

PACS numbers: 68.55.Jk, 72.10.Fk, 73.25.+i, 73.50.Gr, 73.50.Lw, 73.61.At, 73.63.Bd

## Електрофізичні властивості нанокристалічних плівок кобальту із покриттям Ni або SiO<sub>2</sub>

Т. П. Говорун, Л. В. Дехтярук, А. М. Черноус

Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2,  
40007 Суми, Україна

Експериментально досліджено електрофізичні властивості (питомий опір, температурний коефіцієнт опору) нанокристалічних плівок Co з тонким покриттям із Ni або SiO<sub>2</sub>. На основі аналізу результатів розрахунку параметрів електроперенесення з використанням моделей Тельє–Тоссе–Пішар, Маядаса–Шатцкеса та Ухлінова–Косаківської показано, що вплив тонкого покриття із Ni або SiO<sub>2</sub> призводить до зменшення температурного коефіцієнта опору за рахунок зміни умов розсіяння на поверхні плівки та по межах зерен.

Експериментально исследованы электрофизические свойства (удельное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления) нанокристаллических пленок Co с тонким покрытием из Ni или SiO<sub>2</sub>. На основе анализа результатов расчета параметров электропереноса с использованием моделей Телье–Тоссе–Пичар, Маядаса–Шатцкеса и Ухлинова–Косаковской показано, что влияние тонкого покрытия из Ni или SiO<sub>2</sub> приводит к уменьшению температурного коэффициента сопротивления в результате изменения условий рассеяния на поверхности пленки и по границам зерен.

Electrophysical properties (resistivity, temperature coefficient of resistance) of nanocrystalline films of Co with thin Ni or SiO<sub>2</sub> coating are experimentally investigated. The analysis of calculated parameters of electric-charge transport within the frameworks of the Tellier–Tosser–Pichard, Mayadas–Shatzkes and Ukhlinov–Kosakovskaya models shows that thin Ni or SiO<sub>2</sub> coating leads to the reduction of temperature coefficient of resistance because of the change of conditions of scattering from a film surface and by grain boundaries.

**Ключові слова:** електрофізичні властивості, нанокристалічні плівки, внутрішній і зовнішній розмірні ефекти, коефіцієнт розсіяння на межі зерна, параметер дзеркальності зовнішньої поверхні.



хонь. За подібної методикою у роботі [6] виконували дослідження розмірного ефекту ТКО плівок нікелю з тонким покриттям із Cu. Розрахунки параметрів електроперенесення показали, що умови розсіяння носіїв електричного заряду на внутрішніх і зовнішніх межах плівки після нанесення покриття зазнають змін.

З урахуванням сказаного вище метою даної роботи стало дослідження електрофізичних властивостей нанокристалічних плівок Co з тонким покриттям із Ni або SiO<sub>2</sub>. Треба відмітити той факт, що плівки нанокристалічного кобальту з підшаром зі стопу NiAl або Cr використовуються як матеріал магнетного шару пристроїв пам'яті, де можна досягти великої густини запису інформації [7], а останнім часом спостерігається постійний інтерес до вивчення комплексу властивостей тонких шарів Co і наночастинок Co [8–11].

## 2. МЕТОДИКА ОДЕРЖАННЯ ЗРАЗКІВ І ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Конденсація плівок Co здійснювалася методом електронно-променевого випаровування на поліровані підложжя із полікору ВК-100. На підложжя попередньо було нанесено контактні майданчики потрібної конфігурації Cu(150–200)/Cr(30–50)/П (у дужках вказано товщину в нм, П — підложжя), що давало можливість одночасно одержувати три плівкових зразки базисної плівки однакових геометричних розмірів і товщини. Для вимірювання опору за двоточковою схемою цифровими вольтметрами використовувались притискні контакти із ніхромових пластин. Температура підкладки ( $T_{\text{п}}$ ) під час осадження Co була близькою до температури Дебая для масивних зразків Co ( $\Theta_{\text{0D}} = 385 \text{ K}$  [12]), що обумовлює низьку концентрацію дефектів кристалічної будови та мінімальне значення електричного опору у щойно сконденсованих зразках [13]. Тонкі покриття ( $d \leq 1\text{--}2 \text{ нм}$ ) наносили методом термічного випаровування.

Схема проведення експериментів була наступною:

1-й етап — одержання трьох плівкових зразків Co з однаковими геометричними розмірами і товщиною при  $T_{\text{п}} \approx 385 \text{ K}$  з наступним охолодженням до кімнатної температури;

2-й етап — відпалювання плівок за схемою «нагрівання ↔ охолодження» протягом двох-трьох циклів в інтервалі температур 300–650 K для термостабілізації електрофізичних властивостей і заліковування дефектів кристалічної будови;

3-й етап — нанесення тонкого покриття із Ni або SiO<sub>2</sub>;

4-й етап — відпалювання зразків протягом 1–2 циклів в інтервалі температур 300–650 K;

5-й етап — охолодження плівок у вакуумі за допомогою рідко-



PACS numbers: 68.55.Jk, 72.10.Fk, 73.25.+i, 73.50.Gr, 73.50.Lw, 73.61.At, 73.63.Bd

## Електрофізичні властивості нанокристалічних плівок кобальту із покриттям Ni або SiO<sub>2</sub>

Т. П. Говорун, Л. В. Дехтярук, А. М. Черноус

*Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2,  
40007 Суми, Україна*

Експериментально досліджено електрофізичні властивості (питомий опір, температурний коефіцієнт опору) нанокристалічних плівок Co з тонким покриттям із Ni або SiO<sub>2</sub>. На основі аналізу результатів розрахунку параметрів електроперенесення з використанням моделей Тельє–Тоссе–Пішар, Маядаса–Шатцкеса та Ухлінова–Косаківської показано, що вплив тонкого покриття із Ni або SiO<sub>2</sub> призводить до зменшення температурного коефіцієнта опору за рахунок зміни умов розсіяння на поверхні плівки та по межах зерен.

Експериментально исследованы электрофизические свойства (удельное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления) нанокристаллических пленок Co с тонким покрытием из Ni или SiO<sub>2</sub>. На основе анализа результатов расчета параметров электропереноса с использованием моделей Телье–Тоссе–Пичар, Маядаса–Шатцкеса и Ухлинова–Косаковской показано, что влияние тонкого покрытия из Ni или SiO<sub>2</sub> приводит к уменьшению температурного коэффициента сопротивления в результате изменения условий рассеяния на поверхности пленки и по границам зерен.

