

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ЧОРНОУС АНАТОЛІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

РОЗМІРНІ ЯВИЩА В ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ
І ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ ДВОШАРОВИХ ПЛІВОК

Спеціальність 01.04.07. - фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук



СУМИ - 1996



00779454 (-)

Робота виконана кафедрою фізики та математики Сумського державного педагогічного інституту ім. А.С. Макаренка.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор ПРОЦЕНКО І.Ю.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор ЗИМАН З.З.
кандидат технічних наук,
доцент ХВОРОСТ В.А.

Провідна організація: Львівський державний університет
ім. І. Франка

Захист дисертації відбудеться "22" лютого 1996 р. о 15 год.
на засіданні спеціалізованої ради К 22.01.01. при Сумському
державному університеті за адресою: 244007, м. Суми, вул.
Римського-Корсакова, 2, ауд. 216, корпус ЕТ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Сумського
державного університету.

Автореферат розіслано "11" січня 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради
кандидат фізико-математичних наук,
доцент

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

А.С. Опанасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Інтерес до вивчення структури і фізичних властивостей тонких плівок перехідних металів обумовлений їх використанням у багатьох областях науки та техніки. Це стало можливим після освоєння методів одержання тонкоплівочних зразків із заданими фізичними властивостями. Найбільш широке використання зразки малих розмірів (тонкі плівки, дроти, малі частинки) одержали в оптиці, космічній і атомній промисловості і НВЧ - техніці, як захисні покриття, елементи мікроелектронних схем, тензодатчики, у криогенній техніці та при створенні дуже чутливих реєструючих датчиків для вимірювання малих електричних, магнітних і теплових полів.

Відмінною особливістю тонких зразків, порівняно з об'ємними, є обмеження розміру в одному із напрямків, що приводить до виникнення ряду фізичних ефектів, які слабо виражені або зовсім не спостерігаються в масивних зразках. Цим визначається інтерес до тонких плівок при вивченні фундаментальних питань фізики твердого тіла (розмірні ефекти в електрофізичних і термодинамічних властивостях, особливості фазової рівноваги та ін.).

В останній час об'єктом дослідження все частіше стають багатошарові структури, зокрема, двошарові. Такі системи використовуються, наприклад, як матеріал для носіїв інформації в пристроях пам'яті, в елементах мікроелектроніки і т.і. Тензодатчики на основі двошарових металевих плівок можуть бути більш ефективними порівняно з одношаровими і особливо в області температур 600 - 700 К, оскільки у них після термообробки при цих температурах практично відсутні подальші рекристалізаційні і дифузійні процеси.

Актуальність теми. На цей час відома значна кількість як теоретичних, так і експериментальних робіт, присвячених дослідженню фізичних властивостей одношарових металевих плівок. Але не менш цікавими і перспективними є дослідження електрофізичних властивостей двошарових металевих плівок. Фізичний аспект проблеми в даному випадку пов'язаний із тією обставиною, що межа розділу шарів може служити додатковим механізмом розсіювання носіїв електричного струму. Крім цього, на межі розділу шарів

виникають макронапруження термічного і структурного походження, які істотно впливають на фізичні властивості плівок. Не менш цікавими є дослідження процесів взаємної дифузії, що протікають у двошарових плівках, і їх зв'язок з електрофізичними властивостями.

У зв'язку з цим двошарові плівки перехідних *d*-металів представляють інтерес як об'єкти для вивчення закономірностей і явищ, які слабо проявляються або зовсім не спостерігаються в одношарових, що дозволить ще більш розширити область використання тонких плівок. До таких явищ можна віднести розмірні і температурні ефекти в електропровідності і тензочутливості двошарових плівок, що досить детально вивчені на прикладі одношарових. Для коректного обговорення результатів потрібно було проводити додаткові дослідження кристалічної структури (метод електронної мікроскопії), фазового (електронографія) і елементного (мас-спектрометрія вторинних іонів) складу плівкових зразків.

Таким чином, комплексне дослідження кристалічної структури, фазового і елементного складу, розмірної і температурної залежності опору, температурного коефіцієнта опору (ТКО), коефіцієнтів повздовжньої (γ_l) і поперечної (γ_t) тензочутливості двошарових плівок перехідних *d*-металів є актуальною проблемою, що і визначило мету даної роботи.

Метою роботи є вивчення розмірної і температурної залежності опору, ТКО, коефіцієнтів тензочутливості в двошарових плівках на основі кобальту, хрому, нікелю та ніобію з різним чергуванням шарів, одержаних у вакуумі $10^{-4} \div 10^{-5}$ Па при відкачуванні дифузійним пароструменевим або магніторозрядним насосами.

При цьому були розв'язані такі задачі:

а) досліджено фазовий і елементний склад, кристалічну структуру одно- та двошарових плівок на основі хрому, кобальту, нікелю та ніобію;

б) вивчено розподіл атомів металів по товщині двошарової плівки;

в) досліджена температурна і розмірна залежність від товщини другого шару (d_2) при фіксованій товщині базисного (d_1) опору, ТКО, коефіцієнтів тензочутливості двошарових

плівки;

г) проапробована теоретична модель Р.Дімміха для температурного коефіцієнта опору двошарових полікристалічних плівок;

д) проведена апробація теоретичних співвідношень для коефіцієнтів тензочутливості двошарових полікристалічних плівок, як в області малих - до $(0,04 \div 0,06)\%$, так і великих - до $(2 \div 4)\%$ деформацій.

Вибір двошарових плівок на основі хрому, кобальту, нікелю та ніобію як об'єктів дослідження був пов'язаний із такими обставинами. По-перше, зразки на основі перехідних *d*-металів можна одержувати з широким спектром розміру кристалів, що дозволяє більш детально з'ясувати роль розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен у розмірних ефектах електропровідності і тензочутливості. По-друге, на момент постановки задачі даних досліджень практично не було вивчено розмірної і температурної залежності опору і коефіцієнтів тензочутливості в двошарових плівках. По-третє, підбір конкретних пар двошарових плівок можна здійснювати таким чином, що температурні коефіцієнти опору будуть дуже близькі, або різко відрізнятися, це дозволяє більш коректно перевіряти теоретичні моделі. І, нарешті, — практичним інтересом, пов'язаним із можливим використанням двошарових плівок як елементів мікросхем і тензодатчиків. Наявність межі розділу між шарами обумовлює появу додаткового механізму розсіювання носіїв електричного струму, що може привести до збільшення коефіцієнтів тензочутливості порівняно з одношаровими плівками.

