

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛЁНКИ

PACSnumbers: 72.10.Fk, 73.23.Ad, 73.25.+i, 73.50.Bk, 73.61.At, 73.63.Bd, 81.15.Kk, 85.40.Xx

Вплив підшарів германію на перенесення заряду в плівках хрому нанометрової товщини

Р. І. Бігун, В. М. Гаврилюх, Б. П. Коман, Я. А. Пастирський,
З. В. Стасюк, Д. С. Леонов*

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. Драгоманова, 50,
79005 Львів, Україна
*Технічний центр НАН України,
вул. Покровська, 13,
04070 Київ, Україна*

Розмірні залежності електропровідності плівок хрому товщиною, меншою за 50 нм, сформованих в умовах надвисокого вакууму на поверхні скла та поверхні скла, попередньо покритій підшарами германію, кількісно описано за допомогою теорій квазикласичного та квантового розмірних ефектів. Експериментальні дані добре узгоджуються з результатами теоретичних розрахунків, при проведенні яких враховано особливості структури плівок і морфології їхньої поверхні. Розраховано параметри перенесення заряду в досліджуваних зразках.

Ключові слова: тонкі металеві плівки, поверхнєве та зерномежеве розсіяння, напівпровідникові підшари субатомової товщини.

Conductivity–size dependences of chromium films with thickness $d < 50$ nm fabricated under ultrahigh vacuum conditions on both the surface of glass and the surface of glass predeposited with germanium underlayers are quantitatively described by quasi-classical and quantum size effects' theories. The

Corresponding authors: Roman Ivanovych Bihun
E-mail: bihun28@ukr.net

*Ivan Franko National University of Lviv, 50 Dragomanov Str., 79005 Lviv, Ukraine
Technical Centre, N.A.S. of Ukraine, 13 Pokrovs'ka Str., 04070 Kyiv, Ukraine

Please cite this article as: R. I. Bihun, V. M. Gavrylyukh, B. P. Koman, Ya. A. Pastyrskyy, Z. V. Stasyuk, and D. S. Leonov, Influence of Sublayers of Germanium on Charge Transfer in Films of Chromium of Nanometre Thickness, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 9: 1167–1177 (2016) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.38.09.1167.

experimental data are agreed with theoretical calculations taking into account the structure and surface-morphology peculiarities of thin metal films. The charge transport parameters of experimental samples are calculated.

Key words: metal thin films, surface and grain boundary scatterings, semiconductor sublayers of subatomic thickness.

Размерные зависимости электропроводности плёнок хрома толщиной менее 50 нм, сформированных в условиях сверхвысокого вакуума на поверхности стекла и поверхности стекла, предварительно покрытой подслоями германия, количественно описаны с помощью теорий квазиклассического и квантового размерных эффектов. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами теоретических расчётов, в которых учитываются особенности строения плёнок и морфологии их поверхности. Рассчитаны параметры переноса заряда в исследованных образцах.

Ключевые слова: тонкие металлические плёнки, поверхностное и зернограничное рассеяния, полупроводниковые подслои субатомной толщины.

(Отримано 15 липня 2016 р.)

1. ВСТУП

Мініатюризація елементів пристроїв сучасної мікро- та наноелектроніки є одним з основних напрямів розвитку сучасних нанотехнологій, що уможливить ущільнити елементи на поверхні інтегральної схеми і таким чином зменшити лінійні розміри системи. Досягненню даної мети сприяє створення тонкоплівкових зразків нанометрових розмірів з наперед заданими структурою та електричними властивостями. При формуванні електричносуцільної металеві плівки нанометрової товщини виникає низка технологічних труднощів, пов'язаних з тим, що ріст плівки на діелектричному підложжі розпочинається з виникнення ізольованих зародків кристалізації, у яких внаслідок більш сильної взаємодії між атомами металу в порівнянні із взаємодією атомів металу з атомами поверхні підкладинки зберігається тенденція до коалесценції. Це явище ускладнює одержання дуже тонкої плівки у вигляді суцільного провідного шару. Перспективним шляхом вирішення даної проблеми виявилось поєднання методики замороженої конденсації та використання ультратонких підшарів поверхневоактивних речовин, попередньо нанесених на поверхню діелектричної підкладинки. Зокрема, для плівок хрому було показано, що використання згаданих технологій уможлиблює забезпечити формування однорідних дрібнокристалічних шарів металу з передбачуваною структурою [1]. Завдяки змінам масової товщини підшару германію, попередньо нанесеного на підкладинку, забезпечувалася можливість керування лінійними розмірами кристалітів металу у площині, па-

ралельній підложжю. Метою даної роботи було виявити можливості надійного кількісного опису розмірних залежностей явищ електроперенесення в плівках хрому на основі сучасних модельних уявлень про кінетичні явища в плівках металів.

2. ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ДОСЛІДЖУВАНІ ОБ'ЄКТИ

Експеримент реалізовано в суцільнометалевій експериментальній системі на основі стандартного вакуумного поста УСУ-4 при сумарному тиску залишкових газів не вищому за 10^{-7} Па з використанням модернізованих метод препаративання плівок, описаних детально для скляних експериментальних приладів [2, 3] та для металевій системи [1]. В якості підкладок для формування плівок використано пластини полірованого, отопленого скла, на краї поверхні яких нанесено срібні контакти. Хром та германій наносили на поверхню підкладки шляхом конденсації пари термічно випаруваних матеріалів. Масову товщину нанесених плівок хрому та германію оцінювали по зсуву резонансної частоти п'езокварцового вібратора, розміщеного в потоці пари випаровуваної речовини. Інформацію про структуру плівок хрому використано з даних роботи [1], в якій детально описано особливості формування плівок з використанням методики «замороженої конденсації» на поверхні скла та на поверхні підшару германію, попередньо нанесеного на поверхню скла. Температурний режим препаративання і дослідження електричних параметрів плівок відповідає режиму $T < (0,1-0,2)T_m$ (T_m — температура топлення металу). Досліджено електропровідність свіжнанесених на підкладку при $T = 293$ К плівок хрому з використанням двозондової методики вимірювання за допомогою цифрового приладу В7-34А, спряженого з комп'ютером. Вимірювальна система обладнана електронним комутатором для здійснення почергового вимірювання опору декількох плівок одночасно в процесі їхнього формування. Використання комутатора забезпечувало короткотривале вимірювання опору кожної плівки і тим самим зменшувало вплив відпалу плівки при протіканні через неї вимірюваного струму.

З результатів структурних досліджень [1] випливає, що використання даної методики препаративання плівок, забезпечує формування дрібнокристалічних плівок хрому з середніми лінійними розмірами зерна в площині, паралельній підложжю, незалежними від товщини плівки металу. Розміри зерна в плівці можна було змінювати шляхом зміни товщини підшару германію в межах від $D = 5,3$ нм для плівок хрому, нанесених на чисту поверхню скла, до $D = 3,5$ нм для плівок хрому, сформованих на поверхні підшару германію масовою товщиною в декілька нанометрів. Зауважимо, що фізична

картина процесу керування лінійними розмірами у плівках металів, зокрема хрому, впливає з відомих в літературі робіт [4–6].

3. ПЕРЕНЕСЕННЯ ЗАРЯДУ В ПЛІВКАХ ХРОМУ

На рисунку 1 наведено залежності провідності плівок хрому квадратної форми ($\Sigma = 1/R$, R — опір плівки квадратної форми товщиною d) свіжонанесених при $T = 293$ К на чисту поверхню скла (1) та поверхню скла, попередньо покриту підшаром германію масовою товщиною 8 нм (2), від товщини плівок хрому. З рисунка видно, що у початковій стадії росту плівки електропровідність виникає раніше для плівок на поверхні підшару германію, а при більших товщинах плівок хрому спостерігається поява провідності у плівках, сформованих на чистій поверхні скла. Наприкінці процесу осадження хрому, за достатньо великих товщин плівок їх провідність у випадку нанесення плівки на чисту поверхню скла перевищує провідність плівки тієї ж товщини d , але нанесеної на поверхню підшару германію. Подібна поведінка залежностей провідності від товщини плівок металів, нанесених на чисту поверхню діелектрика та на по-

