

На правах рукопису

СТАСЮК  
Зиновій Васильович

ЕЛЕКТРОННІ ЯВИЩА ПЕРЕНОСУ  
В ТОНКИХ ПЛІВКАХ  
ПЕРЕХІДНИХ d-МЕТАЛІВ

01.04.04 — фізична електроніка

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

АВ 30.843

Роботу виконано у Львівському державному університеті

імені Івана Франка. Дисертація є рукописом.

Офіційні опоненти: Доктор фізико-математичних наук,  
професор Гладких Микола Тимофійович

Член-кореспондент НАН України, доктор  
фізико-математичних наук, професор  
Литовченко Володимир Григорович

Доктор фізико-математичних наук  
Панченко Олег Антонович

Провідна організація: Київський університет  
імені Тараса Шевченка

Захист дисертації відбудеться "27" жовтня 1994 року  
о 15 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 016.04.01 при  
Інституті фізики АН України за адресою: 252650, МСП, м.Київ-22,  
проспект науки, 46.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, скріплені печаткою  
установи, просимо надсилати за адресою: 252650, МСП, м. Київ-22,  
проспект науки, 46, Інститут фізики АН України. Вченому секретарю  
спеціалізованої ради Д 016.04.01 Іщуку В.А.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту фізики  
АН України.

Автореферат розісланий 26 вересня 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради  
кандидат фізико-математичних наук



В.А. Ішук

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00777645 (-)

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. Значна увага до вивчення фізичних явищ в тонких плівках зумовлена як широкими перспективами практичного використання плівок в мікроелектроніці, техніці надвисоких частот, оптоелектроніці та інших галузях нової техніки, так і можливістю одержання важливої інформації, необхідної для вирішення окремих фундаментальних проблем фізики твердого тіла та фізики поверхні. Внаслідок того, що властивості плівок в значній мірі визначаються процесами на їх поверхні, тонкі плівки виявились зручними об'єктами для експериментального дослідження механізмів утворення конденсованого стану речовини, у вивченні зонної енергетичної структури твердих тіл та їх поверхні, механізмів переносу заряду в приповерхневих ділянках твердого тіла, у в'ясненні природи адсорційного зв'язку та розв'язанні інших питань.

Серед згаданих проблем важливе значення має дослідження процесів взаємодії носіїв струму з поверхнею твердого тіла. В тонкій полікристалічній плівці поряд із об'ємним розсіюванням носіїв, яке існує і в масивному монокристалі, суттєву роль відіграють процеси розсіювання носіїв струму зовнішніми поверхнями плівки та контактними границями між окремими кристалітами. В даній ситуації, змінюючи розміри кристалітів та товщину плівки, можна впливати на співвідношення між внесками різних механізмів розсіювання носіїв струму в плівці, і таким чином керовано змінювати час релаксації носіїв струму та кінетичні коефіцієнти плівки. Вивченню явищ переносу заряду, залежних від геометричних розмірів зразка (класичний розмірний ефект) та розмірів кристалітів (внутрішній розмірний ефект), присвячена значна кількість теоретичних та експериментальних

робіт, однак на момент постановки завдання даних досліджень існувало декілька принципових проблем, вирішення яких було необхідне для створення цілісної картини розмірних кінетичних ефектів в тонких металевих плівках.

В експериментальному плані такими проблемами були:

1. Тракткування результатів значної кількості робіт неоднозначне внаслідок значного забруднення плівок домішками (експеримент в цих роботах проведено в поганих вакуумних умовах при тиску залишкових газів у вакуумному приладі  $10^{-2}$  -  $10^{-4}$  Па). Більшість відомих з літератури експериментальних досліджень, виконаних в умовах надвисокого вакууму, присвячено вивченню плівок простих та благородних металів. Тому важливо доповнити сукупність цих даних результатами систематичних досліджень плівок перехідних металів.

2. Для дальшого вдосконалення модельних уявлень про розмірні кінетичні явища необхідні дані про вплив поверхневого та зернограничного розсіювання на постійну Холла R та термоелектрорушійну силу плівок S. З літератури відомо лише про окремі дослідження цього плану, що обумовлено технічною складністю проведення подібних досліджень в умовах високого та надвисокого вакууму.

Вимагали удосконалення модельні уявлення про класичний розмірний ефект:

3. Існуючі теорії розмірних ефектів, побудовані на базі моделі металу Зоммерфельда, непридатні для опису розмірних гальваноманітних та термоелектричних ефектів в плівках полівалентних та перехідних металів. Зокрема, в рамках існуючих теоретичних підходів важко пояснити існування позитивної постійної Холла плівок ряду металів та зміну знаку цієї сталої при зміні товщини плівки. Подібні труднощі виникають і при



поясненні розмірних залежностей термоелектрорушійної сили.

2. Теорії зернограничного розсіювання носіїв струму в плівках використовують умови поверхневого розсіювання Фукса-Зондгеймера, трактуючи при цьому зовнішні поверхні плівки у вигляді паралельних однорідних розсіюючих площин. Будова реальної полікристалічної плівки відрізняється від моделі плоскопаралельного шару.

Виходячи із сказаного і була сформульована мета роботи, яка полягає в наступному. В умовах надвисокого вакууму провести систематичне експериментальне дослідження розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів (питомого опору  $\rho$  або питомої провідності  $\sigma = 1/\rho$ , температурного коефіцієнта опору  $\beta$ , постійної Холла  $R$ , абсолютної диференціальної термо-е.р.с.  $S$ ) плівок перехідних d-металів і використати одержані експериментальні дані для дальшого уточнення та розвитку модельних уявлень і теорій розмірного ефекту в тонких плівках.

ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ. Експериментальна частина роботи присвячена дослідженню розмірних кінетичних явищ в полікристалічних плівках d-металів: ітрію, скандію, титану, цирконію, гафнію, ванадію, молибдену, ренію, нікелю та паладію. Для вивчення механізмів впливу поверхневих домішок на явища переносу в плівках досліджено вплив адсорбції електропозитивних атомів барію, цезію, атомів міді, дипольних молекул барію та хлористого цезію і молекул кисню на електропровідність і роботу виходу плівок окремих металів. При поясненні і узагальненні одержаних даних використано результати досліджень, виконаних з допомогою аналогічних методик іншими дослідниками.

НАУКОВА НОВИЗНА результатів роботи полягає в наступному:

1. Вперше проведено систематичне дослідження впливу розмірних ефектів на різні кінетичні явища в тонких плівках де-

сяти перехідних металів, одержаних в надвисокому вакуумі при тиску залишкових газів нижчому за  $10^{-7}$  Па. Явища переносу заряду в плівках досліджували безпосередньо у вакуумному приладі, без порушення вакууму, що забезпечувало достатню чистоту плівок.

2. Проведено систематичне вивчення впливу адсорбованих поверхневих домішок на явища переносу в плівках, обговорено механізми зміни кінетичних коефіцієнтів при адсорбції різних речовин, встановлено існування взаємозв'язку між змінами кінетичних коефіцієнтів при адсорбції з відповідними енергетичними характеристиками адсорбційного зв'язку при адсорбції на поверхні плівок електропозитивних атомів.

3. Запропоновано нове модельне тлумачення розмірного ефекту кінетичних коефіцієнтів плівок, що базується на припущенні адитивності процесів об'ємного, поверхневого та зернограничного розсіювання носіїв струму в суцільних металевих плівках неоднорідної товщини, обумовленої гранулярною будовою полікристалічної плівки.

