

На правах рукопису

МЕЛЬНИЧУК  
Борис Леонтіївич

УДК 537.311.31

РОЗМІРНІ КІНЕТИЧНІ ЯМЦА В ТОНКИХ ПЛІВКАХ  
ПЕРЕХІДНИХ d-МЕТАЛІВ

01.04.13 - фізика металів

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

ЛЬВІВ 1995

Дисертацією є рукопис.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00761205 (L) Львівського

Роботу виконано на кафедрі загальної фізики  
державного університету ім. І.Франка.

Науковий керівник: Доктор фізико-математичних наук  
Стасюк Зиновій Васильович

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук  
Панченко Олег Антонович  
Кандидат фізико-математичних наук  
Миколайчук Олексій Гордійович

Провідна організація - Прикарпатський державний університет  
ім. В.Стефаника.

Захист дисертації відбудеться "1" листопада 1995р. о 15<sup>15</sup> год.  
на засіданні спеціалізованої Ради Д 04.04.08 при Львівському  
державному університеті ім. І.Франка (290005 Львів, вул. Кирила і  
Мефодія, 8, Велика фізична аудиторія).

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці  
Львівського університету (вул.Драгоманова, 5).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірені печаткою,  
просимо надсилати за адресою: 290005, м.Львів, вул. Кирила і  
Мефодія, 8, фізичний факультет, вченому секретарю.

Автореферат розіслано "27" вересня 1995 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої Ради Д 04.04.08  
докт. фіз.-мат. наук, професор

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

Л. Блажівський

Блажівський Л.Ф.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вивчення властивостей тонких плівок має важливе практичне і наукове значення. Тонкі плівки широко використовуються в мікроелектроніці, НВЧ-техніці, оптиці, оптоелектроніці і інших галузях нової техніки. Дослідження властивостей тонких плівок дозволяє також отримати важливу інформацію, необхідну для вирішення ряду фундаментальних проблем фізики твердого тіла. Плівки можуть використовуватись при вивченні процесів утворення конденсованого стану, в дослідженнях зонної енергетичної структури твердих тіл і кінетики заряджених частинок в твердому тілі та на його поверхні, у в'ясненні механізмів взаємодії поверхні твердого тіла з оточуючим середовищем.

Однією з найважливіших проблем фізики тонких плівок є вивчення процесів релаксації носіїв струму в зразку, як наслідок їх розсіювання в об'ємі і на поверхні плівки. Релаксація носіїв струму в плівці відбувається як за рахунок чисто об'ємного розсіювання (статичні і динамічні недосконалості), так і за рахунок поверхневого і зернограничного розсіювання (звичайно тонка плівка складається з набагато менших кристалітів, ніж масивний метал і вклад цього виду розсіювання в плівках суттєвий). Змінюючи товщину плівки або розміри кристалітів, можна отримати зразки з різними відносними вкладами вище згаданих механізмів розсіювання носіїв, і, таким чином, досліджуючи залежність кінетичних коефіцієнтів плівки від її товщини (класичний розмірний ефект) вивчати процеси зернограничного та поверхневого розсіювання. Дослідженню впливу класичного розмірного ефекту на перенос заряду в плівках ряду перехідних d-металів і присвячена дана робота.

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ визначається тим, що властивості плівок перехідних d-металів на відміну від властивостей плівок

простих металів вивчені значно менше. Це зумовлено такими факторами. Всі теорії розмірних явищ в плівкових зразках побудовані з використанням моделі зоммерфельдівського металу, яка порівняно добре задовольняє електронній будові простих металів. Електронна будова перехідних металів суттєво відрізняється від цієї моделі. У переносі заряду в перехідних металах приймають участь носії струму, які мають різну ефективну масу, отже уявлення, покладені в основу відомих теорій розмірних явищ, у багатьох випадках не зовсім виправдані. Відомі з літератури дані про явища переносу в плівках перехідних металів явно недостатні через те, що в багатьох роботах не була забезпечена необхідна чистота експерименту (в першу чергу ступінь вакууму та ступінь знегаження підкладок і випарувачів), або ж досліджувалися об'єкти, відомості про структуру яких недостатні. Крім цього, практично у всіх роботах даного плану трактування експериментальних результатів проводилось без врахування реальної електронної структури металів, а висновки про характер переносу заряду в плівках робилися в абсолютній більшості випадків лише на основі вивчення електропровідності. Розмірні залежності інших кінетичних коефіцієнтів практично не вивчалися. Тому проведення комплексного дослідження розмірних залежностей різних кінетичних коефіцієнтів і сумісне трактування отриманих результатів становить значний науковий інтерес.