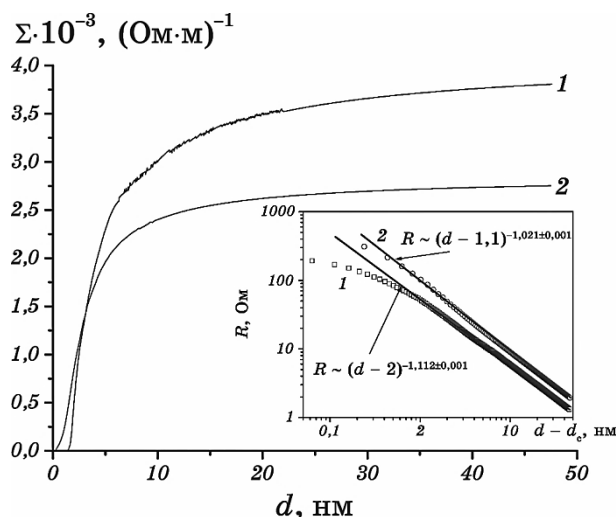


Рис. 1. Залежності провідності плівок хрому від товщини плівки $\Sigma(d) = 1/R(d)$: 1 — плівки хрому, осаджені на чисте скляне підложжя, 2 — плівки хрому, осаджені на поверхню підшару германію масовою товщиною 8 нм.

Fig. 1. Dependences of conductivity of the chrome films on film thickness $\Sigma(d) = 1/R(d)$: 1—chromium films deposited onto the clean glass substrate, 2—chromium films deposited onto the surface of germanium sublayer with mass thickness of 8 nm.

верхню діелектрика, попередньо покриту підшаром поверхневоактивної речовини (германію, кремнію, сурми та ін.), спостерігалась для плівок золота, міді, паладію, нікелю [2, 3]. Існування подібного явища обумовлене впливом внутрішнього розмірного ефекту.

Надійний кількісний опис розмірних залежностей питомої провідності (питомого опору $\rho = 1/\sigma$) можна здійснити на основі сучасних теорій квазикласичного та квантового розмірних ефектів. Відомо, що згадані теорії створено для суцільних металевих шарів, а тому мінімальні товщини плівок, при яких можливе використання теорій обмежуються станом системи, коли реалізується металевий характер перенесення заряду з позитивним температурним коефіцієнтом опору β . Найменшу товщину плівки d_c , при якій виникає перший канал провідності металічного характеру, можна оцінити в рамках перколяційного підходу. Попіг протікання d_c (percolation threshold) оцінюємо шляхом лінеаризації графіка залежності $R = R(d)$ перетворенням до вигляду $R \propto (d - d_c)^{-\gamma}$ [3]. Подібне перетворення даних подано на вставці рис. 1. Звідки видно, що для плівок хрому, нанесених на чисту поверхню скла $d_c = 2$ нм, а для плівок, нанесених на поверхню підшару германію товщиною 8 нм, ця величина рівна 1,1 нм. Величини γ відповідно 1,11 та 1,02. Останній результат уможливує стверджувати, що в нашому випадку реалізується пошаровий ріст плівки хрому, оскільки згідно з теорією перколяційних явищ при 2D-перколяції величина γ має задовольняти нерівності $1 \leq \gamma \leq 1,3$. Перехід до домінуючого металічного характеру провідності з позитивним температурним коефіцієнтом опору звичайно завершується у плівках товщиною $d_\Omega \geq (1,5-2,0)d_c$ [3]. Тому для плівок хрому, нанесених на чисту поверхню скла, варто очікувати, що теорії розмірних явищ зможуть надійно описати електричні властивості цих плівок починаючи з товщин більших за 3 нм, а для плівок хрому, нанесених на підшар германію різної масової товщини, — починаючи з $d_\Omega > 2$ нм. З результатів структурних досліджень випливає, що суцільні шари хрому на поверхні підшарів германію формуються саме при товщинах плівок хрому більших за 2 нм.