4. Обґрунтовано модель переносу заряду в полікристалічній плівці полівалентного металу, яка базується на припущенні, що релаксація носіїв струму різних груп відбувається незалежно для кожної з груп.

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ дисертаційної роботи полягає перш за все в отриманні систематичних експериментальних даних про розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів полікристалічних плівок десяти перехідних d-металів. В процесі виконання експериментальної частини роботи розроблено методики приготування в умовах надвисокого вакууму полікристалічних плівок металів із заданою структурою (лінійні розміри D зерна незалежно від товщини плівок 8-15 нм) та відтворюваними фізич-

ними (кінетичні коефіцієнти) властивостями. Розроблено оригінальні методики дослідження кінетичних коефіцієнтів плівок в умовах надвисокого вакууму. Результати експериментальних досліджень можуть бути використані для виготовлення плівок з заданими значеннями  $\rho$ ,  $R$  чи  $S$ , а також для керування величинами кінетичних коефіцієнтів з допомогою нанесення адсорбційних покриттів.

Одержані експериментальні результати використано для удосконалення модельних уявлень про перенос заряду в плівках виробленню нових підходів до пояснення розмірних кінетичних явищ в плівках перехідних металів. Результати модельних розрахунків використано для кількісного пояснення експериментальних даних, одержаних нами, та в експериментах інших дослідників.

В процесі виконання досліджень розроблено і використано малорабаритний іонно-сорбційний насос орбітронного типу, придатний також для використання в електронно-променевих приладах заводського виробництва, розроблено і використано модифікацію омегатронного мас-спектрометра для кількісного аналізу складу газів у високовакуумних системах. Згадані системи використано при проведенні науково-дослідних робіт на замовлення ряду підприємств електронної промисловості.

На захист виносяться наступні НАУКОВІ ТВЕРДЖЕННЯ:

1. Перенос заряду в полікристалічних плівках металів можна пояснити з допомогою запропонованої в роботі моделі полікристалічного шару неоднорідної товщини, яка базується на припущенні про адитивність впливу об'ємного, поверхневого та зернограничного розсіювання на релаксацію носіїв струму в плівці з макроскопічними неоднорідностями товщини.

2. Пояснення розмірних кінетичних явищ в плівках пере-

хідних d-металів та кількісна оцінка спостережуваних ефектів можлива при врахуванні внесків різних груп носіїв струму в сумарний перенос заряду і припущенні, що об'ємне, поверхнeve та зернограничне розсіювання незалежно впливають на релаксацію носіїв кожної з груп і, таким чином, на їх внесок в сумарний перенос заряду в плівці.

3. В результаті експериментального дослідження розмірних залежностей питомого опору  $\rho$ , постійної Холла  $R$  та диференціальної термоелектрорушійної сили  $S$  плівок перехідних d-металів показано, що зернограничне розсіювання більш суттєво впливає на перенос заряду по діркових траєкторіях, ніж на перенос заряду по електронних траєкторіях.

4. На основі аналізу результатів експериментального дослідження впливу адсорбції на електропровідність та роботу виходу плівок різних перехідних d-металів в роботі показано, що уявлення про механізми впливу адсорбованих атомів і молекул на властивості плівок, які вперше запропоновані Птушинським Ю.Г. і Панченком О.А., мають загальний характер і можуть бути сформульовані так:

а) Основними механізмами зміни опору плівок при адсорбції атомів металів є зміна умов поверхневого розсіювання носіїв, адсорбованими домішковими атомами (при малих ступенях покриття  $\theta \ll 1$ ), та зміна ефективної товщини плівки внаслідок металізації шару адатомів ( $\theta < 1$  та  $\theta > 1$ ).

б) Переважаючим механізмом зміни опору плівок перехідних d-металів при адсорбції дипольних молекул окису барію та хлористого цезію є зміна умов поверхневого розсіювання носіїв струму.

в) Збільшення опору плівок перехідних d-металів при адсорбції кисню в початковій фазі адсорбції обумовлена зміною

ефективної товщини плівки за рахунок утворення поверхневого ковалентного зв'язку. Найбільш імовірним механізмом зміни опору плівок при тривалій взаємодії плівки з киснем при низьких температурах ( $T < 370 \text{ K}$ ) є зміна умов міжзеренного тунелювання носіїв струму.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК автора дисертації полягає у формулюванні завдань досліджень, в розробці експериментальних методик та безпосередній участі в проведенні всіх експериментальних і теоретичних досліджень, в написанні статей.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ ТА ПУБЛІКАЦІЇ. Основні результати роботи доповідались на таких семінарах, симпозіумах та конференціях: на XII, XV Всесоюзних конференціях з емісійної електроніки (м. Москва, 1968 р., м. Київ, 1973 р.), на I, III і IV Всесоюзних симпозіумах "Властивості малих частинок та острівкових металевих плівок" (м. Київ, 1971 р., м. Львів, 1980 р., м. Суми, 1985 р.), Республіканській нараді "Структура і гальваноманітні явища в тонких плівках" (м. Львів, 1973 р.), IV Всесоюзній нараді з проблеми ренію (м. Москва, 1973 р.), Республіканській конференції "Структура і фізичні властивості тонких плівок" (м. Ужгород, 1977 р.), Всесоюзному симпозіумі з нерозжарюваних катодів (м. Томськ, 1980 р.), II, IV, V, VII, VIII Республіканських семінарах з фізики і технології тонких плівок (м. Івано-Франківськ, 1980, 1982, 1983, 1985, 1988 р.р.), I Всесоюзній школі з термодинаміки і технології кристалів і тонких плівок (м. Івано-Франківськ, 1986 р.), I і III Всесоюзних конференціях з фізики і технології тонких плівок, (м. Івано-Франківськ, 1981, 1990 р.р.), IV Міжнародній конференції з фізики і технології тонких плівок (м. Івано-Франківськ, 1993 р.), III Харківській вакуумній конференції (м. Харків, 1993), I Українській конференції "Структура і

Фізичні властивості неупорядкованих систем" (м.Львів, 1993).

Основні матеріали дисертації опубліковані в 55 роботах, з них 37 внесено в список публікацій в авторефераті.

ОБСЯГ РОБОТИ. Матеріали дисертації викладено на 261 сторінках тексту, включаючи 55 рисунків, поміщених на 55 сторінках та 7 таблиць. Робота складається з вступу, шістьох розділів (оглядового і п'ятьох оригінальних), висновків та списку цитованої літератури із 263 назв.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність теми, сформульована мета дослідження, перераховано експериментальні методи дослідження, проаналізовані проблеми, пов'язані з науковою новизною роботи та подані основні наукові твердження, що виносяться на захист, наведено дані про практичне значення роботи.

В першому розділі "Теорії явищ переносу заряду в суцільних плівках простих металів" розглянуто основні модельні уявлення про класичний та внутрішній розмірні ефекти в зразках обмежених розмірів. Проведено детальний аналіз теоретичних моделей Фукса-Зондгеймера [1] і Майадаса-Шацкеса [2] та їх модифікацій і обговорено принципові труднощі цих теорій.