МЕТА РОБОТИ. У відповідності з розглянутою науковою проблемою основним напрямком дисертаційної роботи було дослідження впливу поверхневого і зернограничного розсіювання на електрофізичні властивості плівок, вивчення розмірних залежностей питомого електричного опору  $\rho$ , температурного коефіцієнту опору  $\beta$ , постійної Холла  $R$  і абсолютної диференці-

альної термоелектрорушійної сили  $S$  плівок перехідних  $d$ -металів. При цьому вирішували питання:

- а) розробка методик отримання плівок із заданою структурою і електрофізичними властивостями;
- б) дослідження розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів плівок, апробація теоретичних моделей Фукса-Зондгеймера, Майадаса-Шацкеса, Телье-Тоссе-Пішара для пояснення цих залежностей;
- в) визначення параметрів переносу заряду в плівках.

ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. В роботі експериментально досліджені електрофізичні властивості тонких плівок (товщина до 200 нм) перехідних металів титанової групи (титану, цирконію, гафнію), а також нікелю, молібдену і паладію.

Вибір матеріалів для дослідження зумовлений як широким їх практичним застосуванням в мікроелектроніці та інших галузях електроніки, так і можливістю отримання даних, необхідних для вдосконалення модельних уявлень про механізми релаксації носіїв струму в плівках перехідних металів.

НАУКОВА НОВИЗНА. В дисертаційній роботі вперше проведено систематичне дослідження розмірних явищ різних кінетичних коефіцієнтів в тонких плівках  $Ti$ ,  $Zr$ ,  $Hf$ ,  $Ni$ ,  $Mo$  і  $Pd$ , одержаних в надвисокому вакуумі при тиску залишкових газів не вищому за  $10^{-7}$  Па. Явища переносу заряду в плівках досліджували безпосередньо у вакуумному приладі без порушення вакууму, що забезпечувало достатню чистоту плівок.

Результати експерименту трактується в рамках модифікованих модельних уявлень Майадаса-Шацкеса, Телье-Тоссе-Пішара. Вважається, що висновки теорій незалежно застосовні до різних груп носіїв струму в плівках. Вперше визначено параметри, що характеризують зернограничне розсіювання носіїв, які ру-

хваються по електронних і діркових траєкторіях.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ. Розроблено методики одержання в умовах надвисокого вакууму плівок перехідних металів з відтворюваними властивостями. Запропонована оригінальна конструкція випаровувачів цирконію і гафнію, які нагріваються електронним бомбардуванням: у випаровувачі використовували графітовий тигель, покритий шаром карбиду випаровуваного металу. Одержані нові систематичні дані про розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів плівок металів. Результати експерименту можуть бути використані для виготовлення плівок із заданими значеннями постійної Холла або абсолютної диференціальної термоерс.

Практичну цінність мають також результати розрахунку параметрів електропереносу в плівках. Ці результати цікаві для перевірки сучасних модельних уявлень про перенос заряду в плівках і для їх подальшого розвитку.

#### НА ЗАХИСТ ВІНОСЯТЬСЯ:

1. Комплекс експериментальних даних, що характеризують вплив поверхневого та зернограничного розсіювання на кінетичні коефіцієнти полікристалічних плівок Ti, Zr, Hf, Mo, Ni, Pd.
2. Пояснення одержаних в роботі експериментальних розмірних залежностей питомої провідності плівок металів можна здійснити на основі модельних уявлень Фукса-Зондгеймера, Майдаса-Шацкеса та Телье-Тосе-Пішара.
3. Експериментальні розмірні залежності постійної Холла  $R$  та абсолютної диференціальної термо-е.р.с.  $S$  плівок можна пояснити з допомогою модифікованої теорії розмірних явищ, що базується на припущенні про існування в досліджених металах двох незалежних груп носіїв струму, причому вважається, що поверхнєве та зернограничне розсіювання незалежно впливають на перенос заряду кожною з груп носіїв струму.

