

PACS numbers: 64.60.ah, 68.35.bd, 73.61.At, 73.63.Bd, 81.15.Kk

## **Вплив особливостей режиму термостабілізації на структуру та електропровідність нанорозмірних плівок міді, золота та срібла**

Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, М. Д. Бучковська, В. М. Гаврилюх,  
Д. С. Леонов\*

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Університетська, 1,  
79000 Львів, Україна*  
\**Технічний центр НАН України,  
вул. Покровська, 13,  
04070 Київ, Україна*

Досліджено вплив режиму термостабілізації у межах першої температурної зони формування плівок моделі температурних зон Мовчана–Демчишина на структуру та електропровідність плівок срібла, міді та золота, сформованих в умовах надвисокого вакууму методом замороженої конденсації пари термічно випаровуваного металу на аморфні діелектричні підложжя, попередньо покриті підшарами германію субатомної товщини. Підтверджено можливість плавного керування середніми лінійними розмірами кристалітів у конденсаті металу шляхом сумісного використання сурфактантного підшару речовини (германію), яка протидіє коалесценції зародків кристалізації металу, та вибору режиму термостабілізації плівки. Реалізовано теоретичний опис розмірних залежностей електропровідності плівок за допомогою створених теоретичних моделей.

---

Corresponding author: Roman Ivanovych Bihun  
E-mail: [bihun28@ukr.net](mailto:bihun28@ukr.net)

*Ivan Franko National University of Lviv,  
1 Universytets'ka Str., UA-79000 Lviv, Ukraine*  
\**Technical Centre, N.A.S. of Ukraine,  
13 Pokrovs'ka Str., UA-04070 Kyiv, Ukraine*

Citation: R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, M. D. Buchkovs'ka, V. M. Gavrylukh, and D. S. Leonov, Effect of Peculiarities of Thermal Stabilization on Structure and Electrical Conductivity of Copper, Gold, and Silver Nanofilms, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 12: 1629–1639 (2020) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.42.12.1629](https://doi.org/10.15407/mfint.42.12.1629).

**Ключові слова:** тонкі металеві плівки, підшари субатомної товщини, електропровідність плівок, термостабілізація, зони Мовчана–Демчишина.

The effect of the thermal stabilization regime within the first temperature zone of Movchan–Demchishin model of the formation of films on the structure and electrical conductivity of silver, copper, and gold films formed under ultrahigh vacuum conditions by the method of frozen condensation of a thermally evaporated metal vapour on amorphous dielectric substrates, preliminarily coated with underlayers of subatomic thickness, is investigated. The possibility of stepless control of the average linear dimensions of crystallites in a metal condensate is confirmed by joint use of a surfactant underlayer of a substance (germanium), which counteracts the coalescence of metal crystallization nuclei, and the choice of a film thermal stabilization mode. A theoretical description of the dimensional dependences of the electrical conductivity of films is implemented using the created theoretical models.

**Key words:** thin metal films, underlayers of subatomic thickness, electrical conductivity of films, thermal stabilization, zone of Movchan–Demchishyn.

*(Отримано 27 жовтня 2020 р.)*

## 1. ВСТУП

Прогрес у галузі сучасної наноелектронної техніки можливий завдяки впровадженню нових технологій приготування активних і пасивних елементів мікросхем, який забезпечує зменшення середніх розмірів об'єктів і підвищує стабільність їхньої структури та електронних властивостей. Для пасивних електропровідних елементів у даний час необхідним стає перехід до використання плівкових систем товщиною 5–10 нм, які повинні забезпечувати омичне перенесення заряду за достатньо високих густин струму. До електропровідних елементів наносистем ставляться високі вимоги, зокрема до стабільності їхніх електричних параметрів у випадку тривалої роботи за підвищеної температури, обумовленої протіканням електричного струму. З літератури відомо [1], що помітні структурні перетворення у плівках металів починають спостерігатись за температур  $T$  близьких і вищих за температуру  $0,3T_{\text{топ}}$  ( $T_{\text{топ}}$  — температура топлення металу). Тому в процесі створення провідних елементів наносистемної техніки необхідно забезпечувати такий режим роботи, за якого відповідні вузли не нагріваються до температур вищих за  $0,3T_{\text{топ}}$  матеріалу. Це дозволяє уникнути впливу явища коалесценції кристалітів полікристалічної плівки і, таким чином, зміни електричних параметрів шару. Зауважимо, що коалесценція кристалітів може призвести до перетворення електрично суцільного шару в дрібнодисперсну систему з активаційними механізмами перенесення заряду. Для створення провідних елементів наносистемної техніки бажано використовувати метали з кубічною кристалічною ґратницею, оскільки в

плівках металів з гексагональною або тетрагональною кристалічними ґратницями можлива поява анізотропії провідності у площині плівки [2].

