

PACS numbers: 68.37.-d, 68.55.-a, 78.20.-e, 78.67.-n, 81.15.-z, 81.15.Kk

Особливості структуроутворення тонких плівок міді та визначення їхніх плазмонно-резонансних властивостей

М. Ю. Барабаш^{*,**}, А. А. Колесніченко^{*}, Д. С. Леонов^{*},
Р. В. Литвин^{*,***}, А. Ю. Сезоненко^{*}, І. В. Лук'яненко^{*,**},
Є. Г. Биба^{*,**}, М. М. Ямшинський^{*,**}, Є. М. Бобошко^{*,**}

^{*}*Технічний центр НАН України,
вул. Покровська, 13,
04070 Київ, Україна*

^{**}*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37,
03056 Київ, Україна*

^{***}*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
вул. Омеляна Пріцака, 3,
03142 Київ, Україна*

Основним завданням роботи було визначити особливості формування структури мідних плівок товщиною 100–300 нм на скляних підложжях, отриманих термічним напорошенням та вивчити ефекти оптичних резонансів в тонких металевих плівках міді за допомогою спектрів поглинання та комбінаційного розсіювання. Проведено дослідження атомно-кристалічної структури тонких плівок міді за допомогою рентгенівської дифрактометрії. Проаналізовано механізм утворення острівцевих тонких плівок. Результат

Corresponding authors: Maksim Yuriyovych Barabash
E-mail: mbarabash@nasu.kiev.ua

^{*}*Technical Centre, N.A.S. of Ukraine,
13 Pokrovs'ka Str., UA-04070 Kyiv, Ukraine*

^{**}*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute'
37 Peremohy Ave., UA-03056 Kyiv, Ukraine*

^{***}*I.M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine,
3 Omeljan Pritsak Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: M. Yu. Barabash, A. A. Kolesnichenko, D. S. Leonov, R. V. Lytvyn, A. Yu. Sezonenko, I. V. Lukianenko, Ye. G. Byba, M. M. Yamshynskiy and Ye. M. Boboshko, Peculiarities of Structuring of Thin Copper Films and Determination of Their Plasmon-Resonance Properties, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 2: 169–182 (2023), DOI: 10.15407/mfint.45.02.0169.

перетворення структури визначається енергією взаємодії атомів плівки між собою та з підложжям, а також фізико-технологічними параметрами конденсації та наступних оброблень та відпалу. Ідентифіковано оптичні резонанси мідних плівок на скляних підложжях за допомогою спектрів поглинання та комбінаційного розсіяння.

Ключові слова: дифрактометрія, електронна мікроскопія, оптична спектроскопія, термічне напорошення, острівцеві плівки, розмірні ефекти.

The main task of the work was to determine the peculiarities of structure formation of the copper films with a thickness of 100–300 nm on glass substrates obtained by thermal sputtering and to study the effects of optical resonances in thin metal copper films using absorption and Raman scattering spectra. The research of the atomic crystal structure of thin copper films was carried out using X-ray diffractometry. The formation mechanism of insular thin films was analysed. The result of the structure transformation is determined by the interaction energy of atoms in film with each other and with the substrate, as well as physical and technological parameters of condensation and subsequent processing regime of deposition and annealing. Optical resonances of copper films on glass substrates were identified using absorption and Raman scattering spectra.

Key words: diffractometry, electron microscopy, optical spectroscopy, thermal spraying, thin films, dimensional effects.

(Отримано 21 лютого 2023 р.; остаточн. варіант — 10 березня 2023 р.)

1. ВСТУП

У теперішній час одержання тонких плівок металів і напівпровідників стає все більш актуальним завданням. Сучасна мікроелектроніка ґрунтується саме на тонкоплівкових технологіях [1]. Одними з найпоширеніших методів нанесення тонких плівок та шарів товщиною близько сотень і тисяч нанометрів є методи вакуумного напорошення. Такі методи забезпечують одержання плівок заданого складу та геометричного профілю з високою відтворюваністю. Тому вибір вірної стратегії у технології мікроелектроніки можливий лише на основі аналізу фізичної сутності складних явищ, які відбуваються у плівкових системах під впливом різних зовнішніх чинників. Це в першу чергу відноситься до острівцевих металічних плівок із особливими властивостями, які істотно відрізняються як кількісно, так і якісно від властивостей масивного матеріалу.

Острівцевими плівками прийнято називати тонкі конденсати, які складаються з безлічі ізольованих одна від одної мікрочастинок. Важливою особливістю острівцевих плівок, отриманих в умовах високих перенасичень, є істотно нерівноважний характер їх форми та структури [2]. Еволюція структурно-морфологічних па-

раметрів спричиняє нестабільність електрофізичних характеристик плівкових систем.

Підложжя з нанесеною на нього острівцевою плівкою у багатьох фізичних процесах являє собою єдину, істотно неоднорідну систему. Тому при розгляді фізичних явищ в таких плівках, крім властивостей самих острівців, необхідно враховувати властивості як границі розділу системи плівка — підложжя, так і приповерхневого шару підложжя. Наприклад, електропровідність та низка оптичних характеристик визначаються середньостатистичними параметрами всього масиву острівців, які залежать від фізичної природи підложжя. Особливості, які притаманні тонкоплівковим системам, а саме розмірні ефекти в острівцевих плівках, частинки яких обмежені у трьох вимірах, виражені найбільш яскраво. Морфологічна будова острівцевих плівок дуже сильно залежить від фізико-технологічних умов та параметрів осадження з подальшою обробкою.