4. Із розмірних залежностей  $\rho$  і  $R$  плівок можна передбачити хід залежності  $S(d)$ .

АПРОВАЦІЯ РОБОТИ І ПУБЛІКАЦІЇ. Основні результати роботи були викладені на таких симпозиумах, семінарах і конференціях: Республіканська нарада "Структура і гальваномагнітні явища в тонких плівках" (Львів, 1973), Міжобласній науковій конференції молодих вчених по проблемі "Фізика твердого тіла" (Львів, 1975), Всесоюзних конференціях з емісійної електроніки, на III та IV Всесоюзних симпозиумах "Властивості малих частинок та острівкових металевих плівок" (Львів, 1980, Суми, 1985), на Республіканських семінарах з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1980, 1982, 1983, 1985, 1988), на I Всесоюзній школі з термодинаміки і технології напівпровідникових кристалів і плівок (Івано-Франківськ, 1986), III Всесоюзній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1990), IV Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993), I Українській конференції "Структура і фізичні властивості неупорядкованих систем" (Львів, 1993).

Результати досліджень опубліковані в 30 статтях і тезах доповідей, з них 14 назв включені в список публікацій в авторефераті.

ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертація викладена на 136 сторінках тексту, включаючи 42 рисунки, має 10 таблиць. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і списку використаної літератури, що включає 176 назв.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ. У ВСТУПІ обгрунтована актуальність роботи, коротко охарактеризовано сучасний стан вивчення проблеми. Сформульована мета досліджень і основні положення, які виносяться на захист.

ПЕРШИЙ РОЗДІЛ - оглядовий, включає аналіз робіт, присвячених дослідженню розмірних кінетичних явищ в тонких плівках. Розглянуто різні теоретичні моделі, які пояснюють причини прояву розмірних ефектів. Проведено порівняння результатів модельних розрахунків, аналізуються позитивні сторони і недоліки моделей. Розмірні явища в полікристалічних шарах найбільш повно можуть бути описані з допомогою уявлень, покладених в основу підходу Тельє - Тосе-Пішара (Т-Т-П), який є розвитком теорії зернограничного розсіювання Майадаса-Шацкеса (М-Ш). Вважається, що додаткове зменшення часу релаксації носіїв струму в плівці (порівняно з часом релаксації в масивному металі) зумовлено як розсіюванням носіїв струму міжзеренними границями (внутрішній розмірний ефект), так і розсіюванням зовнішніми поверхнями плівки.

Наводиться аналіз результатів ряду робіт, присвячених експериментальному дослідженню розмірних явищ в плівках різних матеріалів. Зроблено висновок про те, що модель вільних електронів, покладена в основу теорії класичного розмірного ефекту, не враховує реальну електронну структуру металів і тому застосування цієї теорії для пояснення результатів експерименту в ряді випадків некоректне. Відзначено значну розбіжність експериментальних даних, отриманих для однотипних об'єктів різними авторами, що викликана неможливістю точного відтворення умов експерименту, в першу чергу вакуумних умов, методик препарування і дослідження.

В ДРУГОМУ РОЗДІЛІ викладено основні особливості методик, які використовувалися при нанесенні і дослідженні тонких плівок перехідних d-металів, наведено результати електронно-мікроскопічного і електронографічного дослідження структури плівок.

Нанесення плівок і дослідження їх електричних властивостей проводили в умовах надвисокого вакууму у відпаяних скляних приладах (тиск залишкових газів  $P \sim (1-10) \cdot 10^{-8}$  Па). Плівки наносили на поліроване скло, а також на поверхню (100) свіжосколеного монокристалу хлористого натрію (для структурних і порівняльних досліджень). Підкладка під час напилення плівок знаходилась при  $T = 78$  К. Після напилення для стабілізації властивостей плівки відпалювали при температурі близькій до 370 К. Описана методика дозволяла отримувати тонкі плівки металів з добре відтворюваними властивостями. Товщину плівок визначали за зсувом резонансної частоти п'єзокварцових вібраторів (чутливість методики по масі напиленої речовини була біля 0,1 нм). Контроль складу атмосфери залишкових газів під час приготування і дослідження плівок здійснювали з допомогою омега-тронного мас-спектрометра. Дослідження розмірних залежностей  $\rho$ ,  $\beta$ ,  $R$  і  $S$  плівок проводили безпосередньо в приладі без порушення вакууму, причому була відроблена методика дослідження всіх кінетичних коефіцієнтів на одному зразку. Досліджували плівки товщиною не більшою за 150 нм.