У роботах попередніх років показано, що для виготовлення електрично суцільних металевих плівок нанометрової товщини із заданою будовою перспективним є використання методики замороженої конденсації пари металу на охолоджене до 78 К діелектричне підложжя, попередньо покрите ультратонкими (товщиною в декілька моноатомних шарів) підшарами слабо провідних речовин (Ge, Si, Sb та ін.), які запобігають коалесценції зародків металевої фази. У [3–6] показано, що зміною масової товщини цього підшару можна керувати середніми лінійними розмірами кристалітів у металевій плівці і, таким чином, забезпечувати приготування металевих полікристалічних зразків з бажаними середніми лінійними розмірами кристалітів у площині, паралельній підложжю. Термостабілізацію приготованих таким чином плівок металів проводять звичайно за температур нижчих  $0,3T_{\text{топ}}$  металу. Це дозволяє забезпечити стабільність розмірів кристалітів у всьому діапазоні температур. В [1] відзначалось, що у разі нанесення плівок на підложжя за температур близьких до  $0,3T_{\text{топ}}$  на ріст плівок суттєво впливають процеси поверхневої дифузії матеріялу. Тому було цікаво в'яснити можливість існування подібних дифузійних процесів на стан раніше приготованої металевої плівки малої товщини, для якої важливим є саме поверхневі процеси. Метою роботи було електронно-мікроскопічне дослідження структури тонких плівок Au, Cu, Ag, сформованих з використанням методики «замороженої конденсації» на чистій поверхні діелектрика (стоплене поліроване скло чи аморфна плівка вуглецю) та на аналогічних поверхнях, попередньо покритих підшарами германію масовою товщиною від 1 нм до 6 нм, а також вивчення розмірних залежностей електропровідності приготованих таким чином плівок. Термостабілізацію плівок проводили за температур 300 К або 370 К. Досліджено структуру та електропровідність термостабілізованих плівок.

## 2. ЕЛЕМЕНТИ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Експеримент реалізовано у суцільнометалевій експериментальній системі на основі стандартного вакуумного поста УСУ-4 за сумарного тиску залишкових газів не вищому  $10^{-7}$  Па з використанням модернізованих метод препарування плівок, описаних в [3, 5]. Конденсацію пари металів або германію на підложжя проводили шляхом замороженої конденсації пари на охолоджене до 78 К підложжя зі швидкістю не більшою за 0,01 нм/с.

Як підложжя для формування плівок використано пластини з полірованого стопленого скла, на краї поверхні яких нанесено срібні контакти. У процесі одержання вакууму в системі поряд з про-

грівом стінок експериментального приладу також прогрівали підложжя протягом декількох діб за температур 300–350°C. Випаровувачі металів та германію прогрівали в режимах близьких до робочих протягом 30–40 годин, що дозволило ретельно знегазити їх.

Германій та метали наносили на поверхню підложжя шляхом конденсації пари термічно випарованого матеріалу. Підшари германію наносили на поверхню підложжя безпосередньо перед конденсацією плівки металу. Оцінку товщини плівок металів здійснювали за зсувом резонансної частоти п'єзокварцевого вібратора з чутливістю не гіршою за 1 нм. Масову товщину підшару германію оцінювали за часом напорошення Ge у фіксованому каліброваному потоці матеріалу з чутливістю у 2–3 вищою (0,03–0,05 нм). Опір плівок вимірювали з допомогою двозондової методики цифровим омметром і фіксували у пам'яті комп'ютера. Опір підшару германію завжди перевищував  $10^8$  Ом. Особливості мікроструктури плівок металів різної товщини досліджували на просвіт в електронному мікроскопі ПЕМ-100. Для структурних досліджень як підложжя використовували аморфні плівки вуглецю масовою товщиною 20 нм, виражені на поверхні відколу монокристала хлористого натрію. Зображення плівок металів, одержані з допомогою електронної мікроскопії на просвіт, аналізували з допомогою пакету програм ImageProPlus 6.0.