Electrophysical properties (resistivity, temperature coefficient of resistance) of nanocrystalline films of Co with thin Ni or SiO<sub>2</sub> coating are experimentally investigated. The analysis of calculated parameters of electric-charge transport within the frameworks of the Tellier–Tosser–Pichard, Mayadas–Shatzkes and Ukhlinov–Kosakovskaya models shows that thin Ni or SiO<sub>2</sub> coating leads to the reduction of temperature coefficient of resistance because of the change of conditions of scattering from a film surface and by grain boundaries.

**Ключові слова:** електрофізичні властивості, нанокристалічні плівки, внутрішній і зовнішній розмірні ефекти, коефіцієнт розсіяння на межі зерна, параметер дзеркальності зовнішньої поверхні.



(Отримано 15 січня 2007 р.)

## 1. ВСТУП

Сегрегація чужих атомів на зовнішніх поверхнях і межах зерен у плівках металів повинна викликати зміну умов розсіяння і, як наслідок, вплинути на електрофізичні властивості зразків [1,2]. Останнім часом вивченню властивостей плівкових матеріалів з тонким покриттям, у яких відбувається або не відбувається дифузія атомів тонкого покриття у базисну плівку, приділяється досить велика увага. Так, у роботі [3] досліджується комплекс властивостей монокристалічних плівок  $\text{Cu}(100)$  з полімерним покриттям на поверхні. Аналізуючи результати цієї роботи, можна відмітити, що різке збільшення електричного опору (до декількох відсотків) та різке зменшення коефіцієнта відбиття світла відбуваються при утворенні на поверхні острівкового покриття, яке пов'язане з погіршенням дзеркальності зовнішньої поверхні плівки для носіїв заряду. При зростанні острівців у суцільний моношар та наступному нарощуванні шарів фактично не спостерігається збільшення опору.

Аналогічно на умови розсіяння носіїв заряду на зовнішніх межах впливає утворення на них острівкового покриття не тільки з діелектричних матеріалів, але й з металевих. Зокрема авторами [4] показано, що при нанесенні тонкого острівкового покриття із  $\text{Co}$  на плівку  $\text{Cu}$  її опір спочатку збільшується, а після зростання острівців у суцільний шар — зменшується. При одержанні тонкого покриття із  $\text{Cu}$  на поверхні плівки  $\text{Co}$  острівці не утворюються і, як наслідок, не спостерігається збільшення опору.

Цитовані вище роботи стосуються переважно монокристалічних плівок, де покриття впливає на розсіяння носіїв заряду на зовнішніх поверхнях плівкових зразків.

Вплив тонкого покриття із  $\text{Ni}$  на електрофізичні властивості плівок  $\text{Cu}$  вивчено у роботі [5]. Конденсація тонкого ( $d \leq 1-2$  нм) шару нікелю призводить до збільшення електричного опору системи після її термообробки і, відповідно, до зменшення ТКО плівки з покриттям. Після обробки результатів досліджень виявлено, що нанесення покриття на поверхню плівки  $\text{Cu}$  призводить до зменшення ймовірності дзеркального розсіяння носіїв заряду. Подальша аналіза показала, що внаслідок дифузії атомів  $\text{Ni}$  по межах зерен у плівках  $\text{Cu}$  вони стають менш прозорими для електронів провідності. Таким чином, при нанесенні тонкого покриття з  $\text{Ni}$  на суцільну плівку з  $\text{Cu}$  ТКО зменшується під дією двох факторів: за рахунок зменшення прозорості меж зерен у результаті дифузії атомів  $\text{Ni}$  та збільшення дифузності зовнішніх повер-



хонь. За подібної методикою у роботі [6] виконували дослідження розмірного ефекту ТКО плівок нікелю з тонким покриттям із Cu. Розрахунки параметрів електроперенесення показали, що умови розсіяння носіїв електричного заряду на внутрішніх і зовнішніх межах плівки після нанесення покриття зазнають змін.

З урахуванням сказаного вище метою даної роботи стало дослідження електрофізичних властивостей нанокристалічних плівок Co з тонким покриттям із Ni або SiO<sub>2</sub>. Треба відмітити той факт, що плівки нанокристалічного кобальту з підшаром зі стопу NiAl або Cr використовуються як матеріал магнетного шару пристроїв пам'яті, де можна досягти великої густини запису інформації [7], а останнім часом спостерігається постійний інтерес до вивчення комплексу властивостей тонких шарів Co і наночастинок Co [8–11].

## 2. МЕТОДИКА ОДЕРЖАННЯ ЗРАЗКІВ І ВИКОНАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Конденсація плівок Co здійснювалася методомом електронно-променевого випаровування на поліровані підложжя із полікору ВК-100. На підложжя попередньо було нанесено контактні майданчики потрібної конфігурації Cu(150–200)/Cr(30–50)/П (у дужках вказано товщину в нм, П — підложжя), що давало можливість одночасно одержувати три плівкових зразки базисної плівки однакових геометричних розмірів і товщини. Для вимірювання опору за двоточковою схемою цифровими вольтметрами використовувались притискні контакти із ніхромових пластин. Температура підкладки ( $T_{\text{п}}$ ) під час осадження Co була близькою до температури Дебая для масивних зразків Co ( $\Theta_{\text{од}} = 385 \text{ К}$  [12]), що обумовлює низьку концентрацію дефектів кристалічної будови та мінімальне значення електричного опору у щойно сконденсованих зразках [13]. Тонкі покриття ( $d \leq 1\text{--}2 \text{ нм}$ ) наносили методомом термічного випаровування.

Схема проведення експериментів була наступною:

1-й етап — одержання трьох плівкових зразків Co з однаковими геометричними розмірами і товщиною при  $T_{\text{п}} \approx 385 \text{ К}$  з наступним охолодженням до кімнатної температури;

2-й етап — відпалювання плівок за схемою «нагрівання ↔ охолодження» протягом двох-трьох циклів в інтервалі температур 300–650 К для термостабілізації електрофізичних властивостей і заліковування дефектів кристалічної будови;

3-й етап — нанесення тонкого покриття із Ni або SiO<sub>2</sub>;

4-й етап — відпалювання зразків протягом 1–2 циклів в інтервалі температур 300–650 К;

5-й етап — охолодження плівок у вакуумі за допомогою рідко-



го азоту до температури 110 К.