Наукова новизна. В дисертаційній роботі вперше проведено комплексне дослідження кристалічної структури, фазового і елементного складу, електрофізичних властивостей (опір, температурний коефіцієнт опору, коефіцієнтів повздовжньої та поперечної тензочутливості) двошарових плівок Ni/Co/Π, Co/Ni/Π, Ni/Cr/Π, Cr/Ni/Π, Co/Nb/Π, Co/Nb/Π (де Π - підкладка). Крім цього, здійснена апробація теоретичної моделі Р.Дімміха для розмірного ефекту в температурному коефіцієнті опору в інтервалі товщин $d_1 = 20 \div 100$, $d_2 = 20 \div 120$ нм та теорії тензочутливості

двошарових полікристалічних плівок.

Вперше дослідження тензочутливості проводилось як в області малих - до $(0,04 \div 0,06)\%$, так і великих - до $(2 \div 4)\%$ деформацій.

Практична і наукова цінність. Одержані нові систематичні дані з розмірної і температурної залежності опору, температурного коефіцієнта опору, коефіцієнтів повздовжньої і поперечної тензочутливості у двошарових металевих плівках на основі d -металів. Важливим у плані розвитку теорії електропровідності і тензочутливості тонких плівок є апробація відомих теоретичних моделей. Одержані наукові результати також можуть бути використані при розробці більш ефективних терморезисторів і тензодатчиків.

Основні положення та результати,
які виносяться на захист.

1. Характер розмірної залежності температурного коефіцієнта опору двошарової плівки істотно залежить від співвідношення ТКО масивних зразків; величина ТКО зростає (якщо $\beta_{g1} < \beta_{g2}$ або $\beta_1 < \beta_{g2}$), або зменшується (якщо $\beta_1 > \beta_{g2}$), виходячи на асимптотичне значення β_{g2} .

2. Теоретична модель Р.Дімміха розмірного ефекту в ТКО двошарових плівок співпадає з експериментом лише якісно (відмінність в 1,2 - 1,7 рази), що пов'язано з процесами взаємної дифузії атомів та частковою дією макронапружень.

3. При однаковій товщині одношарової та двошарової плівок ($d = d_1 = d_2$) між коефіцієнтами тензочутливості в інтервалі товщин 20÷120 нм існують такі співвідношення: $\gamma_I/\gamma_{I1} \cong 1,3 \div 3,1$ та $\gamma_I/\gamma_{I2} \cong 1,4 \div 2,4$ (плівки Cr/Ni, Ni/Cr, Co/Cr, Cr/Co, Ni/Co), або $\gamma_I/\gamma_{I1} \cong 1,0 \div 1,1$ та $\gamma_I/\gamma_{I2} \cong 1,0 \div 1,1$ (плівки Co/Ni), що пояснюється різною ефективністю додаткового механізму розсіювання носіїв електричного струму на межі розділу двох шарів.

4. Значення коефіцієнтів тензочутливості двошарових плівок залежить від величини деформації; при великих повздовжніх деформаціях ($\Delta\varepsilon = 0 \div 4\%$) γ_I в цілому має меншу величину порівняно з аналогічною при малих повздовжніх деформаціях ($\Delta\varepsilon = 0 \div 0,06\%$).

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ І ПУБЛІКАЦІЇ

Основні результати роботи доповідались на таких конференціях і семінарах: IV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1993 р.); 3-тя Харківська вакуумна конференція (Харків, 1993 р.); Міжнародна конференція з модифікації властивостей поверхневих шарів ненапівпровідникових матеріалів (Суми, 1993 р.); Науково-технічна конференція з техніки і фізики електронних систем і пристроїв (Суми, 1995 р.); Міжнародна наукова конференція, присвячена 150-річчю від дня народження видатного українського фізика і електротехніка Івана Пулюя (Львів, 1995 р.); V Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок (Івано-Франківськ, 1995 р.).

Матеріали були представлені на конференціях: Еволюція тонких плівок, структура поверхні і морфологія (Бостон, 1994р.); Структура і властивості багатошарових тонких плівок (Сан-Франциско, 1995 р.); Полікристалічні тонкі плівки - II: структура, текстура, властивості і використання (Бостон, 1995 р.).

Результати дослідження опубліковані в 14 статтях і тезах доповідей, із них 10 назв подано у списку публікацій в авторефераті.

Об'єм роботи. Дисертація викладена на 146 сторінках тексту, включаючи 47 рисунків та 14 таблиць. Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, заключення, висновків та списку використаної літератури, що містить 124 назви.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, коротко охарактеризовано сучасний етап вивчення проблеми, сформульована мета досліджень і основні положення, які виносяться на захист.

Перша глава "Розмірні ефекти в електрофізичних властивостях тонких металевих плівок" - це огляд літературних даних і складається з п'яти параграфів.

У перших двох параграфах розглянуті теоретичні моделі та експериментальні результати з розмірної і температурної

залежності опору та температурного коефіцієнта опору тонких одношарових плівок металів. Констатується, що найбільш прийнятливими для обробки експериментальних результатів є моделі Ц.Тельє, А.Тоссе, Ц.Пішара.