Під час електричних вимірювань плівки, товщина яких зростає, формували шляхом додаткового напорошення металу після кожної термостабілізації протягом години та після проведення вимірювання опору термостабілізованої плівки.

Детальніше проаналізуємо причину вибору температур  $T = 300$  К та  $370$  К термостабілізації плівок металів. Згідно з висновками роботи Мовчана і Демчишина [1] у структурі плівок, сформованих на підложжі за температур  $T$ , нижчих за  $T_1 = 0,3T_{\text{топ}}$ , середні лінійні розміри кристалітів зберігаються в усьому діапазоні температур, нижчих за  $T_1$ , однак за температур, близьких до  $T_1$ , можливі зміни структури плівки за рахунок дифузії атомів поверхневого шару. Уточнення моделі [7, 8], проведене у низці пізніших робіт, показало, що процес дифузії реально розпочинається за температур, суттєво нижчих за  $T_1$ , а швидкість цього процесу зростає у міру зростання  $T$ . В [7, 8] показано, що у високотемпературній ділянці першої температурної зони Мовчана–Демчишина [1] варто виділити так звану  $T$ -зону, у якій за рахунок поверхневої дифузії атомів у процесі нанесення плівки можлива перебудова кристалітів у напрямку зростання їхньої величини. З аналізу низки робіт цього плану можна зробити висновок, що залежно від умов процесу нанесення плівки  $T$ -зона може простягатися від  $0,15T_{\text{топ}}$  до  $0,3T_{\text{топ}}$ . Такий висновок зроблено на основі спостережень у процесі конденсації пари металів на підложжя, яке перебуває за згаданих температур. Очевидно, що у випадку термостабілізації плівок, сформова-

них за нижчих температур, діапазон температур, який охоплює  $T$ -зону повинен зсунутися у напрямку вищих температур і його ширина також може бути іншою. На нашу думку, нижня межа  $T$ -зони повинна не перевищувати рівень  $0,2T_{\text{топ}}$ . Підтвердимо цю думку аналізом результатів, проведених нами досліджень. Для такого аналізу у табл. 1 наведемо деякі числові величини, взяті з довідникової літератури та розраховані за ними величини.

З таблиці видно, що передбачувана нами нижня межа  $T$ -зони для плівок золота і міді близька до температури топлення льоду, а для срібла величина  $T$  суттєво нижча за цю температуру. Проведені дослідження термостабілізації плівок металів за температур 273–300 К показали, що плівки золота і міді, нанесені на поверхню скла чи підшару Ge, термостабілізовані за цієї температури протягом однієї години, зберігають незмінними свою структуру (лінійні розміри зерна) та питомий опір протягом тривалого часу. Плівки срібла, сформовані на поверхні підшарів германію стабілізують свої параметри після витримки за згаданих температур протягом 5–6 годин, а плівки Ag, сформовані на чистій поверхні скла, змінюють свої параметри протягом десятків годин. Плівки Ag товщиною меншою за 15–20 нм, витримані за температури 300 К, з часом набувають гранулярної будови з активаційними механізмами перенесення заряду. Тому реально одержати стабільні за кімнатної та вищих температур електрично суцільні плівки можна лише з Au та Cu.

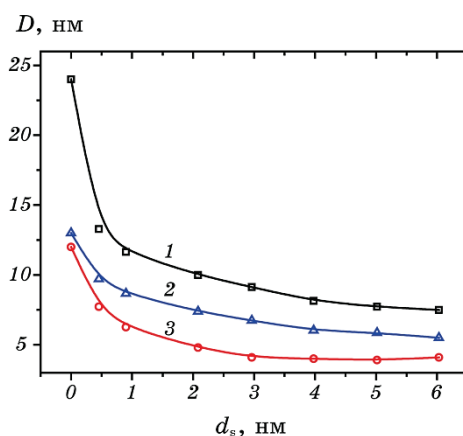
Проаналізуємо результати електронно-мікроскопічного дослідження структури плівок металів термостабілізованих протягом однієї години за температур 300 К та 370 К. Електронно-мікроскопічні дослідження плівок металів, обробка та трактування результатів проведено за стандартною процедурою. Результати дослідження структури плівок Ag, термостабілізованих за  $T = 300$  К, взято нами з [11]. На рисунку 1 показано залежності середніх лінійних розмірів кристалітів у плівках металів, сформованих на чистій поверхні діелектричного підложжя та поверхні цього підложжя, попередньо покритої підшарами Ge різної масової товщини від товщини підшару германію. Плівки термостабілізовані за температури 300 К протягом однієї години.