Труднощі існуючих теорій розмірних ефектів подолано в другому розділі роботи "Розвиток модельних уявлень про електронні явища переносу в тонких металічних плівках" з допомогою наступних припущень:

1. Враховуючи, що перенос заряду в плівках полівалентних та перехідних металів здійснюється носіями струму, які перебувають в різних станах на поверхні Фермі складної будови (суттєво відмінної від сфери), необхідно прийняти до розгляду існування в плівці, принаймні, декількох груп носіїв

струму з різними ефективними масами. При розрахунку кінетичних коефіцієнтів плівки для простоти вважається, що внески окремих груп носіїв в сумарний перенос заряду взаємно незалежні між собою, а об'ємне та поверхневе розсіювання також незалежно впливають на релаксацію носіїв струму кожної групи. На основі даного припущення в роботі проведено розрахунок впливу поверхневого розсіювання на розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів плівки для найпростішої з можливих електронних систем цього типу, тобто при наявності лише двох груп носіїв струму: носії однієї групи перебувають на електронних траєкторіях, а іншої - на діркових. Одержано загальні вирази для залежностей від приведеної товщини плівки  $d/\lambda$  ( $d$  - товщина плівки,  $\lambda$  - середня довжина вільного пробігу носіїв)  $\sigma$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $\Pi$  (постійної Пельтье) та  $\alpha$  (електронної теплопровідності) плівки. Відзначається, що одержані результати для  $\sigma(d/\lambda)$  та  $R(d/\lambda)$  добре узгоджуються з інтуїтивними трактуваннями, використаними для пояснення експериментальних даних в роботах попередніх років. Розвинута теоретична модель явищ переносу в плівці перехідного металу використана в експериментальній частині роботи для пояснення розмірних залежностей  $R$  та  $S$  плівки десяти перехідних d-металів.

2. Врахування впливу зернограничного розсіювання також можна проводити окремо для різних груп носіїв струму. Тому висновки теорії зернограничного розсіювання Майядаса-Шацкеса та найбільш вдалого її розвитку Тельє-Тоссе-Пішара (див. наприклад, [3]) придатні для опису переносу заряду по траєкторіях різного типу. У випадку електронних та діркових траєкторій вплив зернограничного розсіювання може бути врахованим з допомогою введення параметрів зернограничного розсіювання  $r^+$ ,  $r^-$  чи імовірності міжзеренного тунелювання  $t^+$ ,  $t^-$  відпо-

відно для діркових та електронних траєкторій, причому:

$$r/(1-r) = 0,97 \ln(1/t) \quad \text{для } t > 0,3, \quad (1)$$

або  $r/(1-r) = 2(1-t)/(1+t)$  для довільних значень  $t$ . (1')

Визначення параметрів  $t^+$ ,  $t^-$  (або  $r^+$ ,  $r^-$ ) може бути здійснене з допомогою співставлення залежностей  $\sigma(d)$  та  $R(d)$  чи  $\sigma(d)$  та  $S(d)$  з результатами дослідження  $\sigma_0$ ,  $R_0$  чи  $S_0$  масивного монокристала. Процедура цього розрахунку викладена в роботі.

3. Реальна плівка не може вважатися плоскопаралельним шаром металу, як це постулювалося в теорії Фукса-Зондгеймера. На поверхні реальної плівки поряд з дефектами атомного масштабу (які обумовлюють коефіцієнт дзеркальності поверхневого розсіювання  $P < 1$ ) існують дефекти більшої, майже макроскопічної, величини. Існування цих дефектів обумовлене нерівностями поверхні підкладки та гранулярною (зернистою) будовою плівки. Тому амплітуда  $h$  даних неоднорідностей повинна бути співмірною з середніми лінійними розмірами зерна  $D$ . У випадку, коли товщина плівки  $d \sim D$  (а значить,  $d \sim h$ ), нерегулярності товщини плівки повинні суттєво впливати на кінетичні коефіцієнти плівок внаслідок того, що при цих товщинах має місце їх значна залежність від  $d$ . В роботі одержано придатні для порівняння з експериментом вирази для розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів полікристалічної плівки з макроскопічними неоднорідностями товщини. Зокрема, при використанні для опису зернограничного розсіювання носіїв моделі Майадаса-Шацкеса [2] відповідні вирази набувають вигляду:

$$\bar{\rho}/\rho_0 = \Gamma^{-1}(\alpha) \langle \varphi^{-1}(x) \bar{d}/d \rangle, \quad (2)$$

$$\bar{\beta}/\beta_0 = [1+g(\alpha)] [1 - \frac{\bar{d}}{\lambda_0} \Gamma^{-2}(\alpha) \frac{\rho}{\bar{\rho}} \langle \varphi'(x) \varphi^{-2}(x) \rangle], \quad (3)$$

$$\bar{S}/S_0 = 1 + \frac{U}{U+V} g(\alpha) - \frac{U}{U+V} [1+g(\alpha) \langle x \varphi'(x) \varphi^{-1}(x) \rangle] \quad (4)$$

$$\bar{R}/R_0 = [1+g(\alpha)]f^{-1}(\alpha) < [1 - \frac{\alpha}{\varphi(\alpha)} \varphi'(\alpha)] d / \varphi(\alpha) d > \quad (5)$$

В цих виразах усереднення позначено  $\langle \rangle$ , функції  $f(\alpha)$  та  $g(\alpha)$  залежать від параметра  $\alpha = \lambda_0 r / D(1-r)$  (тут  $\lambda_0$  - середня довжина вільного пробігу носіїв в масивному монокристалі), а  $\varphi(\alpha)$  та  $\varphi'(\alpha)$  залежать від параметра  $\alpha = d/\lambda_0 r(\alpha)$ . Зернограничне розсіювання характеризують: зерногранична функція

$$f(\alpha) = 1 - 3\alpha/2 + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln(1+\alpha^{-1}) \quad (6)$$

та  $g(\alpha) = 1 + \alpha f'(\alpha) / f(\alpha)$

Функції  $\varphi(\alpha)$  та  $\varphi'(\alpha)$  даються виразами:

$$\varphi(\alpha) = 1 - [3(1-p)/2\alpha] \int_0^1 dy (y-y^2) \frac{1-e^{-\alpha y}}{1-pe^{-\alpha y}}$$

1

$$\varphi'(\alpha) = - [\varphi(\alpha)-1]/\alpha - [3(1-p)^2/2\alpha] \int_0^1 dy (1-y^2) \frac{e^{-\alpha y}}{1-pe^{-\alpha y}}$$

Особливості зонної енергетичної структури матеріалу плівки характеризуються параметрами  $U$  і  $V$ :

$$U = \frac{d(1-r\lambda_0)}{d(1-r\varepsilon)} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_p}, \quad V = \frac{d(1-rA)}{d(1-r\varepsilon)} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_p}$$

$A$  - площа поверхні Фермі.

Подібні вирази отримано для кінетичних коефіцієнтів неоднорідних по товщині полікристалічних плівок, в яких зернограничне розсіювання описується з допомогою багатомірної моделі Телье-Тосе-Пішара [3]. Одержані в роботі вирази використано для трактування відомих з літератури результатів експериментального дослідження плівок з штучно створеною неоднорідністю товщини шару, а також для трактування результатів експериментів, проведених нами.

Враховуючи недосконалість моделі одновірних неоднорідностей товщини шару, в роботі була здійснена спроба провести розрахунок розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів для

плівки з двоірною неоднорідністю товщини. Проведення відповідних розрахунків привело до необхідності введення додаткового підгоночного параметра, що суттєво понижує точність розрахунку і таким чином не дозволяє одержати принципово новий результат. Внаслідок цього уточнення моделі проводилось в напрямку врахування залежності амплітуди неоднорідностей від середньої товщини плівки. Найбільш вдалою апроксимацією, на наш погляд, виявилась наступна. В полікристалічній плівці по мірі зменшення середньої товщини, коли плівка складається з одного шару кристалітів, йде поступове зменшення середнього діаметра кристаліта  $D$  із зменшенням  $\bar{d}$ . Тому залежність  $h$  від  $\bar{d}$  можна апроксимувати певними функціями.