Вимірювання опору здійснювали за допомогою цифрового вольтметра В7-38 з точністю  $\pm 0,005$  Ом, температура відпалювання фіксувалася мідь-константановою термопарою, що мала безпосередній контакт з підложжям, з використанням вольтамперметра М2051 (точність  $\pm 0,05$  мВ), товщина плівок вимірювалася інтерферометричною метою (інтерферометр Лінника). Структурні характеристики плівок і їх фазовий склад вивчалися методами електроннографії та просвітлювальної електронної мікроскопії. Термічну обробку зразків для проведення електронно-мікроскопічних досліджень здійснювали за тих же умов, що і для вивчення електрофізичних властивостей. Дослідження кристалічної структури плівок Со після термовідпалювання (рис. 1, б) показало, що вони перебувають у нанокристалічному стані і мають двофазний склад. На електроннограмі (рис. 1, а) поряд з ліні-

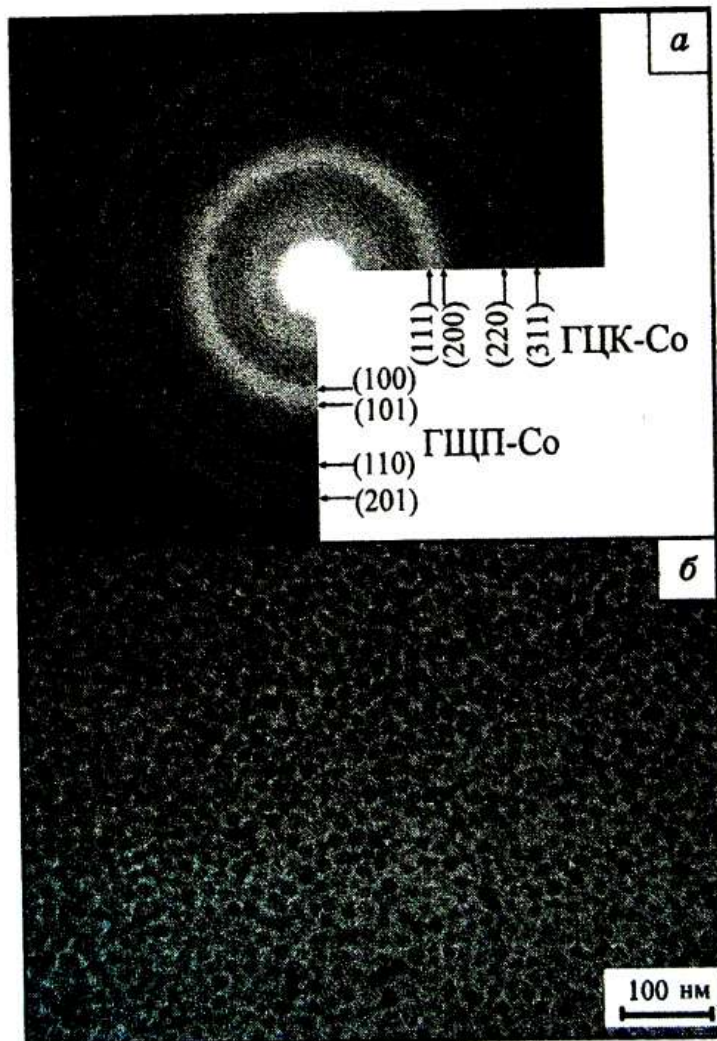


Рис. 1. Мікроструктура (б) плівкового зразка Со завтовшки 40 нм та відповідна їй електроннограма (а).



ями, які належать ГЦП-Co ( $\alpha$ -фаза), фіксуються дві лінії (111) і (200) для ГЦК-Co ( $\beta$ -фаза). Відбиття, які відповідають  $\beta$ -Co, належать дефектам пакування (ДП)  $\alpha$ -Co, оскільки, згідно з [14], області ДП є ділянками  $\beta$ -Co. Фазовий склад плівкових зразків Co не змінюється після нанесення тонких покриттів з Ni або SiO<sub>2</sub> та після відповідного термовідпалювання. Обробка результатів електронно-мікроскопічних досліджень показала, що середній розмір зерна ( $L$ ) для гексагональної фази слабо залежить від товщини і становить 10–20 нм.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Розмірну залежність питомого опору ( $\rho$ ) для плівкових зразків Co проілюстровано на рис. 2, а. На ньому ж наведено залежності, одержані іншими авторами [15, 16] за температури вимірювання  $T = (300-320)$  К як у вакуумі  $P \sim 10^{-3}$  Па [16], так і в вакуумі  $P \sim 10^{-6}$  Па [15]. Аналізуючи наведені на рис. 2, а результати, відмітимо фактичне їх узгодження по порядку величини, хоча абсолютне значення питомого опору дещо відрізняється. На відміну від значення питомого опору  $\rho$ , величина ТКО ( $\beta$ ), одержана як в наших експериментах, так і в роботах [15, 16], відрізняється більш суттєво (рис. 2, б). Зокрема, згідно з нашими даними, величина  $\beta_{\infty} = \lim_{d \rightarrow \infty} \beta$  при  $T = (300-320)$  К складає  $4,6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ , в той час як з результатів інших робіт випливає, що  $\beta_{\infty} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$  [15] і  $\beta_{\infty} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$  [16] ( $\beta_0 = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$  [12]).

Електрофізичні властивості визначаються вакуумними умовами одержання плівкових зразків. Тут важливу роль відіграють, поряд зі ступенем вакууму ( $P$ ), швидкість конденсації ( $\omega$ ) та температура підкладки. Вказані три фактори визначають величину параметра конденсації  $\alpha = P/(\omega T_{\Pi}^{1/2})$  [17]. Згідно з даними роботи [17] одержати достатньо чисті плівкові зразки можна при меншому ступені вакууму, але при вищих значеннях швидкості конденсації і температури підложжя. Відмітимо, що в наших експериментах температура підложжя була близькою до температури Дебая для масивних зразків кобальту. У роботі [13] аналізується питання про вплив температури підложжя на електрофізичні властивості плівок міді товщиною 12–200 нм, одержані при температурах від 280 до 350 К. Вимірювання величини електричного опору термостабілізованих плівок показало, що він має мінімальне значення, якщо зразки одержано за температури, яка відповідає температурі Дебая. Цей результат пояснюється авторами [13] мінімальним значенням густини дефектів кристалічної будови у щойно сконденсованих плівках, які одержано за  $T_{\Pi} \cong \Theta_{0D}$ .