В параграфі 1.3 розглядаються теоретичні моделі електропровідності для двошарових плівок. Теорія, запропонована М.Ель-Хіті і М.Ахмедом [1], придатна лише для монокристалічних плівок. Врахування розсіювання на межі зерен було здійснено в моделі Р.Дімміха [2]. У загальному вигляді вираз для ТКО двошарової плівки є таким:

$$\beta = A \left\{ \beta_{01} \left(1 - \frac{d \ln F_1}{d \ln k_1} - \frac{d \ln F_1}{d \ln l_1} + \frac{d \ln F_1}{d \ln a} \right) - \beta_{02} \left(\frac{d \ln F_1}{d \ln k_2} + \frac{d \ln F_1}{d \ln l_2} + \frac{d \ln F_1}{d \ln a} \right) \right\} + \\ + B \left\{ \beta_{02} \left(1 - \frac{d \ln F_2}{d \ln k_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln l_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln a} \right) - \beta_{01} \left(\frac{d \ln F_2}{d \ln k_1} + \frac{d \ln F_2}{d \ln l_1} - \frac{d \ln F_2}{d \ln a} \right) \right\}, \quad (1)$$

де β_{0i} - ТКО для масивних зразків; $A = \frac{d_1 \sigma_{01} F_1}{d_1 \sigma_{01} F_1 + d_2 \sigma_{02} F_2}$, $B = \frac{d_2 \sigma_{02} F_2}{d_1 \sigma_{01} F_1 + d_2 \sigma_{02} F_2}$, $F_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{0i}}$ - функція Фукса (σ , σ_0 - питома провідність плівки та масивного зразка); $k_i = \frac{d_i}{\lambda_{0i}}$, $l_i = \frac{L_i}{\lambda_{0i}}$ - приведені товщина і середній розмір зерна (d_i - товщина i -го шару, L_i - середній розмір зерна, λ_{0i} - середня довжина вільного пробігу носіїв електричного струму); a - відомий параметр, пов'язаний з ефективною масою і середньою довжиною вільного пробігу носіїв.

Співвідношення для ТКО в такому вигляді не придатне для використання при обробці експериментальних результатів. У зв'язку з цим нами було здійснено (глава 3) відповідне спрощення до вигляду, при якому можливо провести кількісні розрахунки.

У роботі Л.В. Дехтярука і Ю.А. Колісниченка [3] була розв'язана більш складна задача: проведено розрахунок питомої провідності як монокристалічних, так і полікристалічних плівок в умовах взаємної дифузії атомів із одного шару в інший.

Їх теорія більш точна і послідовна порівняно з теорією Р.Дімміха, але здійснити її експериментальну перевірку практично неможливо. Справа в тому, що точність вимірювання питомої провідності плівок набагато нижча

порівняно з точністю вимірювання ТКО. З іншого боку, якщо визначити ТКО із співвідношень [3], то одержані вирази важко порівняти з експериментом через велику кількість невизначених параметрів.

У зв'язку з цими обставинами ми проводили кількісні розрахунки (глава 3) лише у рамках теорії Р.Дімміха, а теорія [3] використовувалася лише для якісного аналізу експериментальних даних.

У четвертому параграфі проведений аналіз відомих теорій та експериментальних результатів з тензочутливості одношарових металевих плівок. Приведені співвідношення для коефіцієнтів тензочутливості одержані Ц.Тельє, А.Тоссе і Ц.Пішіром у рамках моделі МШ та трьохвимірної моделі ТТП. Указані основні закономірності тензоефекту в одношарових плівках, зроблені на основі відомих експериментальних результатів.

Теорії розмірного ефекту у тензочутливості двошарових плівок розглядаються в параграфі 1.5.

У роботі Ф.Катара і М.Ель-Хіті [4] запропонована модель розмірного ефекту тензочутливості двошарових металевих монокристалічних плівок. Основним недоліком даної теорії є те, що вона не враховує розсіювання на межі зерен і її неможливо застосувати до полікристалічних зразків.

У роботі А. І. Кузьменко, С. В. Петренко, І. Ю. Проценка [5] запропонована теорія, тензоефекту для двошарових полікристалічних металевих плівок, яка ґрунтується на ідеях [4], і згідно якої співвідношення для коефіцієнта повздовжньої тензочутливості має такий вигляд:

$$\gamma_l = A \left[1 + \eta_{l1} - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{01}} \right) \left(\eta_{l1} + \eta_{l2} \frac{\beta_{01}}{\beta_{02}} \right) \right] + \quad (2)$$

$$+ B \left[1 + \eta_{l2} - \left(1 - \frac{\beta}{\beta_{02}} \right) \left(\eta_{l2} + \eta_{l1} \frac{\beta_{02}}{\beta_{01}} \right) \right] + 1 + 2\mu_f,$$

де $\eta_{li} = \frac{d\lambda_{0i}}{\lambda_{0i}d\varepsilon_l}$ - деформаційний коефіцієнт середньої довжини вільного пробігу електрона; μ_f - коефіцієнт Пуассона плівки.

Для γ_t можна записати співвідношення, аналогічне (2). За

допомогою них ми будемо здійснювати (глава 4) теоретичний розрахунок величини γ_l та γ_t .

У другій главі "Методика і техніка експерименту" описуються установки для одержання зразків і проведення досліджень, методика вимірювання електроопору і тензочутливості, методика та результати вивчення елементно-го і фазового складу, кристалічної структури.

Для проведення досліджень використовувались стандартні установки ВУП-5, ВУП-5М, а також установка на основі магніторозрядного насоса.

При вивченні електропровідності плівки на скляних підкладках термостабілізувались протягом трьох-чотирьох циклів "нагрівання \leftrightarrow охолодження" в інтервалі температур 300-700 К. Швидкість нагрівання і охолодження при відпалюванні підтримувалась постійною і складала величину 2-3 К/хв. При третьому або четвертому циклі зразки охолоджувались до температури 100К за допомогою рідкого азоту.

Явище тензоефекту було досліджене методом деформації плівки на згин (область малих деформацій - до (0,04 - 0,06)%) та методом деформації плівки на розтяг (область великих деформацій - до (2 - 4)%).

В області малих деформацій величина $\epsilon_{l,t}$ визначалась по відомому співвідношенню:

$$\epsilon_{l,t} = \frac{Dh}{l_{\Pi}^2}, \quad (3)$$

де l_{Π} , D , h - початкова довжина, товщина і прогин підкладки. В області великих деформацій - $\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_{\Pi}}$, де Δl - зміна довжини підкладки з плівкою.

Для визначення фазового складу і структури конденсатів проводились електроннографічні та електронно-мікроскопічні (електронний мікроскоп ЕМ-125К) і рентгенографічні (ДРОН-2.0) дослідження. Елементний склад зразків визначався методом вторинної іонної мас-спектроскопії за допомогою мас-спектрометра МС-7201М.