Аналіз результатів проведених нами розрахунків показав, що вплив неоднорідностей товщини плівки помітно проявляється лише на залежностях  $\rho(\bar{d})$  та  $\beta(\bar{d})$  і в незначній мірі на  $S(\bar{d})$ . Вплив неоднорідностей  $\bar{d}$  на постійну Холла  $R$  в межах точності розрахунку (та експериментів) не проявляється.

В третьому розділі "Методики експериментального дослідження розмірних кінетичних явищ в тонких плівках перехідних металів" описано особливості методик препарування та дослідження плівок, наведено результати дослідження структури плівкових зразків перехідних  $d$ -металів.

Експеримент проводили в умовах надвисокого вакууму у відпаяних скляних приладах при тиску залишкових газів  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  Па. При нанесенні плівок використовувалась методика, запропонована Зурманом, що забезпечувала приготування однорідних полікристалічних плівок металів: пара металів, отримана при його термічному випаровуванні, конденсується з невеликою швидкістю осадження (меншою за  $0,1$  нм/с) на охолоджену до  $78$  К підкладку з оплавленого полірованого скла. Стабілізація

структури і фізичних властивостей плівок досягається з допомогою низькотемпературного відгалу при 370 К. Як показали електроннографічні та електронно - мікроскопічні дослідження, виконані нами, використання даної методики виключає можливість утворення великих кристалічних зростків і забезпечує отримання зразків з незалежними від товщини середніми лінійними розмірами зерна  $D \sim 8 - 15$  нм, а параметри кристалічної ґратки конденсатів в межах точності експерименту співпадають з параметрами ґратки масивних металів.

Контроль газового складу в експериментальному приладі здійснювали з допомогою омега-тронного мас-спектрометра, придатного для кількісного аналізу складу газової атмосфери в діапазоні масових чисел від 1 до 82.

Вимірювання товщини плівок проводили по зсуву резонансної частоти п'езокварцового вібратора, розміщеного в потоці пари металу неподалік від підкладки з досліджуваною плівкою. Чутливість вимірювання масової товщини плівки в 0,1- 0,2 нм.

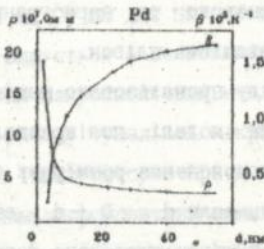
Дослідження розмірних залежностей  $\rho$ ,  $R$  та  $S$  плівок проводили безпосередньо у вакуумних приладах без порушення вакууму. Точність визначення  $\rho$  була 1-2 %,  $R$  - 5-10 %, а точність визначення  $S$  - 3-5 %. Дослідження адсорбційних явищ проведено з використанням методик, подібних до описаних вище. До особливостей методик адсорбційних досліджень слід віднести наявність в експериментальних приладах джерел адсорбатів та пристроїв для визначення змін роботи виходу  $\Delta\phi$  при адсорбції:  $\Delta\phi$  вимірювалась методом контактної різниці потенціалів у варіанті Андерсона з точністю  $\sim 0,1$  еВ.

Розділ четвертий "Вплив розмірного ефекту на електропровідність плівок перехідних металів" присвячено розгляду та аналізу результатів дослідження питомого опору та темпе-

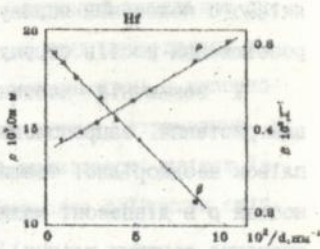
ратурного коефіцієнта опору плівок десяти перехідних металів. Мета цього експерименту - одержання інформації про механізми релаксації носіїв струму в плівках, визначення параметрів переносу заряду в досліджуваних металах та їх плівках, перевірка придатності проаналізованих вище модельних уявлень про класичний та внутрішній розмірний ефекти для пояснення експериментальних даних. Проведено також детальне порівняння результатів експерименту з даними, одержаними для плівок відповідних металів в роботах різних авторів.

Експериментальне дослідження питомого опору  $\rho$  та температурного коефіцієнта опору  $\beta$  плівок металів виявило їх залежність від товщини плівки  $d$ . Для ілюстрації сказаного на рис. 1а наведено розмірні залежності  $\rho(d)$  та  $\beta(d)$  плівок паладію. Експериментальні розмірні залежності  $\rho$  та  $\beta$  були трактовані з використанням модельних уявлень Фукса - Зондгеймера (ФЗ), Майадаса-Шацкеса (М-Ш) та Тельє-Тоссе-Пішара (Т-Т-П). Співставлення експериментальних даних з точними та наближеними виразами теорії Ф-З для залежностей  $\rho(d)$  і  $\beta(d)$  дозволило провести оцінку величин  $\rho_{\infty}$  та  $\beta_{\infty}$  (питомий опір та температурний коефіцієнт опору плівки безмежної товщини  $d \rightarrow \infty$ ),  $\lambda$  - середнього вільного пробігу електронів в цій плівці і коефіцієнта дзеркальності поверхневого відбивання  $r$ . Зокрема з метою використання виразів теорії Ф-З для опису властивостей плівок розмірні залежності  $\rho$  та  $\beta$  було представлено у вигляді лінійних функцій, показаних на рис. 1б, в і за параметрами цих функцій здійснено оцінку величини  $\rho_{\infty}$ ,  $\beta_{\infty}$  та  $\lambda$ .

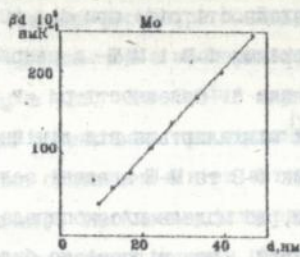
Внесок зернограничного розсіювання в релаксацію носіїв струму був врахований з допомогою виразів, одержаних в теорії М-Ш та її удосконаленому варіанті теорії Т-Т-П. В результаті співставлення експериментальних даних з теоретичними за-



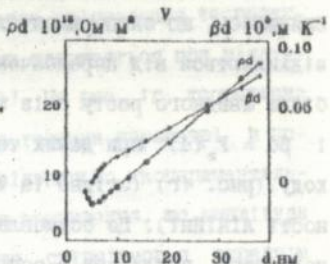
a)



б)



в)



г)

Рис. 1. Розмірні залежності питомого опору  $\rho$  та температурного коефіцієнта опору  $\beta$  плівок металів.

ЛІБ ім. В. Стефаника  
АН України

лежностями обчислено параметри  $\lambda_0$ ,  $r$  і  $t$ . У роботі зроблено висновок про придатність модельних уявлень М-Ш та Т-Т-П для якісного пояснення впливу поверхневого та зернограничного розсіювання носіїв струму на провідність плівок.