Проведені в роботі електронно-мікроскопічні та електроннографічні дослідження плівок показали, що при використанні описаної вище методики препарування зразків одержуються однорідні полікристалічні зразки з кристалічною ґраткою аналогічною кристалічній ґратці масивних металів. В плівках різної товщини середні лінійні розміри кристалітів в площині паралельній підкладці виявились незалежними від товщини шару  $d$  і для металів групи титану ці розміри рівні  $D \sim 12-15$  нм, а в плівках Mo, Ni і Pd  $D \sim 6-10$  нм. Таким чином, результати структурних досліджень підтверджують той факт, що в плівках досліджуваних металів товщиною більшою за 8-10 нм відсутні

нерівноважні (фазовий розмірний ефект) і домішкові кристалічні фази. Це дозволяє стверджувати, що залежності кінетичних коефіцієнтів плівок можуть трактуватися з допомогою модельних уявлень, розвинутих в теоріях М-Ш і Т-Т-П.

Результати дослідження залежності питомого електричного опору  $\rho$  і температурного коефіцієнта опору  $\beta$  плівок металів від їх товщини викладено в ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ. Типові залежності даного виду показано на рис. 1а. Експериментальні дані про розмірні залежності  $\rho(d)$  і  $\beta(d)$  трактували з допомогою модельних уявлень Фукса-Зондгеймера, Майадаса-Шацкеса і Тельє-Тосе-Пішара [3].

Співставлення результатів експерименту з наближеними виразами теорії Фукса-Зондгеймера для порівняно товстих плівок ( $d > 0,1-0,2\lambda$ ):

$$\rho = \rho_{\infty} [1 + 3\lambda(1-p)/8d] \quad (1)$$

$$\beta = \beta_{\infty} [1 - 3\lambda(1-p)/8d] \quad (2)$$

і дозволяє визначити кінетичні коефіцієнти нескінченно товстої плівки (товщина  $d \rightarrow \infty$ )  $\rho_{\infty}$ ,  $\beta_{\infty}$ , середню довжину вільного пробігу  $\lambda$  носіїв струму в цій плівці і коефіцієнт дзеркальності  $p$  відбивання носіїв струму зовнішніми поверхнями плівки.

Врахування вкладу зернограничного розсіювання в релаксацію носіїв струму можна зробити з допомогою виразів, одержаних в теоріях М-Ш і Т-Т-П. Зокрема взаємозв'язок між кінетичними коефіцієнтами безмежно товстої плівки  $\rho_{\infty}$ ,  $\beta_{\infty}$  і відповідними величинами для масивного металу  $\rho_0$ ,  $\beta_0$  можна виразити:

$$\rho_0/\rho_{\infty} = \beta_0/\beta_{\infty} = f(\alpha), \quad (3)$$

де  $f(\alpha)$  - зерногранична функція, залежна від безрозмірного параметра

$$\alpha = \lambda_0 r/D(1-r) \quad (4)$$

$$f(\alpha) = 1 - 3\alpha/2 + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln(1+\alpha^{-1}) \quad (5)$$

Тут  $\lambda_0$  - довжина вільного пробігу носіїв струму в масивному монокристалі,  $r$  - параметр зернограничного розсіювання, який