На рис.1 приведені типові мас-спектри вторинних іонів (а, б) та штрих-діаграма (в) на прикладі плівкової системи Co/Ni. На основі цих досліджень зроблено висновок, що, незважаючи

на те, що в двошарових зразках протікають дифузійні процеси, утворення інтерметалевих фаз не відбувається.

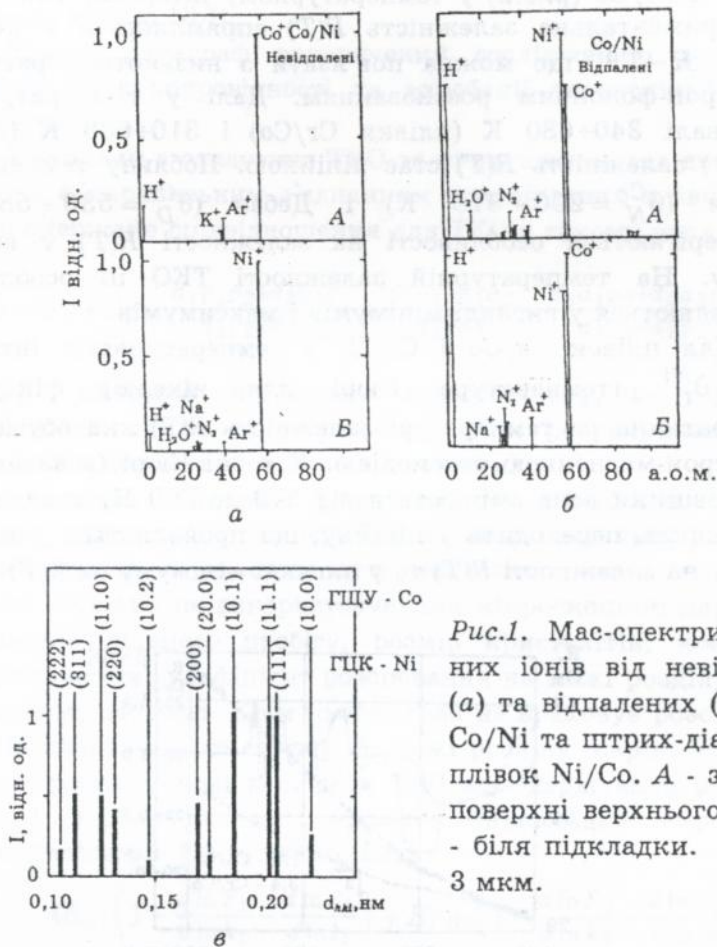


Рис.1. Мас-спектри вторинних іонів від невідпалених (а) та відпалених (б) плівок Co/Ni та штрих-діаграма (в) плівок Ni/Co. А - зі сторони поверхні верхнього шару, В - біля підкладки. Товщина 3 мкм.

У **третій главі** "Електропровідність двошарових плівок" у першому параграфі подані результати електронно-мікроскопічних, рентгенографічних та мас-спектрометричних досліджень. Вивчення елементного складу показує, що в двошарових плівках активно іде взаємна дифузія. Особливістю плівок Co/Ni і Ni/Co є повне дифузійне перемішування.

Результати дослідження температурної залежності опору приведені в параграфі 3.2. Найбільш характерними

особливостями залежностей $R(T)$ і $\beta(T)$ є такі. Для плівок Co/Cr і Cr/Co (рис.2) у температурному інтервалі 100÷300 К експериментальна залежність $R(T)$ спрямляється у координатах $R - T^3$, що можна пов'язати з низькотемпературним електрон-фононним розсіюванням. Далі у температурному інтервалі 340÷680 К (плівки Cr/Co) і 310÷680 К (плівки Co/Cr) залежність $R(T)$ стає лінійною. Поблизу температури Нееля ($\theta_N^{Cr} = 290 \div 310$ К) і Дебая ($\theta_D^{Cr} = 530 \div 580$ К) спостерігаються особливості на залежності $R(T)$ у вигляді злому. На температурній залежності ТКО ці особливості проявляються у вигляді мінімумів і максимумів.

Для плівок Ni/Co і Co/Ni у температурному інтервалі $100 \div \theta_C^{Ni}$ (температура Кюрі для нікелю) фіксується квадратична по температурі залежність $R(T)$ яка обумовлена електрон-магнотною взаємодією. У точці Кюрі (в залежності від товщини вона змінюється від 570 до 600 К) квадратична залежність переходить у лінійну, що проявляється у вигляді злому на залежності $R(T)$ та у вигляді мінімуму на $\beta(T)$.

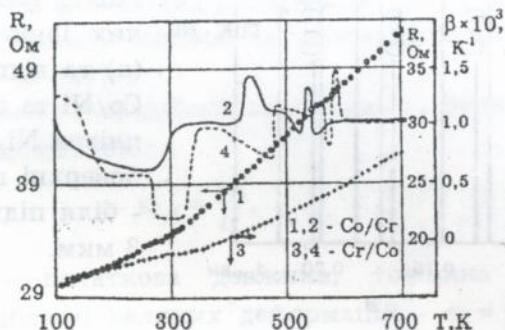


Рис.2. Залежність опору (1,3) і ТКО (2,4) від температури для плівок Co/Cr товщиною 70 нм ($d_1^{Cr} = 45$ нм, $d_2^{Co} = 25$ нм) і Cr/Co товщиною 75 нм ($d_1^{Co} = 30$ нм, $d_2^{Cr} = 45$ нм).

На залежностях $R(T)$ і $\beta(T)$ у плівках Co/Nb і Nb/Co можна вказати три характерні точки, у яких спостерігаються особливості: 370 К, температура Дебая кобальту (460÷470 К),

і температура θ_1 для кобальту (590 К). Найявність першої можна пояснити продуктами дегазації у результаті розпаду гідриду ніобію NbH_x .

Третій параграф присвячений дослідженню розмірного ефекту електропровідності та апробації теоретичної моделі Р.Дімміха.