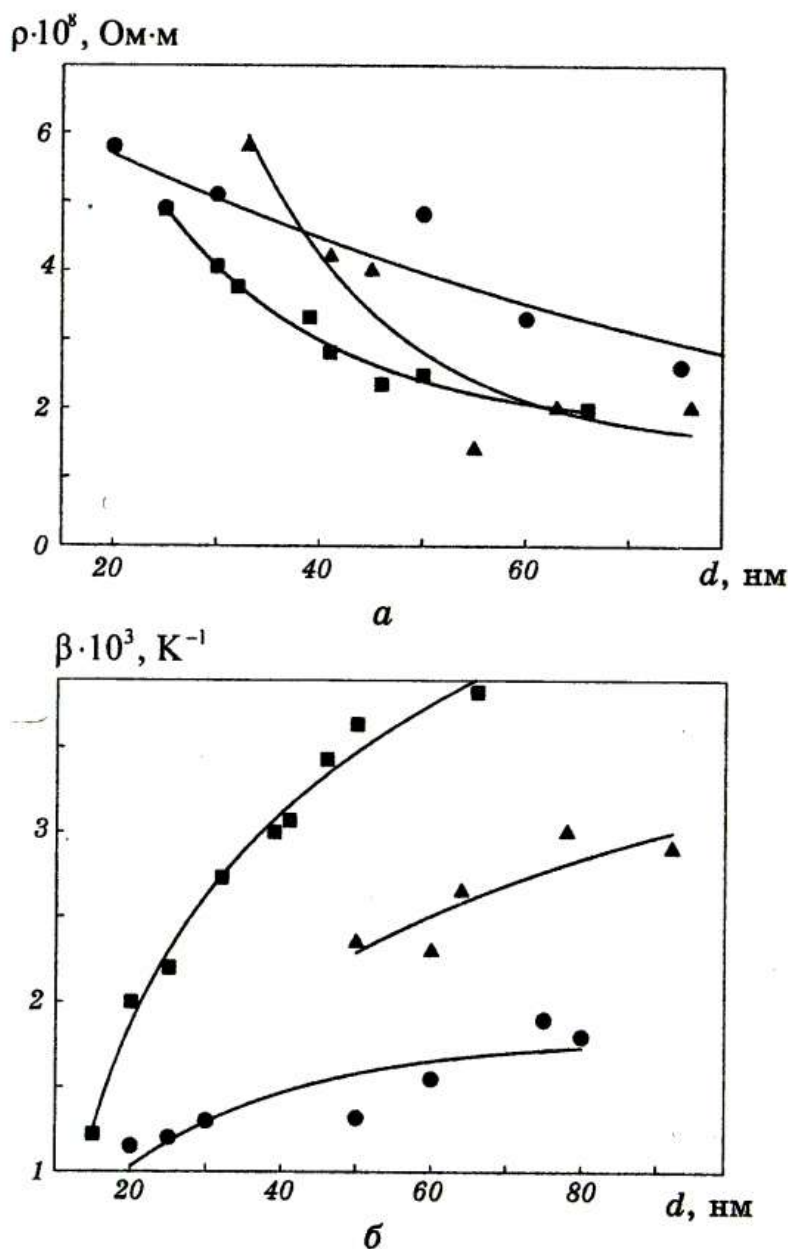


Рис. 2. Залежність питомого опору (а) і ТКО (б) від товщини для плівок кобальту: ■ — наші дані ( $P \sim 10^{-3}-10^{-4}$  Па); ▲ — дані роботи [15] ( $P \sim 10^{-6}$  Па); ● — дані роботи [16] ( $P \sim 10^{-3}$  Па).

Поряд з цим розрахунок [13] значень  $\rho_\infty = \lim_{d \rightarrow \infty} \rho$ , середньої довжини вільного пробігу (СДВП) носіїв заряду і коефіцієнта дзеркальності  $r$  показав, що величини  $\rho_\infty$  та  $r$  мають мінімальні значення, а СДВП — відповідно максимальне. Таким чином, не виключено, що головний фактор, який впливає на величину питомого опору, пов'язаний з температурою підложжя при одержанні плівок, яка була, як сказано вище, близькою до температури Дебая.

Розглянемо, як впливає на величину ТКО плівок  $S_0$  нанесення



на їх поверхню тонкого покриття з Ni або SiO<sub>2</sub>. Вибір нікелю як тонкого покриття обумовлений високою взаємною розчинністю у системі Co–Ni [18]. У цьому випадку покриття буде мати високий коефіцієнт акомодатії, тобто атоми повинні швидше продифундувати в об'єм плівки, але, оскільки Co знаходиться в нанокристалічному стані, а зерномежова дифузія має значно вищу швидкість, ніж об'ємна [19], то, на наш погляд, слід очікувати зміну умов розсіяння носіїв заряду на межах зерен плівки Co внаслідок дифузії по них атомів Ni. На відміну від покриття із Ni покриття із SiO<sub>2</sub> повинно призводити лише до зміни умов поверхневого розсіяння. Відмітимо, що шар із SiO<sub>2</sub> часто використовується як захисне покриття для мікроелектронних структур [20].

На рис. 3 наведено залежності ТКО від товщини (для  $T = 300$  К) на основі температурних залежностей опору для 2-го і 3-го термостабілізаційних циклів. Як видно з приведених на цьому рисунку результатів, для плівок однакової товщини без покриття в усіх випадках всі три значення ТКО, розраховані за 2-м циклом, узгоджуються в межах похибки експерименту. Також спостерігається узгодження даних із величиною ТКО плівок Co без покриття, які визначено за 3-м термостабілізаційним циклом.