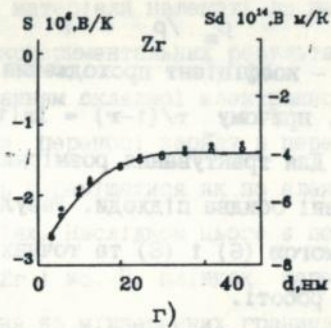
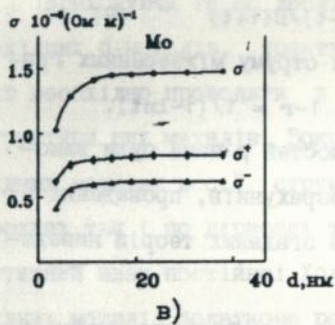
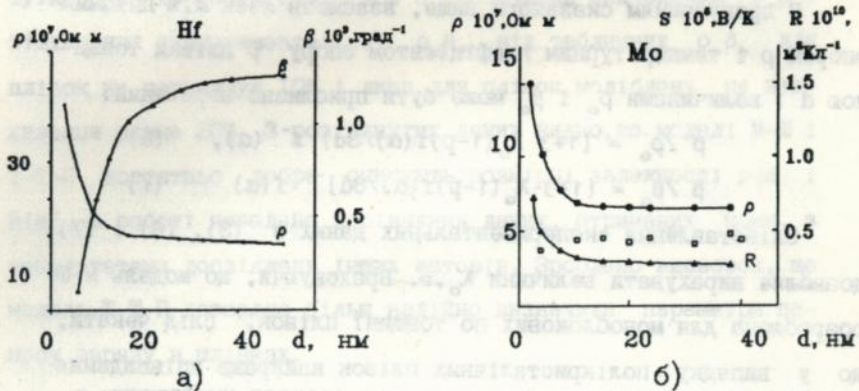


Рис. 1.

залежить від імовірності проходження носіїв струму міжзеренної границі ( $0 < r < 1$ ). З (3) випливає, що  $\lambda/\lambda_0 = f(\alpha)$ .

З врахуванням сказаного вище, взаємозв'язок між питомим опором  $\rho$  і температурним коефіцієнтом опору  $\beta$  плівки товщиною  $d$  і величинами  $\rho_0$  і  $\beta_0$  може бути приблизно виражений:

$$\rho / \rho_0 = [1 + 3 \lambda_0 (1-p) f(\alpha) / 8d] f^{-1}(\alpha), \quad (6)$$

$$\beta / \beta_0 = [1 + 3 \lambda_0 (1-p) f(\alpha) / 8d]^{-1} f(\alpha) \quad (7)$$

Співставлення експериментальних даних з (3), (6) і (7) дозволяє вирахувати величини  $\lambda_0, r$ . Враховуючи, що модель М-Ш розроблена для моноблокових по товщині плівок, слід чекати, що у випадку полікристалічних плівок найкраще співпадання теоретичних і експериментальних даних може бути при використанні моделі Т-Т-П.

В моделі Т-Т-П показано:

$$\rho_\infty / \rho_0 = 1 + 3 \lambda_0 (1-t) / D(1+t) \quad (8)$$

де  $t$  - коефіцієнт проходження носіями струму міжзеренних границь, причому  $r/(1-r) = \ln(1/t)$  або  $1-r = 1/(1-\ln t)$ .

Для трактування розмірних залежностей  $\rho$  нами були використані обидва підходи. Результати розрахунків, проведених з допомогою (6) і (8) та точних виразів згаданих теорій наведено в роботі.

Розмірні залежності температурного коефіцієнта опору  $\beta$  плівок також достатньо добре описуються з допомогою модельних уявлень М-Ш і Т-Т-П. Враховуючи, що

$$\beta_\infty / \beta_0 \approx [1 + 1,45 \lambda_0 \ln(1/t) / D]^{-1} \quad (9)$$

і, комбінуючи вирази (6), (7), (8), (9), можна отримати, що

$$\rho_0 \beta_0 = \rho_\infty \beta_\infty \approx \rho(d) \beta(d) \quad (10)$$

Таким чином, якщо достатньо добре виконується співвідношення (10), слід чекати, що і розмірні залежності  $\beta(d)$  також будуть задовільняти відповідним значенням параметрів перено-

су заряду. В роботі детально проаналізовано добутки  $\rho_0\beta_0$ ,  $\rho_\infty\beta_\infty$ ,  $\rho\beta$  плівок всіх досліджуваних металів. Показано, що добутки  $\rho_\infty\beta_\infty$  добре узгоджуються з табличними значеннями  $\rho_0\beta_0$ : відхилення експериментальних  $\rho_\infty\beta_\infty$  від табличних  $\rho_0\beta_0$  для плівок не перевищує 10% і лише для плівок молібдену це відхилення рівне 20%. З розглянутих даних видно, що моделі М-Ш і Т-Т-П достатньо добре описують розмірні залежності  $\rho(d)$  і  $\beta(d)$ . В роботі наведено порівняння даних, отриманих нами, з результатами досліджень інших авторів. Зроблено висновок, що модель Т-Т-П дозволяє більш надійно визначити параметри переносу заряду в плівках.