Виходячи з означення ТКО та припущення, що двошарова плівка є паралельним з'єднанням одношарових плівок, нами було одержано співвідношення для ТКО у такому вигляді:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 - \frac{d_1\beta_2\rho_2 + d_2\beta_1\rho_1}{d_1\rho_2 + d_2\rho_1} + \frac{d_1\alpha_1 + d_2\alpha_2}{d_1 + d_2} - \frac{d_1\alpha_1\rho_2 + d_2\alpha_2\rho_1}{d_1\rho_2 + d_2\rho_1}, \quad (4)$$

де ρ_i - питомий опір окремо взятого шару, α_i - термічний коефіцієнт лінійного розширення (при розрахунках двома останніми доданками можна знехтувати).

Значення величини β , оцінене по співвідношенню (4), якісно співпадає з експериментальними результатами. Але такий підхід є по своїй суті макроскопічним, оскільки в цьому випадку не використовуються мікроскопічні параметри (довжина вільного пробігу, розмір кристалітів, коефіцієнт дзеркальності, коефіцієнт розсіювання на межі розділу зерен) у явному вигляді. Крім цього, вона не враховує розсіювання носіїв електричного струму на межі розділу шарів. У зв'язку з цим розрахункові величини ТКО ми одержували в рамках моделі Р.Дімміха за допомогою відповідно спрощеного співвідношення (1) до такого виду:

$$\beta = A\beta_{01} \left(1 - \frac{d \ln F_1}{d \ln k_1} - \frac{d \ln F_1}{d \ln l_1} \right) + B\beta_{02} \left(1 - \frac{d \ln F_2}{d \ln k_2} - \frac{d \ln F_2}{d \ln l_2} \right). \quad (5)$$

Одержані залежності можна подати у вигляді дво- або тривимірних графіків (рис. 3). На цьому рисунку суцільними лініями з точками зображено експериментальні залежності $\beta(d)$ для одношарових плівок хрому, кобальту і нікелю, при цьому штрих-пунктирні лінії показують асимптотичне значення для вказаних металів. Суцільні і штриховані лінії ілюструють залежність $\beta(d_2)$ у двошарових плівках при різних фіксованих значеннях товщини базисної плівки.

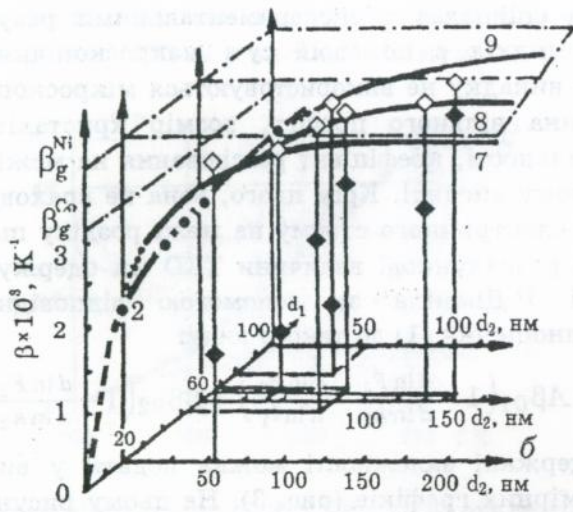
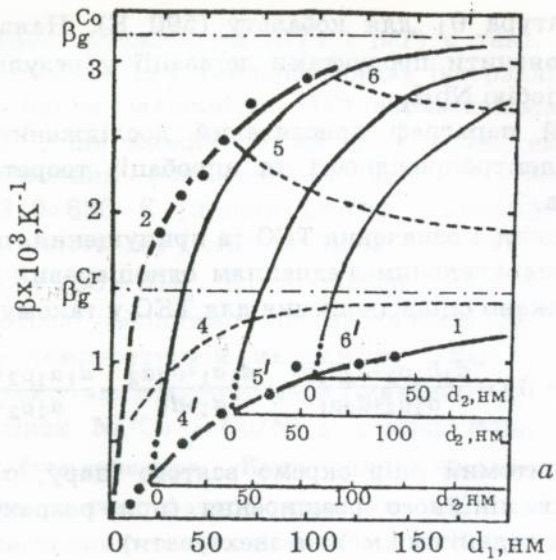


Рис.3. Залежність ТКО від товщини для двошарових плівок Cr/Co і Co/Cr (a) та Ni/Co (б): 1,2 - $\beta(d_1)$ для плівок Cr та Co; 4-6, 4'-6', 7-9 - $\beta(d_2)$ для плівок Cr/Co, Co/Cr та Ni/Co відповідно; \blacklozenge , \blacklozenge - експериментальні та відповідні їм розрахункові дані для залежності $\beta(d_2)$ при $d_1 \cong \text{const}$.

Розрахункові залежності дозволили встановити загальні закономірності розмірного ефекту ТКО у двошарових плівках. Вони суттєво відрізняються від аналогічних для одношарових плівок. По-перше, якщо в одношарових плівках із збільшенням товщини значення ТКО монотонно збільшується, прямуючи до асимптотичного значення β_g , то у двошарових зразках можлива протилежна тенденція. По-друге, всі графіки $\beta(d_2)$ починаються у точках, які належать залежності $\beta(d_1)$ для базисного шару і асимптотично наближаються знизу чи зверху (в залежності від співвідношення β_{g1} і β_{g2}) до величини β_{g2} . У плівках Ni/Co і Co/Cr з ростом d_2 значення ТКО завжди буде збільшуватися, оскільки $\beta_g^{Cr} = 1,5 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$, $\beta_g^{Co} = 3,2 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ і $\beta_g^{Ni} = 4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$. У той час, як на плівках Cr/Co і Co/Ni у залежності від товщини базисного шару може спостерігатися така ж або обернена тенденція. Слід відмітити, що розрахункові залежності $\beta(d_2)$, зроблені на основі співвідношення (4), мають аналогічний вигляд.

Узгодження розрахункових і експериментальних значень носить лише якісний характер (див. таблицю 1) і відрізняється на 20 - 70%. Це говорить про те, що поряд із розмірними ефектами мають місце й інші явища, які приводять до збільшення опору (відповідно - зменшення ТКО) двошарових плівок порівняно з очікуваним, про що і ведеться мова в параграфі 3.4. Серед причин, які впливають на величину $\frac{\beta_{\text{роз}} - \beta_{\text{екс}}}{\beta_{\text{роз}}} = \Delta\beta$, основними є взаємна дифузія атомів з одного шару в інший, технологічний фактор, термічні макронапруження. Таким чином, $\Delta\beta$ можна подати в такому вигляді: $\Delta\beta = (\Delta\beta)_{\text{диф}} + (\Delta\beta)_{\text{тех}} + (\Delta\beta)_S$, де $(\Delta\beta)_{\text{диф}}$, $(\Delta\beta)_{\text{тех}}$, $(\Delta\beta)_S$ - відносний вклад взаємної дифузії, технологічного фактора, термічних макронапружень у неспівпаданні розрахункових і експериментальних значень ТКО.