**ТАБЛИЦЯ 1.** Межі температурних зон золота, міді та срібла.

**TABLE 1.** Boundaries of temperature zones of gold, copper, and silver.

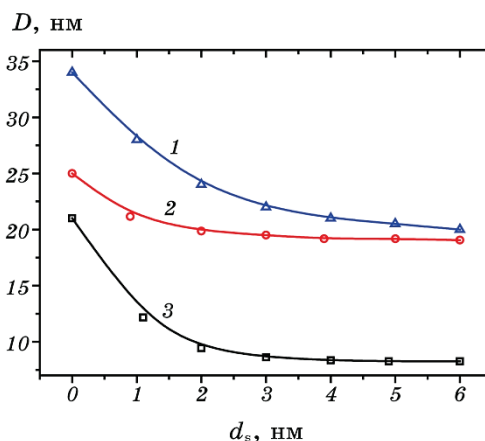
Метал	Температура топлення, $T_{\text{топ}}$ , К	Межа першої зони [1], $T_1$ , К	Нижня межа $T$ -зони, $T = 0,2T_{\text{топ}}$ , К
Au	1338 [9]	401,4	267,6
Cu	1356 [9]	406,8	271,2
Ag	1233,9 [10]	370,2	246,8

На рисунку 2 показано аналогічні залежності середніх лінійних розмірів кристалів у плівках металів, термостабілізованих протя-



**Рис. 1.** Залежності середніх лінійних розмірів кристалітів  $D$  плівки срібла (крива 1), міді (крива 2) і золота (крива 3) товщиною 20 нм від товщини  $d_s$  підшару германію. Плівки термостабілізовані за  $T = 300$  К.

**Fig. 1.** Dependences of the average linear sizes of crystallites  $D$  of films from silver (curve 1), copper (curve 2), and gold (curve 3) thickness of 20 nm on the thickness  $d_s$  of the germanium sublayer. Films thermostabilized at  $T = 300$  K.



**Рис. 2.** Залежності середніх лінійних розмірів кристалітів  $D$  плівки срібла (крива 1), міді (крива 2) і золота (крива 3) товщиною 20 нм від товщини  $d_s$  підшару германію. Плівки термостабілізовані за  $T = 370$  К.

**Fig. 2.** Dependences of the average linear sizes of crystallites  $D$  of films from silver (curve 1), copper (curve 2) and gold (curve 3) with thickness of 20 nm on the thickness  $d_s$  of Ge sublayer. Films thermostabilized at  $T = 370$  K.

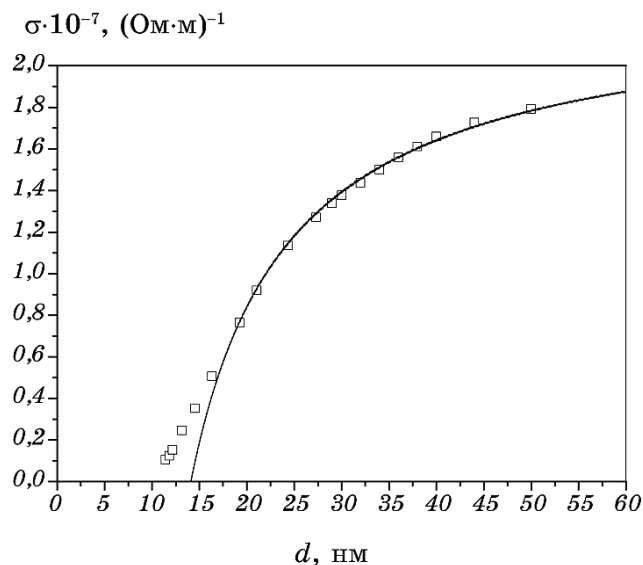
гом однієї години за температури 370 К. З рисунків 1 і 2 видно, що зміною масової товщини підшару германію можна досить надійно керувати лінійними розмірами кристалітів у плівці металу. Плівки металів термостабілізовані з використанням описаної вище методики за температур 300 К або 370 К зберігають свою структуру та електричні параметри протягом тривалого часу у разі перебування в умовах високого вакууму за температури не вищої від  $T = 300$  К. Перебування таких плівок за температур вищих від 300 К призводить до повільних необоротних змін структури, а відповідно і електричних параметрів плівок. Особливо це стосується плівок срібла, у яких за температур вищих від 300 К постійно триває процес поверхневої дифузії атомів, що призводить до коалесценції кристалітів. Плівки золота і міді, особливо малих товщин, залишаються стабільними практично за температур близьких до 370 К, завдяки непрякій взаємодії атомів металу з атомами підшару Ge.