В ЧЕТВЕРТОМУ РОЗДІЛІ розглянуті результати дослідження залежностей постійної Холла  $R$  і абсолютної диференціальної термоелектрорушійної сили  $S$  плівок від їх товщини  $d$ .

Враховуючи те, що досліджувані матеріали належать до перехідних  $d$ -металів, трактування експериментальних результатів необхідно проводити з врахуванням складної електронної структури цих металів. Зокрема, при переносі заряду в перехідних металах носії струму можуть переміщатися як по електронних, так і по діркових траєкторіях. Наслідком цього є позитивний знак постійної Холла  $Ti$ ,  $Zr$  і  $Mo$ . В плівках перехідних металів додаткове розсіювання на міжзеренних границях і зовнішніх поверхнях плівки більш складно впливає на  $R$  і  $S$ , ніж в плівках простих металів. Якщо врахувати, що в переносі заряду приймають участь носії струму з різними ефективними масами ( електронні та діркові траєкторії), то  $\sigma = I/\rho$ ,  $R$  і  $S$  зразка перехідного металу можна записати:

$$\sigma = I/\rho = \sigma^+ + \sigma^- = I/\rho^+ + I/\rho^- \quad (11)$$

$$R = -1/Ne [(\sigma^-/n^- - \sigma^+/n^+)/\sigma^2] \quad (12)$$

$$S = -X (\pi^2 k^2 T / e \epsilon_F) [(\sigma^- - F\sigma^+)/\sigma] \quad (13)$$

де  $\sigma^- = I/\rho^-$ ;  $\sigma^+ = I/\rho^+$  - питомі електропровідності зразка за рахунок переносу заряду по електронних і діркових траєкторіях,  $N$  - концентрація атомів речовини,  $n^+$  і  $n^-$  - кількість електронних і діркових траєкторій на атом,  $X$ ,  $F$  - параметри, що враховують особливості зонної структури матеріалу,  $e$  - елементарний заряд,  $\epsilon_F$  - енергія Фермі металу,  $k$  - постійна Больцмана,  $T$  - абсолютна температура.

Розрахунок, виконаний за допомогою (11) і (12), дозволив з експериментальних розмірних залежностей  $\rho(d)$  і  $R(d)$  плівок Ti, Zr, Hf, Mo вирахувати відповідні залежності  $\rho^+(d)$  і  $\rho^-(d)$ . Ефект Холла в плівках Ni і Pd в даній роботі не досліджувався, бо з літератури відомі результати досліджень плівок цих металів, виконані із застосуванням ідентичної методики.

Подальше трактування одержаних даних зводилось до припущення, що розмірний ефект незалежно впливає на  $\sigma^+$  і  $\sigma^-$ . Використовуючи висновки теорій М-Ш і Т-Т-П до кожної складової електропровідності, було обчислено параметри переносу заряду по електронних і діркових траєкторіях. Для ілюстрації сказаного на рис. 1б, в показано розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів плівок молібдену та відповідні залежності  $\sigma^-(d)$  і  $\sigma^+(d)$ . Аналіз одержаних результатів показує, що в плівках досліджуваних металів зернограничне розсіювання суттєво впливає на перенос заряду по діркових траєкторіях, в той час, як для електронних траєкторій коефіцієнт зернограничного розсіювання порівняно невеликий. Особливо помітно це проявляється в плівках молібдену, в яких при значній довжині вільного пробігу по діркових траєкторіях ( $\lambda_0^+ = 140$  нм) вклад переносу заряду по діркових траєкторіях суттєво менший, ніж в масивному металі. В плівках гафнію вільний пробіг носіїв струму практично обмежений розмірами зерна. Аналогічна ситу-

ація спостерігалась і в плівках нікелю: в [ 4 ] взагалі не спостерігали розмірної залежності  $\sigma^+$ .