Термічні макронапруження можуть обумовити зміну ТКО на 2-5%. Роль технологічного фактора була з'ясована в експериментах, продубльованих в установках на основі пароструменевого і магніторозрядного насосів, і складає величину 16-20%. Основним фактором, який може вплинути на відмінність розрахункових значень і експериментальних

результатів, є процеси взаємної дифузії, які приводять до збільшення коефіцієнта розсіювання межі зерен, що ілюструє рис.4. Слід відмітити, що різниця виходу вторинних іонів металів на межі розділу шарів можна пояснити її дефектністю (вакансії, сегрегації домішкових атомів, мікроскопічні острівці хімічних сполук та сплавів типу заміщення) у невідпалених зразках та їх "заліковування" при відпалюванні.

Таблиця 1. Експериментальні та розрахункові значення ТКО

Зразок	d, нм		$\beta \cdot 10^3, K^{-1}$	
			Експериментальні результати	Розрахункові дані
Cr/Co *	80	40(Cr) 40(Co)	0,89	1,70
Cr/Co	80	40(Cr) 40(Co)	0,60	1,70
Co/Cr	70	25(Co) 45(Cr)	0,80	1,72
Co/Cr	130	75(Co) 55(Cr)	1,56	2,60
Co/Ni	45	25(Co) 20(Ni)	1,99	2,95
Ni/Co *	95	55(Ni) 40(Co)	2,00	3,70

*) Плівки, одержані в установці на основі магніторозрядного насоса.

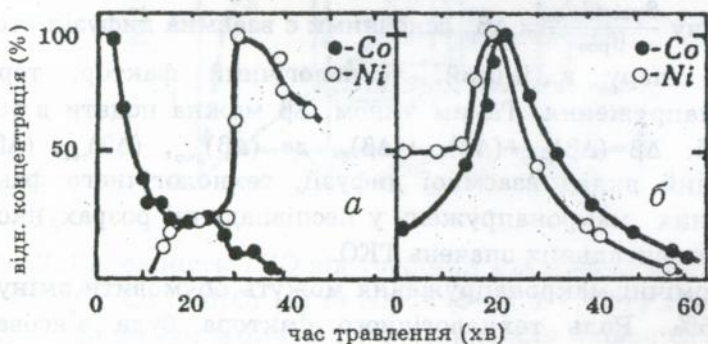


Рис.4. Дифузійні профілі для плівок Co/Ni в невідпаленому стані (а) і після рекристалізації (б). Товщина 3 мкм.

Четверта глава "Тензочутливість одно- та двошарових плівок на основі хрому, кобальту та нікелю" присвячена дослідженню тензочутливості одно- та двошарових плівок. У першому параграфі приводяться експериментальні дані з тензочутливості одношарових плівок Cr, Co та Ni. У плівках Cr і Ni з ростом товщини величина γ_l зменшується, прямуючи до асимптотичного значення $\gamma_{l\infty}$ в інтервалі товщин 20÷120 нм. У плівках Co спостерігається обернена тенденція в інтервалі товщин 20÷70 нм (рис.5,а).

У параграфі 4.2 представлені результати дослідження тензочутливості двошарових плівок. Згідно цих даних у плівках Co/Ni, Co/Cr, Ni/Cr та Cr/Ni зі зростанням товщини d_2 ($d_1 = \text{const}$) величина коефіцієнтів γ_l і γ_t зменшується як при малих, так і великих деформаціях (рис.5,б). Поряд із цим у плівках Ni/Co та Cr/Co в області малих та Cr/Co в області великих деформацій спостерігається протилежна залежність. Крім цього, величина γ_l завжди більша γ_t , як і у випадку одношарових плівок.

Порівняння з експериментальними результатами проводилось згідно двох співвідношень. Одне з них одержується по аналогії з (4) і має такий вигляд:

$$\gamma_l = \gamma_{l1} - \mu_{f1} + \gamma_{l2} - \mu_{f2} + \frac{d_1 \rho_2 \mu_{f2} + d_2 \rho_1 \mu_{f1}}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1} \quad (6)$$

$$\frac{d_1 \rho_2 (\gamma_{l2} - 2\mu_{f2} - 1) + d_2 \rho_1 (\gamma_{l1} - 2\mu_{f1} - 1)}{d_1 \rho_2 + d_2 \rho_1} - \frac{d_1 \mu_{f1} + d_2 \mu_{f2}}{d_1 + d_2} - 2,$$

а другим є співвідношення (2), в якому більш коректно використовувати замість β_{0l} величину β_{gl} .

Формула (6) відповідає експериментальним результатам у меншій мірі порівняно з (2), хоча і останнє дає лише якісну відповідність, що ілюструє таблиця 2.

Поряд із розмірними ефектами в тензочутливості була досліджена і її температурна залежність в інтервалі 200÷400К. Наші дані підтверджують висновок, зроблений іншими авторами на прикладі одношарових плівок про те, що правило $\beta_\gamma = -\beta$ не виконується.

Обробка та обговорення результатів із тензочутливості проводиться в третьому параграфі.

аналіз вказують на те, що у плівках Cr та Co і поверхневе, і розсіювання на межі зерен проявляється більш ефективно порівняно з плівками Ni. У той же час, у плівках Co відносно більшу роль відіграє розсіювання на межі зерен. Це, можливо, і обумовлює різний характер розмірної залежності коефіцієнтів тензочутливості від товщини у плівках Cr і Ni з одного боку і Co - з другого.