Порівнюючи дані про величину ТКО для плівок Co/П та Ni/Co/П, наведених на рис. 3, відмітимо той факт, що в останньому випадку значення температурного коефіцієнта опору нижче. Така ситуація спостерігається і за інших температур вимірювання (рис. 4). На величину ТКО  $\beta = (1/\rho)(\Delta\rho/\Delta T)$  впливає два фактори. По-перше, це температурна зміна електричного опору, а

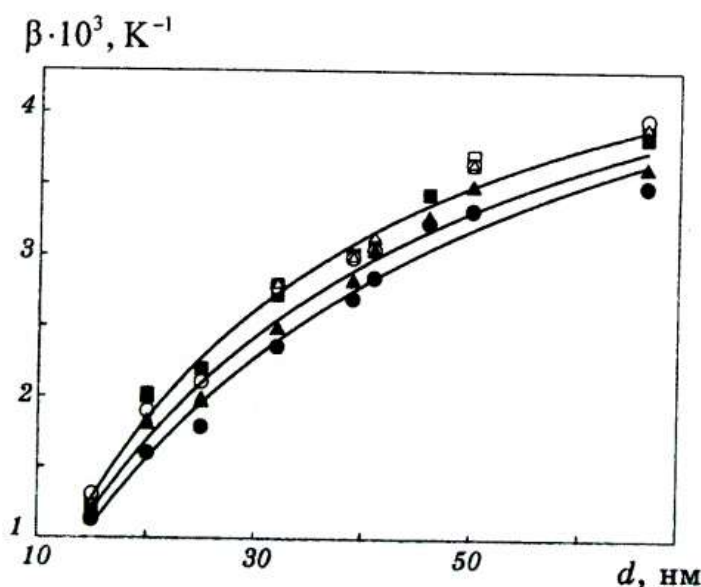


Рис. 3. Залежність ТКО від товщини при температурі  $T = 300$  К для плівок:  $\square, \circ, \Delta, \blacksquare$  — Co/П;  $\bullet$  — Ni/Co/П і  $\blacktriangle$  — SiO<sub>2</sub>/Co/П (світлі і темні точки — другий і третій термостабілізаційні цикли відповідно).



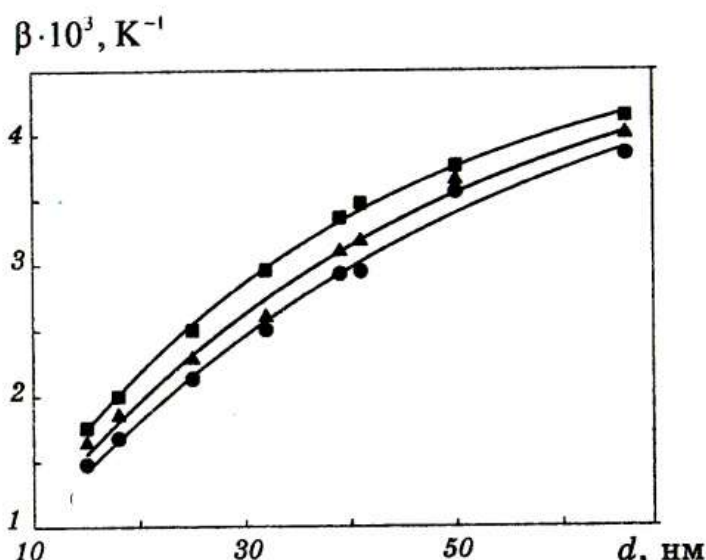


Рис. 4. Залежність ТКО від товщини за температури  $T = 130$  К для плівок: ■ — Co/П; ● — Ni/Co/П і ▲ — SiO<sub>2</sub>/Co/П.

по-друге — зміна тангенса кута нахилу (чутливість) температурної залежності ( $\Delta\rho/\Delta T$ ). Проаналізуємо, який з цих двох факторів в нашому випадку дає більший внесок у величину ТКО.

Співставлення між собою значень питомого опору плівок після другого ( $\rho_2$ ) і третього ( $\rho_3$ ) циклів термовідпалювання вказує на зменшення питомого опору при нанесенні тонкого покриття з Ni. Відмітимо, що різниця ( $\rho_3 - \rho_2$ ) є розмірно-залежною величиною. З наведених на рис. 5, а даних випливає, що для відносно тонких базисних плівок Co ( $\rho_3 - \rho_2$ ) має більшу величину. Тут слід зазначити, що у плівках без покриття опір також після проведення 3-го циклу термостабілізації є нижчим, ніж після 2-го. Але порівняння відносного зменшення питомого опору  $|\rho_3 - \rho_2 / \rho_2|$  за рахунок додаткового циклу термообробки та за рахунок впливу покриття показує, що воно відрізняється у 2–4 рази. Наприклад, для плівок Co товщиною 30, 32 і 66 нм  $|\rho_3 - \rho_2 / \rho_2|$  складає 0,05, 0,03 і 0,008, в той час як для плівок Ni/Co/П ця зміна становить 0,10, 0,10 і 0,04, відповідно.

З наведених даних випливає, що якби цей фактор відігравав ключову роль, то величина ТКО з нанесенням покриття повинна б збільшуватися, у нас же спостерігається зворотня тенденція. Як видно з рис. 5, б, у плівках Ni/Co/П відбувається зменшення значення  $\Delta\rho/\Delta T$  порівняно з плівками Co/П. Таким чином, зменшення ТКО у плівках з тонким покриттям обумовлено зміною чутливості і  $\Delta\rho/\Delta T$ , яка у них має меншу величину, ніж у плівках Co без покриття, де чутливість при 2-му і 3-му циклах співпадає в межах похибки експерименту.