У заключній частині розділу проаналізовано можливість використання запропонованої нами моделі полікристалічних плівок неоднорідної товщини, для пояснення розмірних залежностей  $\rho$  в діапазоні малих товщин, коли  $d \sim D$  ( $d$  - середнє значення товщини плівки). З цієї метою проведено детальний аналіз залежностей  $\rho(d)$ ,  $\beta(d)$  та  $\rho d = F_1(d)$  і  $\beta d = F_2(d)$  для плівок нікелю, паладію, ванадію та інших металів при  $d \leq 20$  нм. Виявилось, що експериментальні залежності  $\rho(d)$  при  $d < 10$  нм відхиляються від передбачених теоріями Ф-З і М-Ш в напрямку більш швидкого росту  $\rho$  із зменшенням  $d$ . Залежності  $\rho d = F_1(d)$  і  $\beta d = F_2(d)$  при даних товщинах відхиляються від лінійного ходу (рис. 1г) (згідно із теоріями Ф-З та М-Ш згадані залежності лінійні). Це обумовлено тим, що модель плоскопаралельного шару, покладена в основу теорій, не відповідає будові реальної плівки. Тому для трактування експериментальних даних використано отриманий нами точний вираз залежності  $\rho(d)$ , аналогічний виразу (2):

$$\frac{\rho(d)}{\rho_0} = \frac{\sigma_0}{\sigma_0(d)} = \int_0^{\alpha} \frac{dx}{f(\alpha)[1+(h/d)\sin 2\pi x]} \quad (2a)$$

Порівняння з експериментальними даними проводилось з допомогою числового інтегрування виразу. Співвідношення (2a) з достатньою точністю (відхилення не більше 5 %) може бути замінене наближеним виразом:

$$\frac{\rho(d)}{\rho_0} = (1+3\lambda_0(1-p)f(\alpha)/8d[1-(h/d)^2]) / [1-(h/d)^2]^{1/2} f(\alpha) \quad (2б)$$

Виявилось, що дані співвідношення найкраще описують експериментальні залежності при  $h = 3-4$  нм для плівок нікелю та паладію і  $h = 3$  нм для плівок ванадію. Одержаний результат добре узгоджується з висновками робіт, в яких проводилось дослідження макроскопічних неоднорідностей поверхні з використанням методу тунельної мікроскопії та даними, отриманими в роботах інших авторів при дослідженні провідності плівок. Таким чином, запропонована нами модель дозволяє здійснити оцінку амплітуди неоднорідностей поверхні.

Як відзначалось вище, трактування експериментальних даних при  $d < 10$  нм можливе також і з використанням залежного від товщини параметра  $h$ . Зокрема, добре співпадіння теоретичних залежностей з експериментальними одержується при підстановці в (2а)  $h = 0,5D(1 - \exp(-D/2d))$ . На рис. 1г теоретична крива розрахована при залежному від товщини параметрі  $h$  показана суцільною лінією, а точками відзначено експериментальні дані). Тим самим підтверджується припущення, що амплітуда неоднорідностей товщини повинна бути співмірною з середнім радіусом зерна  $D/2$ .

В п'ятому розділі "Вплив поверхневого та зернограничного розсіювання носіїв струму на постійну Холла та абсолютну диференціальну термоелектрорушійну силу плівок" розглянуто результати дослідження розмірних залежностей  $R$  та  $S$  плівок. Дані величини для плівок всіх досліджених металів (за винятком  $S$  плівок  $Mo$ ) в діапазоні товщин 10-200 нм плавно змінюються із зміною товщини плівки. Для прикладу на рис. 2а показано залежності  $\rho$ ,  $R$  та  $S$  плівок скандію.

Трактування результатів експериментального дослідження  $\sigma$ ,  $R$  і  $S$  плівок здійснено в припущенні, що в переносі заряду в плівках приймають участь дві незалежні між собою групи но-

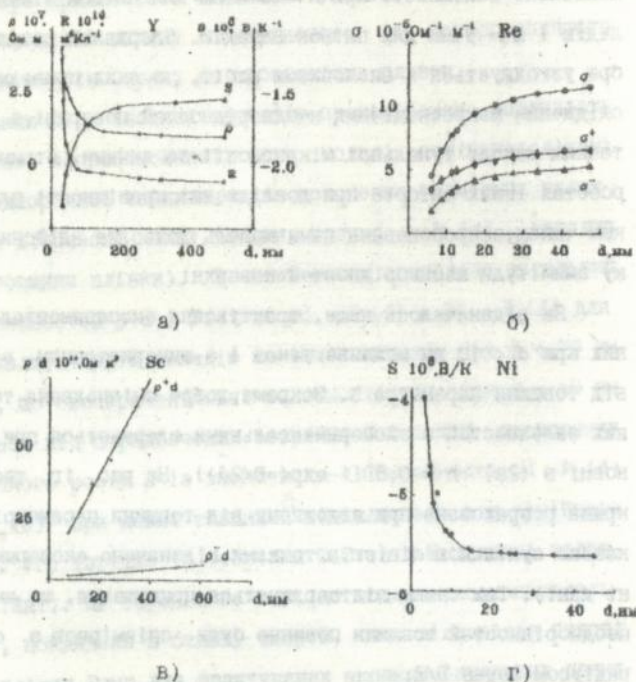


Рис. 2. а) Розмірні залежності кінетичних коефіцієнтів плівок Y.

б) Залежності  $\sigma = 1/\rho$ ,  $\sigma^+ = 1/\rho^+$  та  $\sigma^- = 1/\rho^-$  плівок Re від товщини плівки.

в) Залежності  $\rho^+ d$  та  $\rho^- d$  плівок Sc від товщини плівки.

г) Розмірна залежність термо-е.р.с. плівок Ni (o - експериментальні дані, \* - розраховано за допомогою (12) з даних [4]).

Інститут фізики  
 ім. В. Стефанівича  
 АН УРСР

сів струму, одні з яких перебувають на електронних траекторіях, а інші - на діркових. Вважаємо, що об'ємне, поверхнєве та зернограничне розсіювання впливають на релаксацію носіїв струму кожного з типів зокрема. В цьому випадку кінетичні коефіцієнти плівки товщиною  $d$  можна виразити:

$$\sigma(d) = \sigma^+(d) + \sigma^-(d) \quad (10)$$

$$R(d) = \frac{R^+(d)(\sigma^+(d))^2 + R^-(d)(\sigma^-(d))^2}{(\sigma^+(d) + \sigma^-(d))^2} \quad (11)$$

$$S(d) = -X \frac{\pi k T^2}{e \epsilon_F} \cdot \frac{\sigma^-(d) - F \sigma^+(d)}{\sigma^+(d) + \sigma^-(d)} \quad (12)$$

В цих виразах  $\sigma^+(d)$  і  $\sigma^-(d)$  - питомі провідності плівок товщиною  $d$  за рахунок внеску відповідно діркових та електронних траекторій,  $R^+(d)$  і  $R^-(d)$  - електронна і діркова постійні Холла,  $\epsilon_F$  - енергія Фермі металу,  $k$  - постійна Больцмана,  $X$  і  $F$  - параметри зонної структури.

В результаті обробки експериментальних залежностей  $\sigma(d)$  і  $R(d)$  з допомогою виразів (10) і (11) проведено розрахунок розмірних залежностей  $\sigma^+(d)$  та  $\sigma^-(d)$ . Для прикладу на рис.20 показані ці залежності для плівок ренію. Дані графіки можна лінеаризувати, звівши їх до виду  $\rho^+ d = F^+(d)$  чи  $\rho^- d = F^-(d)$  (на рис.2в показані відповідні залежності для плівок ітрію). Для обчислення параметрів переносу заряду по електронних та діркових траекторіях використано вирази теорії  $\Phi - Z$  окремо для  $\sigma^+(d)$  та  $\sigma^-(d)$ . Результати цього розрахунку наведено в дисертації.