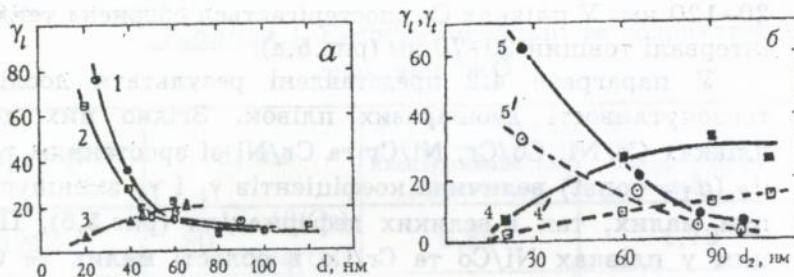


Рис.5. Розмірна залежність γ_l (1-5) і γ_t (4',5') для плівок Cr (1), Ni (2), Co (3) (a); Cr/Co - $d_1 = 90$ нм (4,4'), Co/Cr - $d_1 = 60$ нм (5,5') (б).

Таблиця 2. Експериментальні та розрахункові дані з тензочутливості двошарових плівок

Плівки	d_1 , нм	d_2 , нм	γ_t	
			Експериментальні результати	Розрахункові дані
Малі деформації ($\Delta \epsilon \approx 0 \div 0,06\%$)				
Co/Cr	60	65	21,0	13,2
	(Cr) 100		7,0	16,3
Ni/Co	30	60	14,4	3,6
	(Co) 80		23,3	1,4
Cr/Ni	30	60	8,7	4,9
	(Ni) 110		4,7	5,5
Великі деформації ($\Delta \epsilon \approx 0 \div 4\%$)				
Co/Cr	120	90	11,8	4,9
	(Cr) 110		9,7	4,5
Ni/Co	90	75	5,4	3,3
	(Co) 115		3,9	4,0
Cr/Ni	90	70	9,5	1,6
	(Ni) 110		1,5	1,0

Основним фактором, який істотно впливає як на хід розмірної залежності, так і на невідповідність розрахункових і експериментальних даних (таблиця 2), є взаємна дифузія атомів. Наші розрахунки показують, що найбільш чутливими до атомів іншого сорту є електрофізичні властивості плівок Co та Cr, що, мабуть, і впливає на хід розмірної залежності γ_l і γ_t в плівках Cr/Co та Ni/Co.

Згідно експериментальних даних, при напиленні верхнього шару величина коефіцієнтів тензочутливості двошарової плівки стає більшою порівняно з коефіцієнтами одношарової при умові $d_1=d_2=d$. Серед причин, які приводять до збільшення коефіцієнта тензочутливості двошарової плівки порівняно з одношаровою такої ж товщини, можна вказати появу нового механізму розсіювання - межі розділу шарів, площа якої може складати 9-12% від загальної площі межі зерен.

У цьому ж параграфі приведені експериментальні дослідження залежності коефіцієнта тензочутливості γ_l від часу витримки плівки у вакуумі (ресурс роботи). Згідно цих даних величина γ_l зменшується приблизно в 2 рази за 10-20 діб.

У заключній частині зроблені висновки, які формулюються так:

1. Експериментально показано, що на температурних залежностях опору і температурного коефіцієнта опору у двошарових плівках на основі Cr, Co, Ni та Nb спостерігаються особливості у таких характерних точках: θ_N^{Cr} (260÷310 К), θ_D^{Cr} (530÷580 К), θ_C^{Ni} (570÷600 К), θ_D^{Co} (460÷470 К), θ_1^{Co} (550÷600 К) і при температурі 370 К; ці особливості частково мають місце і в одношарових плівках.

2. Вперше методом чисельних розрахунків встановлено та експериментально підтверджено, що закономірності розмірного ефекта ТКО у двошарових плівках суттєво відрізняються від аналогічних для одношарових: із зростанням товщини верхнього шару ($d_1=\text{const}$) значення ТКО зростає (якщо $\beta_{g1} < \beta_{g2}$ або $\beta_1 < \beta_{g2}$) або зменшується (якщо $\beta_1 > \beta_{g2}$), виходячи на асимптотичне значення β_{g2} , у той час як у одношарових плівках ТКО із зростанням товщини лише

збільшується.

3. Методом вторинно-іонної мас-спектрометрії вперше досліджені процеси взаємної дифузії у плівкових системах на основі Cr та Co і Ni та Co; встановлено, що у плівках Co/Ni та Ni/Co у процесі термічного відпалювання має місце повне дифузійне перемішування атомів.

4. Проведений аналіз вказує на те, що основним фактором, який впливає на відмінність (до 70%) розрахункових даних для ТКО двошарових плівок згідно моделі Р.Дімміха та експериментальних результатів, є процеси взаємної дифузії атомів, що обумовлюють зміну коефіцієнта розсіювання електронів на межі кристалітів та коефіцієнта проходження межі окремих шарів.

5. Відносно більший внесок поверхневого (плівки Cr та Ni) або розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен (плівки Co) та, частково, взаємна дифузія атомів обумовлюють інверсію розмірної залежності (збільшення коефіцієнтів γ_l і γ_t при збільшенні товщини верхнього шару) у плівках Co, Ni/Co та Cr/Co порівняно з плівками Cr, Ni, Co/Cr, Co/Ni, Ni/Cr та Cr/Ni.

6. Вперше показано, що величина коефіцієнта повздовжньої тензочутливості у досліджених одношарових (Cr, Ni, Co) та двошарових (Cr/Co, Co/Cr, Ni/Co, Co/Ni, Cr/Ni, Ni/Cr) плівкових зразках відрізняється майже в два рази при відносно малих ($\Delta\varepsilon \cong 0 \div 0,06\%$) або великих ($\Delta\varepsilon \cong 1,0 \div 4,0\%$) повздовжніх деформаціях, які здійснюються різними методами - на згин або розтяг плівки з підкладкою, відповідно.

7. Вперше експериментально встановлено, що розсіювання носіїв електричного струму на межі розділу двох плівок обумовлює збільшення коефіцієнтів тензочутливості двошарових плівок порівняно з одношаровими такої ж товщини у такому співвідношенні: $\frac{\gamma_l}{\gamma_{l1}} \cong 1,3 \div 3,1$ та $\frac{\gamma_t}{\gamma_{t2}} \cong 1,4 \div 2,4$ (плівки Cr/Ni, Ni/Cr, Cr/Co, Co/Cr, Ni/Co), або $\frac{\gamma_l}{\gamma_{l1}} \cong 1,0 \div 1,1$ та $\frac{\gamma_t}{\gamma_{t2}} \cong 1,0 \div 1,1$ (плівки Co/Ni).