Нанесення тонкого покриття із SiO<sub>2</sub> викликає незначне змен-



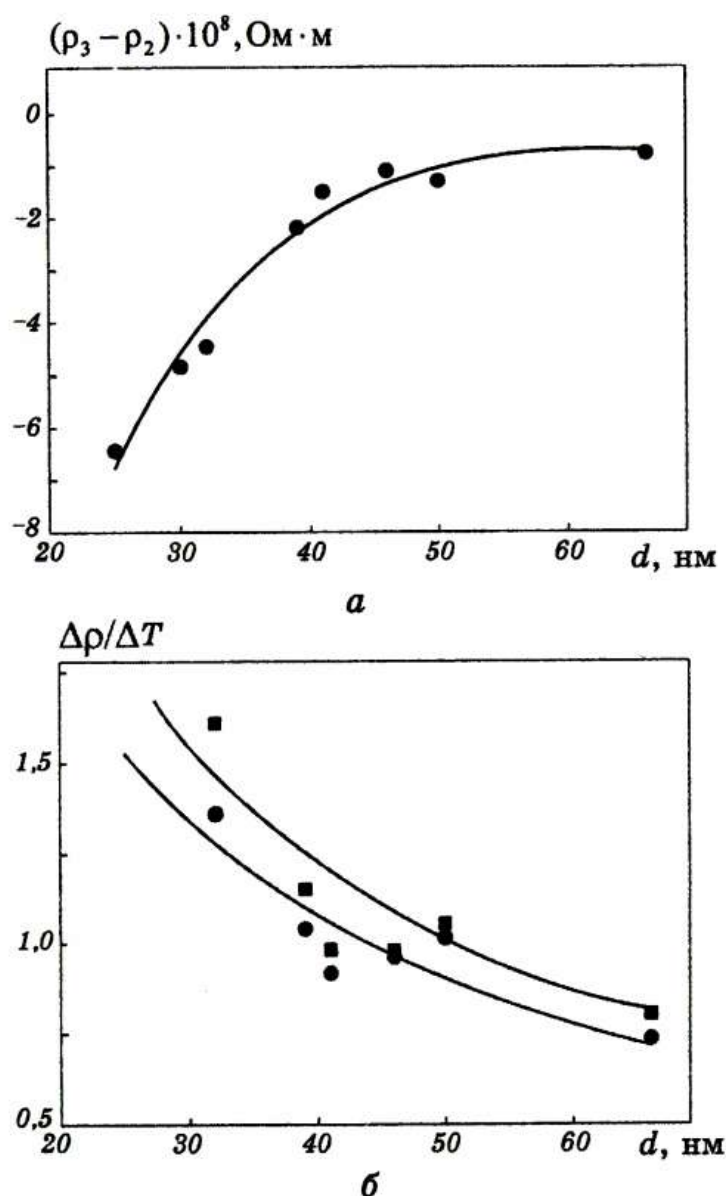


Рис. 5. Залежність від товщини різниці опору  $(\rho_3 - \rho_2)$  у плівках Ni/Co/П і Co/П (а) та чутливості  $(\Delta\rho/\Delta T)$  для плівок Co/П (■) і Ni/Co/П (●) (б).

шення ТКО (рис. 3, 4). Аналіза показує, що на величину  $\beta$  цих плівок також головним чином впливає зміна  $\Delta\rho/\Delta T$ .

Оброблення результатів з розмірної залежності ТКО з метою визначення параметрів електроперенесення провадилося з використанням співвідношень лінеаризованого моделю та моделю ізотропного розсіяння Тельє, Тоссе і Пішар (ТТП) [21]. У рамках лінеаризованого моделю ТТП робоче співвідношення є наступним:

$$\beta d \cong \beta_\infty d - \beta_\infty \lambda(1-p)H(\alpha), \quad (1)$$



де  $\lambda$  — СДВП в об'ємі плівки;  $H(\alpha)$  — функція, пов'язана з зерномежовим розсіянням електронів;  $\alpha$  — параметер розсіяння електронів на межі зерна.

Для моделю ізотропного розсіяння ТТП робочі співвідношення мають наступний вигляд:

$$\beta^{-1}d \cong \beta_{\infty}^{-1}d + \frac{3}{8}\beta_0^{-1}\lambda \ln(p^{-1}), \quad (2)$$

$$\beta_{\infty}\beta_0^{-1} \cong \left[1 + 1,45L^{-1}\lambda \ln(r^{-1})\right]^{-1}, \quad (3)$$

$$R(1 - R)^{-1} \cong 0,97 \ln(r^{-1}), \quad (4)$$

де  $\beta_0$  — ТКО масивного зразка.

У таблиці 1 наведено розраховані на основі співвідношень (1)–(4) значення параметрів електроперенесення для плівок Со з покриттям та без нього, визначення яких здійснювалось за різних значень температури. При розрахунку параметрів електроперенесення було припущено, як і у роботах [1, 2, 5, 6], що нанесення тонкого шару покриття змінює не значення СДВП, а лише умови розсіяння на зовнішніх і внутрішніх межах. Значення ТКО масивних зразків Со за різних температур було взято із [12]. У цій же таблиці для порівняння наведено дані робіт [15, 16]. Співставлення між собою наших результатів і одержаних авторами [15, 16] показує, що величина СДВП, параметра дзеркальності і коефіцієнта проходження меж зерен у більшості випадків узгоджується в межах похибки їх визначення, а значення коефіцієнта  $R$  у нашому випадку є дещо нижчими. Хоча слід відмітити, що величини СДВП, одержані нами, можливо мають завищене значення, оскільки плівки Со перебувають в нанокристалічному стані.

Проаналізуємо, як впливає нанесення покриття на плівку Со на параметри електроперенесення. Як видно із наведених в табл. 1 результатів, наявність покриття з  $\text{SiO}_2$  спричиняє погіршення дзеркальності зовнішньої поверхні плівки, що узгоджується з висновками роботи [22], оскільки чужі атоми або молекули, сегреговані на поверхні, змінюють її рельєф. Подібний результат спостерігався нами і у плівках Ni/Cu/П та Cu/Ni/П [5, 6]. Порівнюючи між собою дані про вплив покриття із  $\text{SiO}_2$  на параметер дзеркальності у плівках Cu і Ni [2, 5, 6] та Со, відмічаємо той факт, що він сильніший у випадку плівок Cu, яка з усіх розглянутих металів має найбільший розмір зерна, а найменший вплив має місце у нанокристалічних плівках Со. Наявність покриття із Ni у плівках Со також призводить до зміни параметра  $p$ . Що стосується коефіцієнтів  $R$  і  $r$ , то у випадку плівок Ni/Со/П зміна коефіцієнта проходження межі зерна становить 2–3%, причому величина  $r$  зменшується, в той час як значення коефіцієнта розсіяння



ТАБЛИЦЯ 1. Параметри електроперенесення в плівках Co/П, Ni/Co/П та SiO<sub>2</sub>/Co/П.