Зауважимо, що стабільність дуже тонких плівок золота, сформованих на поверхні підшару германію, практично до температур близьких до 400 К, була підтверджена в [12, 13]. У міру збільшення товщини плівки металу відносний вплив атомів сурфактанта (у нашому випадку атомів германію) на поверхневі процеси послаблюється і спостерігається суттєве зростання розмірів кристалітів. Подібне явище спостерігалось у [3] за товщин плівок міді і золота більших за 50 нм.

Кількісний опис розмірних залежностей питомої електропровідності плівок металів, термостабілізованих за температур 300 К або 370 К, можна успішно реалізувати з використанням теоретичних моделей геометричних розмірних ефектів (модель плоскопаралельного шару [14, 15], внутрішнього розмірного ефекту [16, 17], розсіювання носіїв струму макроскопічними поверхневими неоднорідностями [18, 19], модель полікристалічного шару неоднорідної товщини [20, 21]) у діапазоні великих товщин плівок ( $d > \lambda$ ,  $\lambda$  — середня довжина вільного пробігу носіїв струму) або балістичного перенесення заряду в дуже тонких плівках ( $d < \lambda$ ) [22].

Відповідні дані для плівок Au, Cu, Ag, свіжонанесених за температури 78 К або термостабілізованих за температури 300 К, наведено в [3, 4]. Результати дослідження електропровідності плівок згаданих металів, термостабілізованих за температури 370 К, також добре описано за допомогою теорій [14–22] і відрізняються лише у числових величинах. Проілюструємо це на основі результатів дослідження плівок Cu і Au, сформованих на чистій поверхні скла.

Термостабілізація плівок міді проведена за температури 300 К, а золота — за температури 370 К, вимірювання провідності проведено за  $T_{\text{вим}} = 300$  К (рис. 3, 4). На графіках точками показано експериментальні дані, суцільні лінії — теоретичні криві розраховано на основі сумісного використання теорії дифузного та балістичного перенесен-



**Рис. 3.** Розмірна залежність питомої провідності за  $T = 300$  К плівок міді, нанесених на чисту поверхню скла та термостабілізованих за температури  $T = 300$  К. Точки — експериментальні дані, суцільна лінія — теоретична залежність.

**Fig. 3.** Dimensional dependence of the specific conductivity at  $T = 300$  K of copper films deposited on a clean glass surface and thermostabilized at a temperature of  $T = 300$  K. Points present experimental data, and a solid line is a theoretical dependence.

ня заряду [20–22].

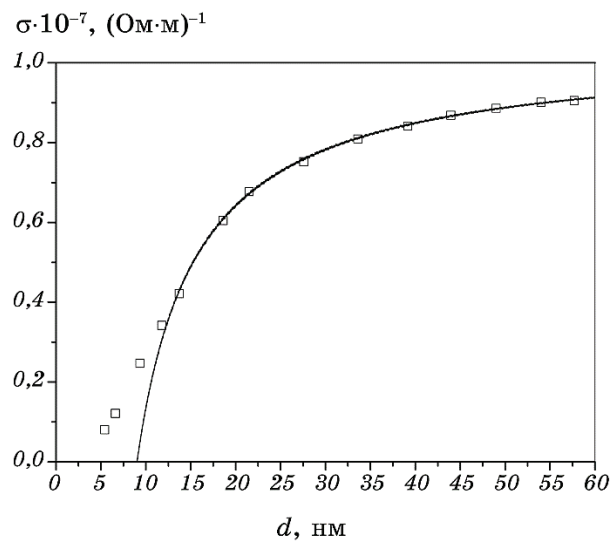
Експериментальні дані добре вкладаються на теоретичні криві до товщин, за яких згідно з перколяційною теорією плівки є електрично суцільними. Для розрахунків з використанням виразів теорії [22] використано величини параметрів перенесення заряду в плівках даного ступеня досконалості ( $\rho_{\infty}$  — питомий опір плівки безмежної товщини,  $\lambda$  — середня довжина вільного пробігу носіїв струму), визначених експериментально [20, 21].