Проаналізуємо можливість використання сучасних теорій розмірних явищ для кількісного опису результатів дослідження плівок хрому, сформованих на чистій поверхні та на поверхні, покритій підшарами германію різної масової товщини. Найбільш загальний опис геометричних розмірних ефектів у плівках великих товщин, можна здійснити в рамках моделю полікристалічного шару неоднорідної товщини [7, 8]. Однак, завдяки тому, що лінійні розміри кристалітів у плівках хрому не залежать від товщини шару металу, вирази теорії [7, 8] спрощуються до виразу теорії Намба [8] і залежності типу $\rho(d)d = f_1(d)$ та $\beta(d)d = f_2(d)$ в діпазоні дуже великих товщин стають лінійними. Сказане підтверджують дані, наведені на

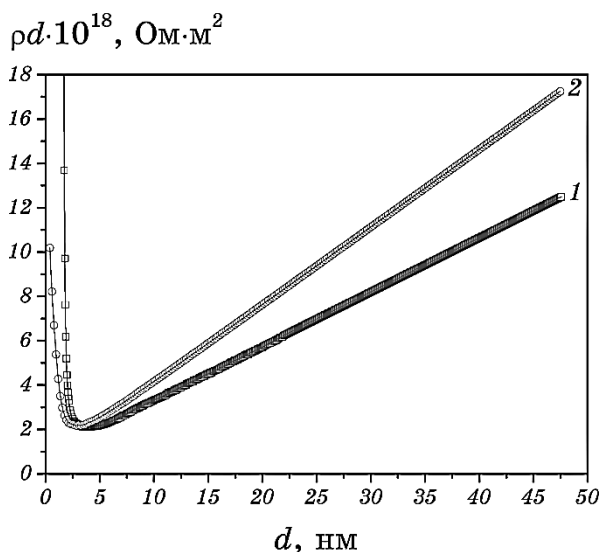


Рис. 2. Розмірні залежності $\rho(d)d = f_1(d)$ для плівок хрому: 1 — плівки хрому, осаджені на чисту скляну підкладку, 2 — плівки хрому, осаджені на підшар германію масовою товщиною 3 нм.

Fig. 2. Size dependences $\rho(d)d = f_1(d)$ for chromium films: 1—films deposited onto a clean glass substrate, 2—films deposited onto germanium sublayer with mass thickness of 3 nm.

рис. 2, на якому побудовано залежності $\rho(d)d = f_1(d)$ плівок хрому, нанесених на чисту поверхню скла та поверхню скла, покриту підшарами германію масовою товщиною 3 нм. З рисунка видно, що лінійний характер згаданих залежностей зберігається, принаймні, до товщин 5 нм. Згідно з теорією класичного розмірного ефекту нахил лінійних ділянок дорівнює питомому опорі плівок безмежної товщини ρ_∞ (питомий опір плівки даного ступеня досконалости при $d \rightarrow \infty$).

На основі кількісного опису експериментальних залежностей, представлених на рис. 2, за допомогою виразів теорії Намба [8] знайдено також величину λ — ефективну середню довжину вільного пробігу носіїв струму у плівці даного ступеня досконалости та величину h — середню амплітуду макроскопічних поверхневих неоднорідностей. Зауважимо, що величину λ розраховано в припущенні про дифузний характер розсіяння носіїв струму поверхнями дрібнокристалічної плівки.

З структурних досліджень [1] відомо, що середні лінійні розміри зерна D в площині, паралельній підложжю, $D = 5,5$ нм (для плівок, сформованих на чистій поверхні скла) та $D = 3,5$ нм (для плівок, сформованих на поверхні підшарів германію масовою товщиною 3

нм). Тому внесок у величину ρ_∞ розсіяння межами зерен врахуємо на основі моделю Тельє–Тоссе–Пішар [8], ввівши параметер t — ймовірність міжзеренного тунелювання носіїв струму, за допомогою модифікованого співвідношення:

$$(\rho_\infty - \rho_0)/\rho_\infty = 3\lambda(1 - t)/(1 + t). \quad (1)$$

Результати розрахунку параметрів перенесення заряду у плівках, одержані за даними рис. 2, наведено в табл. 1.