Найважливішою характерною рисою поведінки постійної Холла досліджених перехідних металів є сильніша розмірна залежність  $R$ , ніж передбачалось теорією  $\Phi - Z$ . Крім того, в плівках  $Y$  і  $Pd$  спостерігається зміна знаку постійної Холла при зміні  $d$ , а в плівках  $Ni$  спостерігається екстремум в залежності

ті  $R(d)$ . Поведінка розмірних залежностей  $S$  плівок перехідних металів має також свої особливості. Зокрема, термо-е.р.с.  $S$  плівок  $Ti$  і  $Pd$  змінює знак при зміні товщини плівки.

Застосування запропонованої нами простої моделі, що припускає існування двох незалежних груп носіїв струму і незалежний вплив поверхневого та зернограничного розсіювання на перенос заряду цими групами, дозволяє достатньо добре пояснити особливості поведінки  $R(d)$  та  $S(d)$ . В рамках цього підходу легко пояснити зміну знаку  $R$  і  $S$  плівок згаданих металів при зміні  $d$ , а також пояснити причини відсутності розмірної залежності  $S$  плівок молибдену. Як впливає із запропонованої моделі, причини спостережуваних на експерименті розмірних залежностей  $R$  і  $S$  є залежність від товщини плівки відносного внеску в сумарний перенос заряду в плівці носіїв струму різних груп. Носії різних груп мають різні динамічні властивості, а тому вазнають і неоднакового впливу поверхневого та зернограничного розсіювання. Відмінні між собою залежності від  $d$  ефективних питомих електропровідностей  $\sigma^+$  та  $\sigma^-$  і викликають помітні залежності від товщини  $R$  і  $S$  плівок. Тобто з допомогою зміни товщини можна в деяких межах керувати величиною  $R$  чи  $S$  плівок. Розмірні співвідношення між  $\sigma^+$  і  $\sigma^-$  є індивідуальною характеристикою матеріалу плівки і в певній мірі залежать від розмірів кристалітів в плівці.

Вплив зернограничного розсіювання на перенос заряду по електронних і діркових траєкторіях різний: в плівках досліджених нами металів  $r^+$  звичайно більший за  $r^-$  ( $r^+ > r^-$  або  $t^- > t^+$ ). Саме переважаючим розсіюванням міжзернними границями носіїв, що перебувають на діркових траєкторіях, можна пояснити відносно високий питомий опір плівок молибдену  $\rho'_{\infty}$  при  $d \rightarrow \infty$ . Явище даного плану суттєво проявляється в плівках

скомпенсованих металів, в яких  $n^+ = n^-$ , а внесок діркових траєкторій в загальний перенос заряду суттєвий. Зернограничне розсіювання викликає різницю між відношеннями  $\sigma_{\infty}^+/\sigma_{\infty}^-$ , отриманими для плівок, та  $\sigma_{\infty}^+/\sigma_{\infty}^-$ , що характеризує масивний метал. Особливо наочно це проявилось при аналізі S плівок Ni та Pd, зокрема для Ni відношення  $\sigma_{\infty}^+/\sigma_{\infty}^- = 0,19$ , а  $\sigma_{\infty}^+/\sigma_{\infty}^- = 0,27$ .

З іншого боку, результати дослідження постійної Холла та термо-е.р.с. плівок підтвердили можливість використання підходів моделі вільних електронів для пояснення властивостей плівок металів, кількість діркових траєкторій в яких незначна. Це стосується плівок Sc, Zr, Hf та V. В число даних металів не можна включати Y та Ti, для яких внесок діркових траєкторій суттєвий, незважаючи на їх невелику концентрацію. З результатів дослідження зонної структури масивних зразків Y відомо про існування в металі підзони легких дірок, а тому внесок цих квазічастинок в перенос заряду постійний. Подібний вплив діркових траєкторій в Ti: рухливість носіїв на діркових траєкторіях приблизно в сім разів вища, ніж рухливість носіїв на електронних траєкторіях. Наслідками цього є позитивний знак постійної Холла плівок Ti і дуже тонких плівок Y.

Дослідження розмірних залежностей  $\rho$ , R та S дозволяє одержати також певну додаткову інформацію про зонну енергетичну структуру матеріалів. Підтвердженням цьому є те, що отримані в роботі дані про енергію Фермі ряду металів добре узгоджуються з величинами, відомими з літератури.

Про придатність запропонованої моделі для опису розмірних залежностей  $\rho$ , R та S свідчить і такий факт. В роботі не проводилось експериментальне дослідження R плівок Ni та Pd, бо відповідні залежності отримані в [ 4,5 ] з використанням аналогічної методики експерименту. Розрахунок S плівок цих

металів з використанням виразу (12) та даних [4,5], дав результати, які в межах точності експерименту співпадають з даними для  $S(d)$ , одержаними нами експериментально. Сказане підтверджує залежність, показана на рис. 2г. На даному рисунку експериментальні значення  $S$  плівок нікелю, одержані нами, позначено  $\bullet$ , а  $\times$  - величини, розраховані з результатів дослідження залежностей  $\sigma^+(d)$  та  $\sigma^-(d)$ , проведеного в [4].

В шостому розділі "Вплив субатомних поверхневих покриттів на перенос заряду в тонких плівках перехідних металів" наведено результати експериментального дослідження впливу поверхневих покриттів різного типу на опір та роботу виходу, а в окремих дослідях - на  $R$  та  $S$  плівок металів. Проведено дослідження значної кількості адсорбційних систем, що дозволило підтвердити загальний характер висновків про механізми впливу адсорбованих частинок на електричні властивості плівок, зроблених раніше в роботах Птушинського Ю.Г. та Панченка О.А. при вивченні адсорбції на плівках Ni.

В роботі досліджено вплив адсорбції атомів металів Cs, Ba, Cu, дипольних молекул BaO та CsCl і молекул  $O_2$  на електропровідність та роботу виходу плівок.

При вивченні впливу домішкових поверхневих атомів металів на опір та роботу виходу плівок показано, що основними механізмами зміни опору в цьому випадку можуть бути зміна умов поверхневого розсіювання носіїв струму та зміна ефективною товщини плівки за рахунок переносу заряду по металізованому адсорбованому шару. Відносні вклади вгаданих ефектів для даної адсорбційної системи залежать від поверхневої концентрації адсорбованих атомів. При ступенях покриття  $\theta$  близьких до моноатомного вплив шунтуючої дії адсорбованого шару стає переважаючим. Ефекти, пов'язані із зміною умов по-

верхнього розсіювання носіїв, проявляються лише в початковій стадії адсорбції ( при  $\theta \rightarrow 0$  ), а їх внесок залежить від зарядового стану адсорбованих частинок та енергії адсорбційного зв'язку. По аналогії та задачею про провідність розбавлених твердих розчинів адсорбовані атоми слід трактувати як додаткові розсіювачі центри, ефективність дії яких залежить від заряду центра та поверхневої концентрації цих центрів. Ефективні заряди адсорбованих атомів лужного металу Cs та лужноземельного Ba суттєво залежать від їх поверхневої концентрації та від електронних властивостей матеріалу підкладки. В роботі показано, що в початковій фазі адсорбції ( $\theta \rightarrow 0$ ) атоми Ba і Cs викликають незначне ( $< 0,07\%$ ) збільшення опору плівок Mo, Pd і Ti, в плівках V адсорбція при  $\theta \rightarrow 0$  не викликає змін опору, а опір плівок Y та Sc поступово зменшується при збільшенні  $\theta$ , починаючи з нульових покриттів. Дані відмінності пояснено на основі аналізу залежностей зміни роботи виходу та енергії зв'язку адсорбованих частинок від їх концентрації. Для доповнення відомої з літератури інформації проведено дослідження адсорбції барів на поверхні кристалів Re і V та плівок Y і Sc, нанесених на полікристалічну стрічку W. Показано, що зміни роботи виходу та енергії зв'язку зменшуються при переході від одного матеріалу до іншого в такому порядку Re - V - Sc, Y. Враховуючи сказане, можна стверджувати, що зростання опору в початковій стадії адсорбції Ba чи Cs має місце лише в системах із значною іонністю іонного зв'язку (також на Mo, Ti та ін.). Розсіюючий вплив атомів Ba і Cs на поверхні Y і Sc повинен бути набагато слабшим, бо дані атоми на поверхні Sc та Y зв'язані досить слабо, їх ефективний заряд близький до нуля, причому не виключена можливість їх поверхневої міграції, яка веде до залі-

ковування точкових дефектів.