#### 4. ВИСНОВКИ

Вивчено вплив змін температури термостабілізації в межах  $T$ -зони модифікованої моделі формування плівок Мовчана–Демчишина на структуру плівок золота, міді та срібла і встановлено, що зміною температури термостабілізації у цьому діапазоні температур можна керувати лінійними розмірами кристалітів у плівці металу.

Показано, що сумісне використання поверхневоактивних підша-





**Рис. 4.** Розмірна залежність питомої провідності за  $T = 300$  К плівок золота, нанесених на чисту поверхню скла та термостабілізованих за температури  $T = 370$  К. Точки — експериментальні дані, суцільна лінія — теоретична залежність.

**Fig. 4.** Dimensional dependence of specific conductivity at  $T = 300$  K of gold films deposited on a clean glass surface and thermostabilized at  $T = 370$  K. Points—experimental data, solid line—theoretical dependence.

рів і вибору режиму термостабілізації дозволить реалізувати плавне керування розмірами кристалітів у плівці.

Підтверджено придатність сучасних теорій розмірних явищ для опису залежностей питомої провідності плівок у широкому діапазоні товщин плівок.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Б. А. Мовчан, А. В. Демчишин, *Физика металлов и металлоредение*, **28**, вып. 4: 653 (1969).
2. D. Gall, *J. Appl. Phys.*, **119**: 085101 (2016).
3. А. П. Шпак, Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, Ю. А. Куницький, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **8**, вип. 2: 339 (2010).
4. Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, О. В. Строганов, В. М. Гаврилюх, Д. С. Леонов, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **13**, вип. 3: 459 (2015).
5. Р. І. Бігун, М. Д. Бучковська, В. М. Гаврилюх, З. В. Стасюк, Д. С. Леонов, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **14**, вип. 2: 285 (2016).
6. З. В. Стасюк, Р. І. Бігун, А. В. Бородчук, Я. А. Пастирський, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **7**, вип. 2: 529 (2009).

7. C. R. Grovenor, H. T. Hentzell, and D. A. Smith, *Acta Metall.*, **32**, No. 5: 773 (1984).
8. D. P. Singh, P. Goel, and J. P. Singh, *J. Appl. Phys.*, **112**: 104324 (2012).
9. *Фізика твердого тела: Энциклопедический словарь* (Ред. В. Г. Барьяхтар) (Киев: Наукова думка: 1996), т. 1.
10. *Фізика твердого тела: Энциклопедический словарь* (Ред. В. Г. Барьяхтар) (Киев: Наукова думка: 1996), т. 2.
11. Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, О. В. Строганов, М. Д. Бучковська, Д. С. Леонов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 5: 601 (2018).
12. K. L. Ekinci and J. M. Valles, *Acta Metall.*, **46**, Iss. 13: 4549 (1998).
13. K. L. Ekinci and J. M. Valles, *Phys. Rev. B.*, **58**, No. 11: 7347 (1998).
14. K. H. Fuchs, *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, **34**: 100 (1938).
15. E. H. Sondheimer, *Adv. Phys.*, **1**: 1 (1952).
16. A. F. Mayadas and M. Shatzkes, *Phys. Rev. B: Solid State B*, **1**: 1382 (1970).
17. C. R. Pichard, C. R. Tellier, and A. J. Tosser, *Thin Solid Films*, **62**, No. 2: 189 (1979).
18. Y. Namba, *Jap. J. Appl. Phys.*, **9**, No. 11: 1326 (1970).
19. P. Wißmann and H.-U. Finzel, *Springer Tracts in Modern Physics* (Eds. G. Höhler and Karlsruhe), vol. 223 (2007).
20. Z. V. Stasyuk, *Journ. Phys. Studies*, **3**, No. 1: 102 (1999).
21. З. В. Стасюк, А. І. Лопатинський, *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**, № 4: 521 (2001).
22. R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, O. A. Balitskii, *Physica B*, **487**: 73 (2016).
23. Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, О. В. Строганов, М. Д. Бучковська, В. М. Гаврилюх, Я. А. Пастирський, Д. С. Леонов, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **15**, вип. 1: 15 (2017).
24. Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, *Металлофиз. новейшие технол.*, **30**, № 6: 795 (2008).