З даних, наведених у таблиці, видно, що вплив підшарів германію на електричні властивості плівок хрому зводиться до зменшення поверхневої шерсткості плівки h завдяки зменшенню розмірів зерен D і, в результаті, до зменшення ефективної середньої довжини вільного пробігу носіїв струму. Подібні явища спостерігались і при дослідженні плівок низки металів, сформованих на поверхні підшарів германію, кремнію і сурми [2, 3]. Вплив підшару германію на лінійні розміри кристалітів у плівках хрому [1], як і у випадку плівок паладію [9], слабший за подібний вплив на розміри зерна у плівках золота та міді, що мабуть обумовлено вищою температурою топлення хрому та паладію у порівнянні із золотом і міддю [2, 3] та відповідно меншою рухливістю атомів цих речовин на поверхні підкладинки при конденсації плівки. Залежності, подібні до даних наведених на рис. 2, одержано також для плівок хрому, сформованих на поверхні підшарів германію інших товщин. Відмінність цих даних полягає лише в кількісних значеннях h , D , λ , що обумовлено відмінністю абсолютних величин сил взаємодії атомів Хрому з атомами Германію в початковій стадії зародження плівки металу, залежно від ступеня покриття діелектричної підкладинки атомами Германію.

Величини, наведені у таблиці, використано при розрахунку розмірних залежностей питомої провідності плівок хрому за допомогою виразів теорії квантового розмірного ефекту в плівках металів [9–15]. Співставлення експериментальних даних, одержаних для плівок хрому, з результатами розрахунків, виконаних на основі теорій [9–15], проводили методами, аналогічними до метод, описаних

ТАБЛИЦЯ 1. Результати розрахунку (здійсненого за даними рис. 2) параметрів перенесення заряду у плівках.

TABLE 1. The results of calculation (carried out using data from Fig. 2) of parameters of the charge transfer in films.

| Плівки | $\rho_\infty \cdot 10^{-8}$, Ом·м | λ , нм | D , нм | t |
|------------|------------------------------------|----------------|----------|------|
| Cr | 25 | 7,8 | 5,5 | 0,79 |
| Cr-Ge 3 нм | 35 | 5,4 | 3,5 | 0,75 |

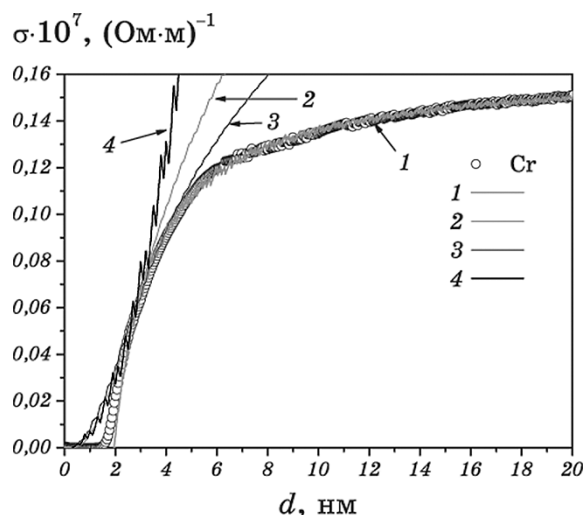


Рис. 3. Розмірні залежності питомої провідності свіжонанесених на чисту скляну підкладку при 293 К плівок Cr. Точки — експериментальні дані, суцільні криві — апроксимаційні вирази теоретичних підходів: 1 — [15, 16], 2 — [12], 3 — [10, 11], 4 — [13, 14].

Fig. 3. Size dependences of conductivity of chromium films deposited onto the clean glass substrate at 293 K. Dots—experimental data, solid curves—approximation expressions of theoretical approaches: 1—[15, 16], 2—[12], 3—[10, 11], 4—[13, 14].

в [1, 16].

На рисунках 3 та 4 наведено результати співставлення експериментальних розмірних залежностей питомої провідності плівок хрому, сформованих відповідно на чистій поверхні скла та на поверхні скла, покритій підшаром германію масовою товщиною 3 нм. З рисунків видно, що теоретичні залежності, розраховані на основі моделей [10–14], передають характер зміни експериментальних даних лише у вузькому діапазоні товщин. Згадані теоретичні залежності взагалі непридатні для опису $\sigma = \sigma(d)$ при переході до ділянки класичних геометричних ефектів. В кількісному плані, навіть в діапазоні збігу характеру залежностей $\sigma = \sigma(d)$ одержуються запевне неправильні значення параметрів поверхневих неоднорідностей, сумірні з міжатомовими віддальми у плівці металу. В реальних металевих плівках, згідно з результатами дослідження структури поверхні за допомогою сканувальної тунельної мікроскопії, величини, що характеризують ці неоднорідності, звичайно перевищують 1 нм, а для плівок легкотопких металів амплітуда шерсткості поверхні може досягати 5–10 нм.