Особливістю розмірних залежностей  $S(d)$  плівок Ti і Pd є зміна знаку  $S$  при  $d=145$  нм для Ti і при  $d=5$  нм для Pd. Зміна знаку  $S$  в плівках Ti і Pd також є наслідком різних розмірних залежностей  $\sigma^+(d)$  і  $\sigma^-(d)$ .

Підстановка результатів обчислення  $\sigma^+$  і  $\sigma^-$  при різних товщинах плівки дозволяє перевірити правомірність застосування виразу (13) для опису  $S(d)$  плівок досліджуваних матеріалів, а також обчислити їх енергію Фермі. Зокрема, в плівках Mo не виявлена розмірна залежність  $S(d)$ : в діапазоні товщин 6 нм  $<d < 50$  нм термо-е.р.с. приблизно постійна і дорівнює  $S=0,42 \cdot 10^{-6}$  В/К. Цей результат стає зрозумілим, якщо обчислити співвідношення  $(\sigma^+ - \sigma^-)/\sigma$ , яке також приблизно постійне у вказаному діапазоні товщин. Підстановка  $S$  і  $(\sigma^+ - \sigma^-)/\sigma$  в (13) дозволила вирахувати  $\epsilon_F = 6,5$  еВ, що добре узгоджується з результатами визначення енергії Фермі молибдену. Для Zr одержано  $\epsilon_F = 5,2$  еВ.

Про правомірність використаного підходу свідчить наступне. З виразів (11-13) випливає, що з результатів дослідження  $\rho$  і  $R$  плівок можна передбачити хід розмірної залежності  $S$ . Подібний розрахунок проведено для плівок Zr (рис.1г), на якому показані розмірні залежності  $S(d)$  та  $(\sigma^+ - \sigma^-)/\sigma$  (\*). Результати дослідження термо-е.р.с. плівок Ni і Pd добре узгоджуються з даними, одержаними в роботах Панченка О.А. [4,5] при дослідженні ефекту Холла в плівках цих металів.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

I. Розроблені надвисоковакуумні методики одержання і дослідження електричних властивостей плівок перехідних d-металів. Використана методика нанесення і відпалу плівок

дозволяє отримувати однорідні полікристалічні шари металу з незалежними від товщини плівок середніми лінійними розмірами зерна.

2. Проведена апробація модельних уявлень Фукса-Зондгеймера, Майадаса-Шацкеса і Телье-Тосе-Пішара для пояснення розмірних залежностей  $\rho(d)$  і  $\beta(d)$ . Показано, що найбільш надійні дані для параметрів переносу заряду одержуються при застосуванні виразів теорії Т-Т-П. Обчислено параметри переносу заряду в плівках.
3. Для пояснення розмірних залежностей  $R$  і  $S$  використано припущення про незалежний вплив розмірного ефекту на перенос заряду по електронних і діркових траєкторіях. Використовуючи дане припущення, обчислено параметри переносу заряду по електронних і діркових траєкторіях.
4. Аналіз процесів переносу заряду по електронних і діркових траєкторіях показав, що коефіцієнт зернограничного розсіювання для діркових траєкторій для плівок всіх досліджених металів перевищує відповідний коефіцієнт для електронних траєкторій, тому відносний вклад діркових траєкторій в сумарний перенос заряду в плівках нижчий, ніж в масивному металі.
5. Результати дослідження розмірних залежностей  $\sigma^+(d)$  і  $\sigma^-(d)$  дозволяють прогнозувати хід розмірної залежності  $S(d)$ .
6. Сумісне експериментальне вивчення  $\sigma(d)$ ,  $R(d)$  і  $S(d)$  дозволяє вирахувати енергію Фермі перехідного металу. За результатами досліджень, виконаних в даній роботі, обчислено енергію Фермі молібдену ( $\epsilon_F = 6,5$  еВ), цирконію ( $\epsilon_F = 5,2$  еВ), і нікелю ( $\epsilon_F = 2,58$  еВ).