При вивченні впливу адсорбції дипольних молекул ВаО та СаСі на електричні властивості плівок скандію, ітрію, молібдену, титану і паладію показано, що найбільш імовірним механізмом впливу адсорбції на перенос заряду в плівках є зміна умов поверхневого розсіювання носіїв струму.

Вплив адсорбції кисню на провідність вивчено для плівок молібдену, ванадію та ренію. На основі аналізу температурних залежностей опору плівок до і після адсорбції зроблено висновок про переважачий вплив на опір механізму, обумовленого зміною ефективної товщини плівки. Поряд з цим відзначено, що при тривалій взаємодії плівок з киснем (протягом декількох годин тиск  $O_2 \sim 10^{-4}$  Па і вище) найбільш імовірним механізмом зміни опору є зміна умов міжзеренного тунелювання носіїв.

Таким чином, в результаті адсорбційних досліджень показано, що найбільш імовірними механізмами зміни опору суцільних плівок при адсорбції є зміна умов поверхневого розсіювання носіїв струму та зміна ефективної товщини плівки.

## В И С Н О В К И

Основні результати роботи наступні:

1. Розроблені та використані надвисоковакуумні методики приготування дрібнокристалічних плівок перехідних металів. Удосконалено відомі з літератури та створено нові методики дослідження електрофізичних властивостей плівок в умовах надвисокого вакууму, на базі цих методик проведено комплексні дослідження кінетичних розмірних явищ в тонких плівках перехідних металів. Одержано дані про залежність питомого опору  $\rho$ , температурного коефіцієнта опору  $\beta$ , постійної Холла  $R$  та абсолютної термоелектрорушійної сили  $S$  від товщини

плівки. Отримані експериментальні дані характеризуються доброю відтворюваністю.

2. Запропоновано удосконалену модель опису класичного розмірного ефекту в плівках металів, яка базується на припущенні про адитивність всіх механізмів розсіювання носіїв струму в плівці. При цьому вважається, що релаксація носіїв струму в плівках здійснюється за рахунок об'ємного, зернограничного та двох видів поверхневого розсіювання: розсіювання поверхневими недосконалотями атомного масштабу та макроскопічними неоднорідностями поверхні, існування яких обумовлене гранулярною будовою полікристалічної плівки. В рамках запропонованої моделі шару неоднорідної товщини виведено аналітичним шляхом закономірності, що характеризують залежності кінетичних коефіцієнтів від товщини шару, а також розроблено методики числового інтегрування вирізів з допомогою ЕОМ з метою співставлення теоретичних залежностей з експериментальними даними.

3. Запропоновану теоретичну модель шару неоднорідної товщини використано для пояснення залежностей питомого опору дуже тонких плівок ванадію, нікелю і паладію від їх товщини. В результаті проведена оцінка амплітуди макроскопічних неоднорідностей товщини плівок яка для дрібнокристалічних плівок досліджуваних металів виявилась рівною  $h \sim 2-4$  нм. Одержані значення  $h$  добре узгоджуються з відомою з літератури інформацією про неоднорідності поверхні плівок, отриманою з допомогою тунельної мікроскопії.

4. Завершено розробку нового підходу до трактування розмірних кінетичних явищ в плівках полівалентних та перехідних металів, який базується на припущеннях про взаємну незалежність та адитивність внесків різних груп носіїв струму

в сумарний перенос заряду в плівці і про незалежний вплив об'ємного, зернограничного та поверхневого розсіювання на релаксацію носіїв струму кожної з груп. Аналітично обґрунтовано дану модель для найпростішого випадку металу, в якому присутні дві групи носіїв струму з різними ефективними масами: одна група носіїв перебуває на електронних траєкторіях, а інша - на діркових.

5. Модель, що базується на припущенні про взаємну незалежність внаєків різних груп носіїв струму, використана для пояснення одержаних в роботі експериментальних розмірних залежностей питомого опору, температурного коефіцієнта опору, постійної Холла та абсолютної диференціальної термо-е.р.с. плівок десяти перехідних металів, для цих металів проведено розрахунок параметрів переносу заряду по електронних та діркових траєкторіях. Показано, що в досліджених плівках імовірність міжзеренного тунелювання носіїв, що перебувають на електронних траєкторіях вища за імовірність міжзеренного тунелювання носіїв, що перебувають на діркових траєкторіях.

6. Проілюстровано придатність запропонованої моделі переносу заряду в плівках полівалентних та перехідних металів для одержання інформації про особливості електронної будови металів. Зокрема з результатів сумісного вивчення  $\rho$ ,  $R$  і  $S$  плівок можна провести розрахунок енергії Фермі металів  $\epsilon_F$ , розраховані таким чином значення енергії Фермі молібдену, цирконію та нікелю добре узгоджуються з відомими з літератури значеннями, отриманими іншими методами.

7. Основними механізмами зміни опору плівок при адсорбції атомів металів є:

а) зміна умов поверхневого розсіювання носіїв струму за рахунок появи на поверхні заряджених домішкових атомів (про-

являється при ступенях покриття  $\theta \ll 1$  в адсорбційних системах із значною складовою (іонного зв'язку);

б) зміна ефективної товщини плівки внаслідок шунтуючої дії металізованого шару адатомів (спостерігається для всіх систем при  $\theta \rightarrow 1$  та  $\theta > 1$ ).

8. З результатів дослідження температурної залежності зміни опору внаслідок адсорбції та вивчення впливу адсорбції на постійну Холла та термо-е.р.с. плівок встановлено, що переважачим механізмом зміни опору плівок перехідних d-металів при адсорбції дипольних молекул окису барію та хлористого цезію є зміна умов поверхневого розсіювання носіїв струму.

9. Збільшення опору електрично суцільних плівок перехідних металів при адсорбції кисню в початковій стадії адсорбції обумовлена зміною ефективної товщини плівки за рахування поверхневого ковалентного зв'язку.

Найбільш імовірним механізмом зміни опору плівок при тривалій взаємодії плівок з киснем при низьких температурах ( $T < 370$  K) є зміна умов міжзеренного тунелювання носіїв струму.