На противагу оцінкам, здійсненим на основі моделей [10–14], ро-

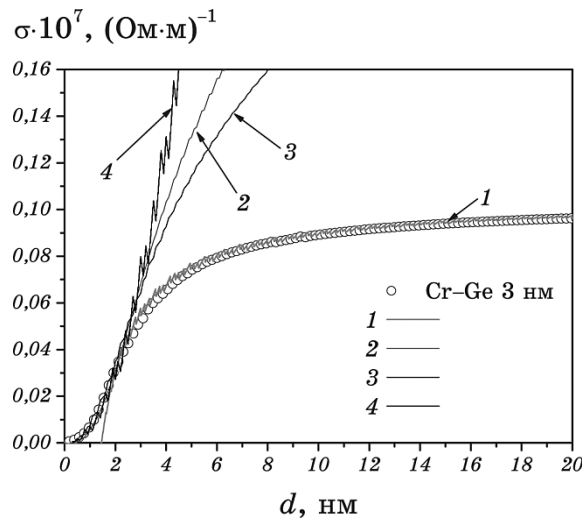


Рис. 4. Розмірні залежності питомої провідності свіжонанесених на скляну підкладку, попередньо покриту підшаром германію масовою товщиною 3 нм, при 293 К плівок Cr. Точки — експериментальні дані, суцільні криві — апроксимаційні вирази теоретичних підходів 1 — [15, 16], 2 — [12], 3 — [10, 11], 4 — [13, 14].

Fig. 4. Size dependences of conductivity of the Cr films deposited on a glass substrate precoated with germanium sublayer of mass thickness of 3 nm at 293 K. Dots—experimental data, solid curves—approximation expressions of theoretical approaches: 1—[15, 16], 2—[12], 3—[10, 11], 4—[13, 14].

зрахунки, проведені на основі теорії [15, 16], добре узгоджуються з даними, одержаними експериментально. Таке узгодження досягається завдяки врахуванню особливостей структури реальної плівки, зокрема впливу цих особливостей на релаксацію носіїв струму в об'ємі плівки. Величини підгінних параметрів h та λ , знайдені з результатів дослідження квазикласичної розмірної залежності провідності плівок в діпазоні великих товщин, використано при розрахунку згідно [15, 16]. Зауважимо, що величини параметрів, які характеризують особливості макроскопічних поверхневих неоднорідностей, знайдені для плівок паладію, міді і золота з розмірних залежностей провідності плівок, добре узгоджуються з даними, одержаними при СТМ-дослідженнях структури поверхні плівок [3, 9]. Тому величини, що характеризують поверхневі неоднорідності плівок хрому, також мають бути коректними.

4. ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що кількісний опис розмірних залежностей пито-

мої електропровідності дрібнокристалічних плівок хрому можна здійснити на основі теорій геометричного та квантового розмірних ефектів.

2. Пояснення електропровідності плівок хрому в широкому діапазоні товщин здійснюється за допомогою сумісного використання виразів теорій квазикласичного та квантового розмірних ефектів. Найкраще узгодження експериментальних і розрахункових залежностей одержується при сумісному використанні теорій [7, 8] і [15, 16].