## REFERENCES

1. B. A. Movchan and A. V. Demchishin, *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **28**, Iss. 4: 653 (1969) (in Russian).
2. D. Gall, *J. Appl. Phys.*, **119**: 085101 (2016).
3. A. P. Shpak, R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, and Yu. A. Kynytskyi, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **8**, No. 2: 339 (2010) (in Ukrainian).
4. R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, O. V. Strohanov, V. M. Havryliukh, and D. S. Leonov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **13**, No. 3: 459 (2015) (in Ukrainian).
5. R. I. Bihun, M. D. Buchkovska, V. M. Havryliukh, Z. V. Stasyuk, and D. S. Leonov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **14**, No. 2: 285 (2016) (in Ukrainian).
6. Z. V. Stasyuk, R. I. Bihun, A. V. Borodchuk, and Ya. A. Pastyrskyi, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **7**, No. 2: 529 (2009) (in Ukrainian).
7. C. R. Grovenor, H. T. Hentzell, and D. A. Smith, *Acta Metall.*, **32**, Iss. 5: 773 (1984).
8. D. P. Singh, P. Goel, and J. P. Singh, *J. Appl. Phys.*, **112**: 104324 (2012).
9. *Fizika Tverdogo Tela: Entsiklopedicheskiy Slovar* (Ed. V. G. Baryahtar)

- (Kiev: Naukova Dumka: 1996), vol. 1 (in Russian).
10. *Fizika Tverdogo Tela: Entsiklopedicheskiy Slovar* (Ed. V. G. Baryahtar) (Kiev: Naukova Dumka: 1998), Vol. 2 (in Russian).
  11. R. I. Bihun, Z. V. Stasiuk, O. V. Strohanov, M. D. Buchkovska, and D. S. Leonov, *Metallofiz. Noveishie Tehnol.*, **40**, No. 5: 601 (2018) (in Ukrainian).
  12. K. L. Ekinci and J. M. Valles, *Acta Metall.*, **46**, Iss. 13: 4549 (1998).
  13. K. L. Ekinci and J. M. Valles, *Phys. Rev. B.*, **58**, No. 11: 7347 (1998).
  14. K. Fuchs, *Math. Proc. Cambridge Phil. Soc.*, **34**, Iss. 1: 100 (1938).
  15. E. H. Sondheimer, *Adv. Phys.*, **1**: 1 (1952).
  16. A. F. Mayadas and M. Shatzkes, *Phys. Rev. B: Solid State B*, **1**: 1382 (1970).
  17. C. R. Pichard, C. R. Tellier, and A. J. Tosser, *Thin Solid Films*, **62**, No. 2: 189 (1979).
  18. Y. Namba, *Jap. J. Appl. Phys.*, **9**, No. 11: 1326 (1970).
  19. P. Wißmann and H.-U. Finzel, *Springer Tracts in Modern Physics* (Eds. G. Höhler and Karlsruhe), vol. 223 (2007).
  20. Z. V. Stasyuk, *J. Phys. Studies*, **3**, No. 1: 102 (1999).
  21. Z. V. Stasyuk and A. I. Lopatyns'kyi, *Fizyka i Khimiya Tverdoho Tila*, **2**, No. 4: 521 (2001) (in Ukrainian).
  22. R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, and O. A. Balitskii, *Physica B*, **487**: 73 (2016).
  23. R. I. Bihun, Z. V. Stasiuk, O. V. Strohanov, M. D. Buchkovska, V. M. Havryliukh, Ia. A. Pastyrskyi, and D. S. Leonov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **15**, No. 1: 15 (2017) (in Ukrainian).
  24. R. I. Bihun and Z. V. Stasiuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **30**, No. 6: 795 (2008) (in Ukrainian).