8. Дослідження температурної залежності коефіцієнтів

тензочутливості на прикладі плівок Cr/Co, Co/Ni дозволили зробити висновок, відомий для одношарових плівок хрому, ванадію та ін., що емпіричне правило $\beta_{\gamma} = -\beta$ не виконується.

9. Експериментальні дослідження ресурсу роботи двошарових плівок дозволяють розглядати їх у якості тензодатчиків для недовгострокової роботи (до 10-20 діб).

Література

1. El-Hiti M.A., Ahmed M.A. // Phys. Stat. Sol. (a). - 1989. - V. 114, №1. - P. 185 - 190.
2. Dimmich R. // Thin Solid Films. - 1988. - V. 158, №1. - P. 13 - 24.
3. Дехтярук Л.В., Колесниченко Ю.А. // ФММ. - 1993. - т. 75, №5. - С. 21 - 30.
4. Khater F., El-Hiti M. // Phys. Stat. Sol (a). - 1988. - V. 109, №2. - P. - 517 - 523.
5. Кузьменко А.И., Петренко С.В., Проценко И.Е. // ВАНТ. - 1990. - №2 (10). - С. 87 - 89.

Основні результати дисертації опубліковані

в таких роботах:

1. Кузьменко А.И., Проценко І.Ю., Черноус А.М. Апробація теоретичної моделі Дімміха для електропровідності двошарових металевих плівок/ Наукові праці Сумського педагогічного інституту. Серія: Фізика твердого тіла. - Суми: СДП. - 1993. - С.29 -34.
2. Орднорець Л.В., Проценко І.Ю., Черноус А.М., Шамо́ня В.Г. Залежність від температури опору багатшарових металевих плівок/ Наукові праці. Серія: Фізика твердого тіла. - Суми: СДП. - 1993. - С. 35-43.
3. Кузьменко А.И., Проценко І.Ю., Черноус А.М. Температурна залежність опору двошарових плівок кобальт/хром та кобальт/нікель / Матеріали IV Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок: Івано - Франківськ: ПДУ. -1993. - С. 392 - 393.
4. Проценко И.Е., Черноус А.Н., Яременко Л.А. Исследование температурной зависимости сопротивления двухслойных пленочных систем Co/Cr и Co/Ni// ВАНТ. - 1994. - №1(27). - С. 83-84.
5. Проценко И.Е., Петренко С.В., Черноус А.Н., Орднорець Л.В. Элементный состав и диффузионные

процессы в многослойных пленочных системах // ВАНТ. - 1994. - №1(27). - С. 88 - 89.

6. Проценко І.Ю., Чорноус А.М. Розмірний ефект в елетропровідності двошарових полікристалічних плівок в умовах взаємної дифузії металів // Вісник Сумського університету. - 1994. - №1. - С. 19-25.

7. Проценко И.Е., Чорноус А.Н. Тензочувствительность одно- и двухслойных пленок на основе хрома, никеля и кобальта // Металлофизика и новейшие технологии. - 1994. - Т.16, №12. - С. 18-23.

8. Чорноус А.Н., Шовкопляс О.В., Яременко Л.А. Исследование тензоэффекта в одно- и двухслойных пленках переходных металлов/ Материалы научно- технической конференции "Техника и физика электронных систем и устройств". - Сумы: СумГУ. - 1995. - С. 288-289.

9. Protsenko I., Petrenko S., Odnodvoretz L. Chornous A. Size Effect and Processes of Interdiffusion in Multi-Layer Films// Cryst. Res. Technol. - 1995. - V.30, №8. - P. 1077-1081.

10. Проценко І.Ю., Однодворець Л.В., Чорноус А.М. Тензочутливість багатошарових плівок на основі перехідних d-металів та напівпровідників/ Матеріали Міжнародної наукової конференції присвяченої 150-річчю від дня народження Івана Пулюя. - Львів: УЛП. - 1995. - С. 190.

АННОТАЦИЯ

Чорноус А.Н. Размерные явления в электропроводности и тензочувствительности двухслойных плёнок.

Дисертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.07 - физика твердого тела, Сумский государственный педагогический институт, Сумы, 1995.

К защите представлены результаты исследований, изложенные в семи научных статьях по физике тонких двух-слойных металлических пленок. на основе Cr, Co, Ni и Nb. Изучена размерная и температурная зависимость сопротивления, температурного коэффициента сопротивления, коэффициентов тензочувствительности. Проведена апробация теоретической модели Р.Диммиха для электропроводности

и теории тензoeffекта двухслойных металлических пленок.

Ключові слова тонкі двошарові плівки, перехідні *d*-метали, розмірні явища, розсіювання на межі зерен, межа розділу шарів, електропровідність, тензочутливість.

ABSTRAKT

Anatolii M. Chornous. Size Phenomena in Conductivity and Tenzosensibility of Double-Layer Films.

The dissertation (manuscript) for the obtaining of the scientific degree of the candidate of science in the mathematics and physics corresponding to the speciality 01.04.07 - solid state physics, Sumy State Pedagogical Institute, Sumy, 1995.

There are 7 scientific papers on physics of thin double-layer metals films in base Cr, Co, Ni represented on defense. Temperature and size dependence of the resistence, temperature coefficient of resistence, strain coefficient of resistence were studied. Theoretical model of R.Dimmich for conductivity and theory of tenzosensibility in double-layer metals films were checked.

Ця робота була частково підтримана Міжнародною Соросівською програмою підтримки освіти в галузі точних наук (ISSEP), грант № PSU052138.

Ав 33.796

Чорноус Анатолій

**РОЗМІРНІ ЯВИЩА В ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ І
ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ ДВОШАРОВИХ ПЛІВОК**

відповідальний за випуск
Проценко Іван Юхимович

Підписано до друку 28 грудня 1995р.
Формат набору 60x90 1/16 умов. друк. арк.
Тираж 110 екз.

СумДУ 244007, Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.

Друкарня ВО "Електрон"
244007, Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.