Основні результати дисертації опубліковані в наступних роботах :

1. Панчишин Р.С., Стасюк З.В., Фреїк Д.М. // ФТТ.- 1968. - т. 10, N 9. - С. 2731.
2. Птушинський Ю.Г., Стасюк З.В. // УФЖ.-1968. - т.13, N2. - С.315.
3. Кушнір Р.М., Стасюк З.В., Оришнін Ю.М. // Вісник Львів. ун-ту, Сер. фізична.- 1968. - в. 3(11). - С. 100.
4. Миколайчук Н.О., Панчишин Р.С., Стасюк З.В. // УФЖ.-1969. - С. 742.
5. Лах К.И., Стасюк З.В. // Физическая электроника.-1972.-в.5.- С. 105.

6. Мельничук В.Л., Панчишин Р.С., Стасюк З.В. // ФММ.- 1972.- т.4, в.1.- С. 48.
7. Панчишин Р.С., Стасюк З.В. // Вісник Львів. ун-ту, Сер. Фіз.- 1973.- в. 8.- С. 70.
8. Бигун Г.И., Бигун М.М., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1974, в.8.- С. 66.
9. Панчишин Р.С., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1974.- в.8.- С. 72.
10. Панчишин Р.С., Стасюк З.В. // УФЖ.- 1974.- т.19, №5.- С. 769.
11. Стасюк З.В., Бигун М.М., Мельничук В.Л., Панчишин Р.С. // Изв. АН СССР, Сер. физическая.- 1974.- т.38.- С. 370.
12. Панчишин Р.С., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1975.- в. 10, С.75.
13. Курчак Д.В., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1976.- в.13.- С. 35-40.
14. Лах К.И., Стасюк З.В. // ФТТ.- 1978.- т. 20, N 7.- С. 1989.
15. Мельничук В.Л., Стасюк З.В. // ФММ.- 1978.- т. 46, в.6.- С. IIIБ.
16. Лах Х.Г., Смерека Т.П. Стасюк З.В. // Вісник Львів. ун-ту, Сер. Фізична.- 1979.- N 14.- С. 60.
17. Лах К.И., Смерека Т.П. Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1981.- в. 22.- С. 72.
18. Лах К.И., Стасюк З.В. // УФЖ.- 1982.- т. 27, N 1.- С. 146.
19. Лах К.И., Стасюк З.В. // Журн. техн. физики.- 1982.- в. 52, N 7.- С. 1397.
20. Дума И.М., Козак М.М., Кушнир Р.М., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1985.- в. 31.- С. 81.
21. Стасюк З.В. // УФЖ.- 1986.- т. 31, N 5.- С. 742.
22. Козак М.М., Мельничук В.Л., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1986.- в. 33.- С. 47.

23. Козак М.М., Кушнир Р.М., Панчишин Р.С. Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1987.- в. 34.- С. 68.
24. Козак М.М., Панчишин Р.С. Стасюк З.В. // УФЖ.- 1987.- в. 32, №3.- С. 751.
25. Бигун М.М., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1987.- в.35.- С. 31.
26. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. // Вісник Львів. ун-ту, Серія Фізична.- 1990.- в. 23.- С. 97.
27. Козак М.М., Мельничук Б.Л., Петренко С.В., Проценко И.Е., Стасюк З.В. // Физическая электроника.- 1990.- в.41.- С. 100.
28. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. // Известия высших учебных заведений. Физика.- 1991.- N 12.- С. 94.
29. Стасюк З.В. // УФЖ.- 1992.- т. 37.- N 4.- С. 601.
30. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. // Физ. мет. и металловедение.- 1992.- т.62, в. 3.- С. 53.
31. Стасюк З.В. В сборнике "Физико-химические, структурные и эмиссионные свойства тонких пленок и поверхности твердого тела" // Под ред. акад. АН Украины Н.Г.Находкина.- Киев: УМК ВО, 1992.- С. 212- 219.
32. Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. // Металлофизика.- 1992.- т.14, №3, С. 97.
33. Дума И.М., Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. // Изв. высш. уч. завед. Физика.- 1992.- №12.- С. 33.
34. Дума И.М., Лах К.И., Мельничук Б.Л., Стасюк З.В. // Металлофизика.- 1993.- т.15, в. I.- С. 60.
35. Лах Х.Г., Стасюк З.В. // УФЖ.- 1994.- т.39, N 6.- С. 739.
36. Пастырский Я.А., Стасюк З.В., Каменецкий Р.Р., Кинах С.П., Мушинский З.С., Козак М.М., Мельничук Б.Л. Геттерно-ионный насос орбитронного типа. А.с. СССР, 1987, N 1387785.
33. Бигун М.М., Стасюк З.В. // Ред. УФЖ.- Киев, 1987. Деп. в

ВИНИТИ 14.12.1987, №018-В87, С. 13.

ЦИТОВАНА ЛИТЕРАТУРА

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. Tossner A.J., Tellier C.R., Pichard C.R // Journ.Mat.Sci.- 1981.- v. 16, N 5.- P. 944.
4. Панченко О.А. // УЕЖ.- 1966.- т. 11, N 10.- С. 1147.
5. Панченко О.А., Луцишин П.П., Птушинский Ю.Р. // ЖЭТФ. - 1969.- т. 56, в. 1.- С. 134.

Стасюк З.В. Электронные явления переноса в тонких пленках переходных d-металлов (рукопись).

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника, Институт физики НАН Украины, Киев, 1994.

Защищается 36 научных работ и 1 авторское свидетельство по физике тонких пленок. В работе показано, что объяснение процессов переноса заряда в поликристаллических пленках металлов можно провести на основе модели поликристаллического слоя неоднородной толщины. Изучено влияние поверхностного и зернограничного рассеяния на перенос заряда, а также влияние адсорбции на кинетические явления в пленках.

Stasyuk Z. V. Electron Transport Phenomena in Thin Films of Transition d-metals (manuscript).

The dissertation advanced for a degree of Doctor of Science (Physics and Mathematics) in the speciality of 01.04.04 - Physical Electronics, Institute of Physics NAS of Ukraine, Kyiv, 1994.

There are 36 scientific papers and 1 certificate of the authorship represented, concerning thin film physics. It is shown in the present thesis the transport of the charge in thin metallic polycrystalline films can be explained in terms of the model of nonhomogeneous thickness polycrystalline layers. The influence of the surface and the grain-boundary scattering on charge transport and influences of adsorption kinetics phenomena in films have been investigated.

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

Ученый В. В. Коваленко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Ленинградского государственного университета им. В. И. Ленина, Ленинград, 1927.

Содержание: В работе рассмотрены вопросы теории диффузии в жидкостях. Выведены уравнения диффузии в жидкостях с учетом взаимодействия молекул. Рассмотрены вопросы диффузии в жидкостях с учетом взаимодействия молекул. Рассмотрены вопросы диффузии в жидкостях с учетом взаимодействия молекул.

Статья В. В. Коваленко, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Ленинградского государственного университета им. В. И. Ленина, Ленинград, 1927.

The dissertation advanced for a degree of Doctor of Science (Physics and Mathematics) in the specialty of 01.04.01 - Physical Electronics, Institute of Physics, NAS of Ukraine, Kyiv, 1994.

There are 30 scientific papers and 1 certificate of the authorship represented, concerning this thesis. It is shown in the present thesis the character of the change in this detailed polyelectrolytic lines can be explained in terms of the model of nonequilibrium systems polyelectrolytic lines. The influence of the surface and the grain boundary existing on charge transport and influence of absorption

Підписано до друку 13.09.94. Формат 60х84/16.  
 Обсяг 2 друк. листа, зам. 574. Тир. 120. Безплатно.

Львів, друкарня УЛІ ім. Ів. Федорова.



Безплатно

АВ 30.843