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Р. І. Бігун, М. Д. Бучковська, В. М. Гаврилюх, З. В. Стасюк, Д. С. Леонов, *Наносистеми, наноматеріали та нанотехнології*, **13**, вип. 2: 285 (2016).
2. А. П. Шпак, Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, Ю. А. Куницький, *Наносистеми, наноматеріали та нанотехнології*, **8**, вип. 2: 339 (2010).
3. Р. І. Бігун, М. Д. Бучковська, Н. С. Колтун, З. В. Стасюк, Д. С. Леонов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, № 12: 1659 (2013).
4. Н. Т. Гладких, С. В. Дукаров, А. П. Крышталь, В. И. Ларин, В. Н. Сухов, С. И. Богатыренко, *Поверхностные явления и фазовые превращения в конденсированных пленках* (Ред. Н. Т. Гладких) (Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина: 2004).
5. S. V. Dukarov, S. I. Petrushenko, V. N. Sukhov, and I.G. Churilov, *Problems of Atomic Science and Technology*, **89**, No. 1: 110 (2014).
6. K. L. Ekinici and J. M. Valles, *Acta Metall.*, **46**, No. 13: 4549 (1998).
7. Z. Stasyuk, *J. Phys. Stud.*, **3**, No. 1: 102 (1999).
8. З. В. Стасюк, А. І. Лопатинський, *Фізика і хімія твердого тіла*, **2**, № 4: 521 (2001).
9. Р. І. Бігун, В. М. Гаврилюх, З. В. Стасюк, Д. С. Леонов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 3: 329 (2016).
10. Z. Tesanovic, M. Jaric, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B*, **57**, No. 21: 2760 (1986).
11. Z. Tesanovic, *Solid State Phys.*, **20**, No. 6: L829 (1987).
12. N. Trivedi and N. Ashcroft, *Phys. Rev. B*, **38**, No. 17: 12298 (1988).
13. G. Fishman and D. Calecki, *Phys. Rev. Lett.*, **62**, No. 11: 1302 (1989).
14. G. Fishman and D. Calecki, *Phys. Rev. B*, **43**, No. 14: 11581 (1991).
15. Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, *Металлофиз. новейшие технол.*, **36**, № 6: 723 (2014).
16. R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, and O. A. Balitskii, *Physica B*, **487**: 73 (2016).

REFERENCES

1. R. I. Bihun, M. D. Buchkovska, V. M. Havryliukh, Z. V Stasiuk, and D. S. Leonov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **13**, Iss. 2: 285 (2016) (in Ukrainian).
2. A. P. Shpak, R. I. Bihun, Z. V. Stasiuk, and Yu. A. Kynytskyi, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **8**, Iss. 2: 339 (2010) (in Ukrainian).
3. M. D. Buchkovska, R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, and D. S. Leonov, *Metallofiz.*

- Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 12: 1659 (2013) (in Ukrainian).
4. N. T. Gladkikh, S. V. Dukarov, A. P. Kryshchal', V. I. Larin, V. N. Sukhov, and S. I. Bogatyrenko, *Poverkhnostnye Yavleniya i Fazovye Prevrashcheniya v Kondensirovannykh Plenkakh* (Ed. N. T. Gladkikh) (Kharkiv: KhNU im. V. N. Karazina: 2004) (in Russian).
 5. S. V. Dukarov, S. I. Petrushenko, V. N. Sukhov, and I. G. Churilov, *Problems of Atomic Science and Technology*, **89**, No. 1: 110 (2014).
 6. K. L. Ekinci and J. M. Valles, *Acta Metall.*, **46**, No. 13: 4549 (1998).
 7. Z. Stasyuk, *J. Phys. Stud.*, **3**, No. 1: 102 (1999).
 8. Z. V. Stasyuk and A. I. Lopatynskiy, *Fizyka i Khimiya Tverdoho Tila*, **2**, No. 4: 521 (2001) (in Ukrainian).
 9. R. I. Bigun, V. M. Gavrylyukh, Z. V. Stasyuk, and D. S. Leonov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 3: 329 (2016) (in Ukrainian).
 10. Z. Tesanovic, M. Jaric, and S. Maekawa, *Phys. Rev. B*, **57**, No. 21: 2760 (1986).
 11. Z. Tesanovic, *Solid State Phys.*, **20**, No. 6: L829 (1987).
 12. N. Trivedi and N. Ashcroft, *Phys. Rev. B*, **38**, No. 17: 12298 (1988).
 13. G. Fishman and D. Calecki, *Phys. Rev. Lett.*, **62**, No. 11: 1302 (1989).
 14. G. Fishman and D. Calecki, *Phys. Rev. B*, **43**, No. 14: 11581 (1991).
 15. R. I. Bihun and Z. V. Stasyuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **36**, No. 6: 723 (2014) (in Ukrainian).
 16. R. I. Bihun, Z. V. Stasyuk, and O. A. Balitskii, *Physica B*, **487**: 73 (2016).