Основні результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Мельничук Б.Л., Панчишин Р.С., Стасюк З.В. Гальваномагнитне явлення в тонких плівках молибдена, иттрія и скандія. ФММ, 34, вып. I, с. 48-53, 1972.
2. Стасюк З.В., Бигун М.М., Мельничук Б.Л., Панчишин Р.С. Електронні явлення в тонких плівках деяких перехідних металлів. Известия АН СССР, сер. физ., т. 38, с. 370-373, 1974.
3. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Кинетическіе явлення в тонких плівках титана. ФММ, 1978, т. 46, вып. 6, с. III5-III7.
4. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Явлення переноса заряду в плівках цирконія. Изв. высш. уч. завед. Физика, 1991, N12, с. 94-97.
5. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Зернограничне розсіяння носителей тока в тонких плівках металлів групи титана // ФММ - 1992, т. 62, в. 3, с. 53.
6. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Ефект Холла в плівках гафнія // Металлофизика, 1992, т. 14, N 3, с. 97.
7. Дума И.М., Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Електропровідність и термо.эдс плінок нікеля и палладія // Изв. высш. уч. завед. Физика, 1992, N 12, с. 33.
8. Дума И.М., Лях К.И., Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Електропровідність тонких плінок ванадія и нікеля // Металлофизика, 1993, т. 15, в. 1, с. 60.
9. Козак М.М., Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Електропровідність цирконія и гафнія. Физическая электроника. Республ. межвед. научно-техн. сборник, Львов, 1986, вып. 33, с. 47-50.
10. Козак М.М., Мельничук Б.Л., Петренко С.В., Проценко И.Е., Стасюк З.В. Електропровідність плінок хрому, цирконія и гафнія. Физическая электроника, 1990, в. 41, с. 100-103.

11. Мельничук Б.Л. Розмірні явища в плівках металів групи титану. Вісник Львівського університету, сер.фізична, 1973, вип.8, с. 75-77.
12. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Електропровідність та оптичне пропускання плівок паладію. Вісник Львівського ун-ту, серія фізична, вип. 23, 1990, с. 97-100.
13. Лопатинський А.І., Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. Кінетичні явища в тонких плівках металів груп скандію та 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, 1995, С.195
14. Мельничук Б.Л.Размерный эффект в пленках никеля и палладия. В кн."Материалы докладов межобластной научной конференции молодых ученых по проблеме "Физика твердого тела", Львов, 1975, с. 123-126.
15. Пастырский Я.А., Стасюк З.В., Каменецкий Р.Р., Кинах С.П., Мушинский З.С., Козак М.М., Мельничук Б.Л. Реттерно-ионный насос орбитронного типа. А.с. СССР, 1987, N 1387785.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Sondheimer E.H.// Adv.Phys.- 1952, v.1, P. 1.
2. Mayadas A.F. and Shatzkes M.// Phys.Rev.B.- 1970.- v.1, N 4.- P. 1382.
3. Tosser A.J., Tellier C.R., Pichard C.R.// Journ.Mat.Sci. 1981.- v.16, N 5, P. 944.
4. Панченко О.А.// УФЖ.- 1966.- т. II, N 10, С. 1147.
5. Панченко О.А., Луцишин П.П., Птушинский Ю.Г.// ЖЭТФ.- 1969.- т. 66, в. I.- С.. 134.

There are 14 scientific papers and 1 certificate of the authorship represented concerning thin film physics. The influence of the surface and the grain boundary scattering on charge transport in transition metal thin films have been investigated. The experimental results were treated in the framework of modified Mayadas-Shatzkes and Tellier-Tosser-Pichard theoretical models.

К защите представлены результаты исследований, изложенных в 14 научных статьях и одном авторском свидетельстве по физике тонких пленок. Изучено влияние поверхностного и зернограничного рассеяния носителей тока на перенос заряда в тонких пленках переходных металлов. Результаты эксперимента объяснены с помощью модифицированных теоретических моделей Майадаса-Шацкеса и Телье-Тоссе-Пижара.

Ключові слова: тонкі плівки, провідні метали, розмірні кінетичні явища, поверхнєве та зернограничне розсіювання носіїв.

*Б. Мельчур*

443436



AB 33.087