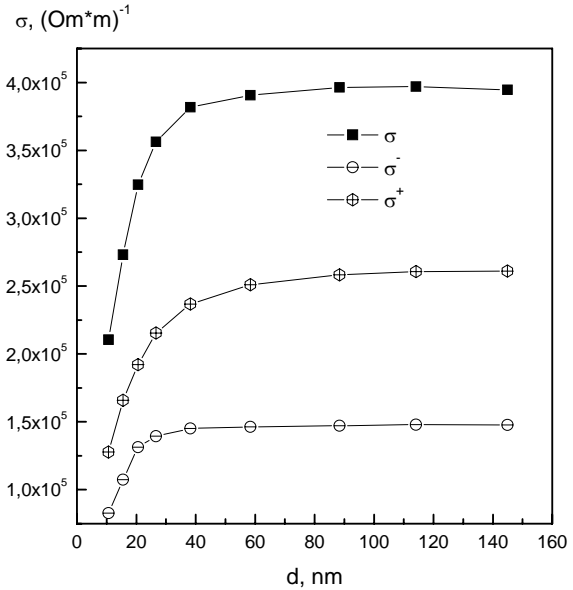


Рис. 4. Залежності питомих провідностей σ , σ^+ та σ^- плівок марганцю від товщини плівки.

абсолютною диференціальною термо-е.р.с. $S = S(d)$ плівок перехідних металів. Зокрема, це стосується пояснення причини відсутності розмірної залежності S у плівках молібдену товщиною від 10 нм до 100 нм [4]. Подібним чином було пояснено зміну знаку термо-е.р.с. плівок паладію [4] та титану [7] при зміні їх товщини.

За аналогією з поясненням відсутності розмірної залежності S плівок молібдену [4] можна пояснити подібну поведінку S плівок заліза. З виразу (2) випливає, що $S(d) = const$, якщо виконується умова:

$$[\sigma^-(d) - \sigma^+(d)] / \sigma(d) = const$$

З виразів (1) і (2) можна здійснити розрахунок розмірних залежностей парціальних провідностей $\sigma^-(d)$ та $\sigma^+(d)$, обумовлених переносом заряду різними групами носіїв струму. Результати цього розрахунку для плівок заліза наведено на рис. 3, а для плівок марганцю на рис. 4.

плівок заліза і марганцю різної товщини. Отримані експериментальні дані пояснено з допомогою модифікованої моделі явищ переносу заряду в зразках обмежених розмірів. При цьому вважалось, що в плівці наявні дві незалежні групи носіїв струму з різними ефективними масами. Показано, що дана спрощена модель придатна для опису особливостей розмірних залежностей термо-е.р.с. та для визначення параметрів переносу заряду в плівках. Розраховано розмірні залежності парціальних електропровідностей за рахунок внеску носіями струму з різними ефективними масами.

Стасюк З.В. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізичної і біомедичної електроніки;

Мельничук Б.Л. – канд. фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної фізики;

Пенюх Б.Р. – асистент кафедри фізичної і біомедичної електроніки.

IV. Висновки

У роботі досліджено електропровідність та абсолютну диференціальну термо-е.р.с. тонких

- [1] К.Л. Чопра. *Электрические явления в тонких пленках*. Мир, М. 435 с. (1972).
- [2] A.F. Mayadas, M. Shatzkes. Electrical resistivity model for polycrystalline films: the case of arbitrary reflection at external surfaces // *Phys. Rev. B*, **1**, pp. 1382-1389 (1970).
- [3] З.В. Стасюк. Кінетичні явища в плівках скандію // *УФЖ*, **37**(4), сс. 601-604 (1992).
- [4] B.L. Melnichuk, A.I. Lopatinsky, Z.V. Stasyuk. The thermoelectric power in transition metal thin films // *Phys. Stat. Sol. (a)*, **171**, pp. 495-500 (1999).
- [5] Б.Л. Мельничук, Б.Р. Пенюх, З.В. Стасюк. Електричні властивості тонких плівок марганцю // *Фізика і хімія твердого тіла*, **5**(2), сс. 318-320 (2004).
- [6] Ф. Блат. *Физика электронной проводимости в твердых телах*. Мир, М., 470 с. (1971).

- [7] А.І. Лопатинський, Б.Л. Мельничук, З.В. Стасюк. Кінетичні явища в тонких плівках металів груп скандію і титану // В зб. “Фізико-хімічні, структурні і емісійні властивості тонких плівок і поверхні твердого тіла” в.2 під ред. акад. НАН України М.Г. Находкіна. Запоріжжя, сс. 195-218 (1995).

B. Melnichuk, B. Penyukh, Z. Stasyuk

The electrical conductivity and the thermoelectric power of manganese and iron films

*'Ivan Franko' Lviv National University
50, Dragomanova Str., Lviv, 79005, Ukraine*

Under ultrahigh vacuum conditions the influence of the surface and the grain-boundary scattering on the electrical conductivity and the thermoelectric power of thin manganese and iron films were investigated. The experimental results were interpreted in the framework of modified quasiclassical theories of size-effects. It was supposed there were two independent groups of charge carries in transition metal thin film. The surface and the grain-boundary scattering had influence on charge transport of each group separately.