Плівка ( <i>d</i> , нм)	<i>T</i> , К	$\beta_{\infty} \cdot 10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	$\lambda(1-p)$ , нм	<i>p</i>	<i>R</i>	<i>r</i>	Примітка
Co/П (50–100)	320	3,2	45,3– 58,7	–	0,27– 0,40	–	[15], модель ТТП ефективної довжини вільного пробігу, $L \approx (0,5–0,6)d$
Co/П (20–90)	300	2,5	36,5	–	0,10– 0,41	–	[16], лінеаризований модель ТТП
Co/П (20–90)	300	–	36,5	0,05	0,12– 0,46	0,87– 0,53	[16], модель ТТП ізотропного розсіяння
Co/П (20–90)	300	–	–	0,001	–	0,99– 0,87	[16], тривимірний модель ТТП
Co/П (20–66)	130	5,6	53,1	0,10	0,07	0,92	лінеаризований
	210	5,4	48,5	0,08	0,08	0,91	модель + модель
	300	4,6	42,2	0,11	0,12	0,86	ТТП ізотропного
	450	3,0	39,7	0,03	0,25	0,71	розсіяння, $L \approx 20$ нм
Ni/Co/П (20–66)	130	5,1	53,1	0,05	0,09	0,90	лінеаризований
	210	4,9	48,5	0,07	0,10	0,89	модель + модель
	300	4,3	42,2	0,06	0,14	0,84	ТТП ізотропного
	450	2,8	39,7	0,02	0,27	0,68	розсіяння, $L \approx 20$ нм
SiO <sub>2</sub> /Co/П (20–66)	130	5,3	53,1	0,06	0,08	0,91	лінеаризований
	210	5,1	48,5	0,08	0,09	0,90	модель + модель
	300	4,4	42,2	0,02	0,13	0,85	ТТП ізотропного
	450	2,9	39,7	0,02	0,26	0,69	розсіяння, $L \approx 20$ нм

збільшується в середньому на 0,02.

Така зміна коефіцієнтів *R* і *r* свідчить про те, що межі зерен більше розсіюють за рахунок дифузії по них атомів Ni. Але дані про зміну питомого опору свідчать про зворотнє, оскільки величина опору зменшується у плівках Ni/Co/П. Якщо б величина ТКО із нанесенням покриття зменшувалася за рахунок збільшення електричного опору, як це було у випадку плівок Ni/Cu/П і Cu/Ni/П [5, 6], то погіршення умов розсіяння на межах зерен здавалися б закономірними.

Більш за все, у нашому випадку, прозорість меж зерен стає кращою внаслідок дифузії атомів Ni по межах зерен у плівці Co, що призводить до заліковування дефектів на межах зерен, а одержане незначне збільшення (зменшення) коефіцієнтів *R* (*r*) пов'язане з чи-



сто методичними питаннями розрахунку на основі моделей ТПІ, оскільки зміна вказаних коефіцієнтів лежить у межах похибки їх визначення. Що стосується плівок  $\text{SiO}_2/\text{Co}/\text{П}$ , то в цьому випадку можна говорити, що величина коефіцієнта розсіяння і проходження межі зерна не змінюється. Тобто із покриття  $\text{SiO}_2$ , як і слід було очікувати, домішки не перетікають у межі зерен  $\text{Co}$ . Це покриття впливає лише на дзеркальність зовнішньої поверхні, зміна якої призводить до зменшення ТКО, хоча величина опору фактично залишається незмінною.

Оскільки нанесення покриття із  $\text{Ni}$  на плівку  $\text{Co}$  призводить до зменшення питомого опору, а моделі ТПІ не дають змоги коректно визначити зміну коефіцієнтів  $R$  і  $r$ , то проведемо оцінку коефіцієнта  $R$  на основі означення для параметра зерномежового розсіяння:

$$\alpha = \frac{\lambda}{L} \frac{R}{1 - R}. \quad (5)$$

Значення  $\alpha$  розраховувалося із функціональної залежності  $f(\alpha)$  [23]:

$$f(\alpha) = \rho_0/\rho_\infty = 1 - \frac{3}{2}\alpha + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln \left| 1 - \frac{1}{\alpha} \right|, \quad (6)$$

де  $\rho_0$  — питомий опір масивного зразка.

Для визначення  $\rho_\infty$  експериментальні залежності  $\rho(d)$  перебудувались у координатах  $\rho(1/d)$ . У результаті розв'язання (6) було одержано, що для плівок  $\text{Co}$  при  $T = 300 \text{ K}$   $\alpha = 0,106$ , в той час як у плівках  $\text{Co}$  із покриттям із  $\text{Ni}$  —  $\alpha = 0,052$ . Підставлення цих значень у (5) дало змогу визначити значення  $R$ , які становлять  $0,047$  і  $0,023$  для плівок  $\text{Co}/\text{П}$  і  $\text{Ni}/\text{Co}/\text{П}$ . Таким чином, за рахунок дифузії атомів покриття величина коефіцієнта розсіяння на межі зерна зменшується в два рази.

У роботі [24] наведено одержане авторами асимптотичне співвідношення для питомої провідності (опору) у рамках моделю Ухлінова-Косаківської [25] для полікристалічних металевих зразків, у яких виконується умова  $L_x = L_y = L_z$ . Вказаним умовам відповідають наші плівки кобальту. У граничному випадку нанокристалічних плівок вираз для питомого опору має [24] такий вигляд:

$$\frac{\rho_\infty}{\rho} = 1 - \frac{9\pi}{32} \frac{\lambda(1 - R)}{L}. \quad (7)$$

Це співвідношення дає можливість визначити значення  $\lambda(1 - R)$ . Для розрахунку величини СДВП і  $R$  необхідно записати вирази для  $\lambda$  із співвідношень (5) і (7), прирівняти їх праві частини і одержати квадратне рівняння, в якому як невідоме виступає коефіцієнт  $R$ . Розв'язок цього рівняння дає можливість визначити



**ТАБЛИЦЯ 2.** Параметри електроперенесення, розраховані на основі співвідношення (7), при  $T = 300$  К.

Плівка	$\lambda(1 - R)$ , нм	$R$	$\lambda$ , нм
Co/П	17,4	0,10	19,3
Ni/Co/П	17,1	0,06	18,2

величину коефіцієнта розсіяння на межі зерна  $i$ , як наслідок, СДВП. Одержаний результат при температурі вимірювання опору 300 К ілюструє табл. 2. З наведених в ній даних випливає, що СДВП має величину, співмірну зі значенням середнього розміру зерна, що, на наш погляд, має більше сенсу, ніж у випадку використання моделей ТТП (табл. 1). Аналіза одержаних результатів про коефіцієнт розсіяння на межі зерна показує наступне.

По-перше, порядок величини узгоджується з даними, одержаними у рамках моделей ТТП. По-друге, за рахунок дифузії атомів Ni із покриття по межах зерен плівок Co спостерігається покращення прозорості їх для електронів провідності.

Таким чином, за рахунок чужих атомів, які сегрегують на межах зерен, можливе як погіршення умов розсіяння на них [5, 6], так і покращення (див. дані табл. 2 і робіт [1, 2]).

Цей висновок узгоджується з теоретичним уявленням про вплив дифузії чужих атомів по межах зерен [26]. Згідно з цією роботою коефіцієнт розсіяння носіїв заряду на межі зерен  $R$  можна подати у вигляді

$$R = R' + \gamma_g c_g. \quad (8)$$

У цій формулі  $R'$  — коефіцієнт розсіяння межі за відсутності дифундуючих атомів,  $c_g$  — їх концентрація, а коефіцієнт  $\gamma_g$  визначає характер межі. За додатніх значень  $\gamma_g$  межі зерен більше розсіюють, за від'ємних — є більш прозорими. Останнє спостерігається у плівках Co при дифузії у них атомів Ni із покриття.

#### 4. ВИСНОВКИ

Висновки до даної роботи можна сформулювати таким чином. Нанесення тонкого покриття з Ni на нанокристалічні плівки Co призводить до зменшення їх питомого опору та температурного коефіцієнта опору (в останньому випадку за рахунок зміни чутливості  $(\Delta\rho/\Delta T)$  залежності  $\rho(T)$ ). Аналіза результатів розрахунку параметрів електроперенесення з використанням моделей Тельє-Тоссе-Пішар, Маядаса-Шатцкеса та Ухлінова-Косаківської показує, що дифузія атомів Ni із покриття по межах зерен плі-



вок Со призводить до покращення їх прозорости. Що стосується плівок Со із покриттям із  $\text{SiO}_2$ , то в цьому випадку можна говорити, що величина коефіцієнта розсіяння і проходження межі зерна у них не змінюється, а покриття впливає лише на дзеркальність зовнішньої поверхні, зміна якої призводить до зменшення величини ТКО.

Роботу виконано при частковому фінансуванні в рамках держбюджетної теми № 0106U001942 (2006–2008) Міністерства освіти і науки України.

Автори висловлюють подяку проф. І. Ю. Проценку за обговорення результатів цієї роботи.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. М. Овчаренко, Н. М. Опанасюк, І. Ю. Проценко та ін., *УФЖ*, **42**, № 7: 826 (1997).
2. І. Ю. Проценко, О. В. Шовкопляс, Ю. М. Овчаренко та ін., *ЖФД*, **2**, № 1: 105 (1998).
3. E. F. Hsu Ching-Ling and R. G. Melullen, *Surf. Sci.*, **542**: 120 (2003).
4. J. K. David, S. Park, and F. Chanles, *J. Appl. Phys.*, **91**: 8108 (2002).
5. Т. П. Говорун, А. О. Степаненко, А. М. Чорноус, *ФХТТ*, **5**, № 2: 280 (2004).
6. Т. Новорун and A. Chornous, *Cryst. Res. Technol.*, **41**, No. 5: 458 (2006).
7. Г. И. Фролов, *ЖТФ*, **71**, № 12: 50 (2001).
8. Y. Qiang, R. F. Sabiryanov, S. S. Jaswal et al., *Phys. Rev. B*, **66**: 064404 (2002).
9. G. Leo, Y. Chushkin, S. Luby et al., *Mater. Sci. Eng. C*, **23**: 949 (2003).
10. L. Chitu, Y. Chushkin, S. Luby et al., *Mater. Sci. Eng.*, **252**: 5559 (2006).
11. Y. Chushkin, L. Chitu, Y. Halahovets et al., *Mater. Sci. Eng. C*, **26**: 1136 (2006).
12. Г. В. Самсонов, *Физико-химические свойства элементов: Справочник* (Киев: Наукова думка: 1965).
13. D. Schummacher and D. Stark, *Surf. Sci.*, **189**, No. 1/3: 1103 (1987).
14. Т. Б. Горбачова, *Рентгенография твердых сплавов* (Москва: Металлургия: 1985).
15. И. Е. Проценко, М. Д. Смолин, В. Г. Шамоня и др., *УФЖ*, **29**, № 6: 920 (1984).
16. Н. М. Опанасюк, *Розмірно-кінетичні явища в тонких плівках хрому, міді та кобальту з низькою концентрацією дефектів кристалічної будови: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук* (Суми: СумДУ: 1999).
17. V. B. Loboda, I. E. Protsenko, and A. V. Yaremenko, *Crystal und Technik*, **15**, No. 1: 43 (1980).
18. И. П. Лякишев, *Диаграммы состояния двойных металлических систем* (Москва: Машиностроение: 1997), т. 2.
19. В. В. Скороход, І. В. Уварова, А. В. Рагуля, *Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах* (Київ: Академперіодика: 2001).
20. С. И. Касаткин, Л. И. Коссе, В. В. Мальцев и др., *Микроэлектроника*,



- 25, № 1: 65 (1996).
21. C. R. Tellier and A. J. Tosser, *Size Effects in Thin Films* (Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier Sci. Publ. Co.: 1982).
  22. О. А. Панченко, С. В. Сологуб, *ФХТТ*, 1, № 4: 7 (2003).
  23. A. F. Mayadas and M. Shatzkes, *Phys. Rev. B*, 1, No. 4: 1382 (1970).
  24. О. А. Білоус, І. Ю. Проценко, А. М. Черноус, *ФХТТ*, 4, № 1: 48 (2003).
  25. Г. А. Ухлинов, З. Я. Косаковская, *ФММ*, 53, № 1: 61 (1983).
  26. Р. П. Волкова, Л. С. Палатник, А. Т. Пугачев, *ФТТ*, 24, № 4: 1161 (1982).