2. ВПЛИВ РОЗМІРНИХ ЕФЕКТІВ НА КІНЕТИЧНІ ЯВИЩА У ТОНКИХ ПЛІВКАХ МЕТАЛІВ

Явища, що виникають у зразках з обмеженими розмірами, називають розмірними ефектами. Фізичні властивості таких плівок істотно відрізняються від аналогічних властивостей масивних зразків, що зумовлено значним впливом поверхні плівки. Розмірні ефекти умовно поділяються на фазові розмірні ефекти (виникнення нерівноважних фаз, зміни параметрів ґратки, температур фазових переходів внаслідок впливу обмеження розміру зразка) та кінетичні розмірні ефекти, які пов'язані зі зміною умов перенесення заряду в плівках у процесі зміни її товщини. Коли товщина плівки стає співрозмірною з довжиною вільного пробігу електрона, внесок поверхневого розсіювання у загальний час релаксації стає сумірним внеску об'ємного розсіювання. Даний ефект на експерименті виявляється у розмірних залежностях кінетичних коефіцієнтів тонких плівок (класичний розмірний ефект). Реальна плівка металу має більш дрібнозернисту структуру, ніж масивний зразок металу, а тому межі кристалітів можуть виступати в ролі додаткових центрів розсіювання носіїв струму, що в свою чергу, впливає на кінетичні параметри. Таке явище відоме, як внутрішній розмірний ефект. Моделі класичного розмірного ефекту не враховують можливої зміни електронного енергетичного спектру внаслідок зміни товщини плівки (квантовий розмірний ефект). Врахування даного ефекту особливо актуальне для ультратонких плівок, у яких довжина де Бройлевої хвилі електрона сумірна товщині плівки [3]. Квантовий розмірний ефект передбачає існування осциляційної залежності кінетичних коефіцієнтів від товщини плівки, однак експериментально осциля-

ції кінетичних коефіцієнтів плівок металів часто не спостерігаються внаслідок порушення умов когерентності відбивання носіїв струму поверхнями плівки.

3. МАТЕРІЯЛИ ТА ОБ'ЄКТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Тонкі плівки міді отримано за допомогою модернізованого вакуум-

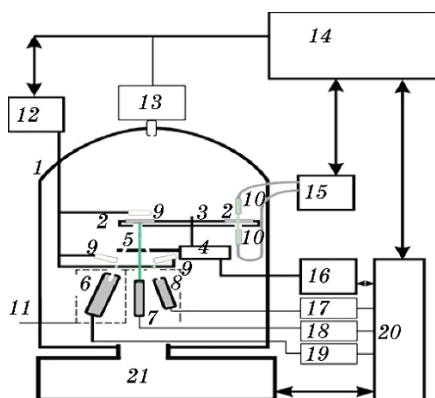


Рис. 1. Схема технологічної установки для виготовлення тонких плівок наноконкомпозитів та тонкоплівкових гетероструктур одночасним осадженням у вакуумі: 1 — вакуумна камера; 2 — зразки; 3 — система транспортування підложжя; 4 — двигун системи транспортування; 5 — заслінка; 6 — випаровувач неорганічного напівпровідника; 7 — випаровувач органічних молекулярних сполук; 8 — випаровувач металу; 9 — кварцові датчики контролю молекулярних пучків та маси плівки; 10 — світловоди; 11 — система охолодження екранів; 12 — контролер кварцових резонаторів; 13 — датчик тиску із контролером; 14 — контролюючий комп'ютер; 15 — оптичний спектрометр; 16 — контролер системи транспортування підложжя; 17, 18, 19 — джерело живлення випаровувача; 20 — аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі та маніпулятори; 21 — вакуумна установка ВУП-5М.

Fig. 1. Scheme of the technological installation for the production of thin films of nanocomposites and thin film heterostructures by simultaneous deposition in a vacuum: 1 — vacuum chamber; 2 — samples; 3 — floor transportation system; 4 — engine of the transportation system; 5 — damper; 6 — evaporator of inorganic semiconductor; 7 — evaporator of organic molecular compounds; 8 — metal vaporizer; 9 — quartz sensors for monitoring molecular beams and film mass; 10 — optical fibres; 11 — screen cooling system; 12 — controller of quartz resonators; 13 — pressure sensor with a controller; 14 — control computer; 15 — optical spectrometer; 16 — controller of the floor transportation system; 17, 18, 19 — evaporator power source; 20 — analog-digital and digital-analog converters and manipulators; 21 — vacuum installation 'VUP-5M'.

ного поста ВУП-5М методом термічного випаровування у вакуумі. Тиск залишкових газів не перевищував 10^{-2} – 10^{-3} Па, температура підложжя складала 370 К (рис. 1). Напорошення відбувалось на скляні підложжя розміром 25×37 мм. Всі підложжя були піддані попередньому очищенню: спочатку хемічному травленню у розчиннику хромової суміші ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ — 100 гр., H_2SO_4 — 50 гр., дистильована вода — до літру), потім плазмохемічному очищенню з використанням приладу «Плазма-600». Підложжя знаходились в ізольованому об'ємі вакуумного посту ВУП-5М (рис. 1).

Схема розташування випарників дозволяла випаровувати матеріял без розгерметизації камери в кілька етапів. Розташування зразків знаходилося над випарником на відстані $h = 8 \cdot 10^{-2}$ м, що сприяло рівномірному осадженню мідних тонких плівок. Перевагою методу є простота конструкції камери і розташування випарників, а також можливість проведення відпалу за один цикл без розгерметизації камери. Масову товщину плівок оцінювали по зсуву резонансної частоти п'єзокварцового датчика (тип КР-1554 ЛАЗ) з чутливістю $6 \cdot 10^{-8}$ кг/м², програмно-контрольований дрейф частоти не перевищував 10 Гц/год. Це дозволяло забезпечити необхідну товщину плівок. Весь процес випаровування контролювався програмним забезпеченням з виведенням даних на екран монітора ПК.

4. ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ПЛІВОК ТА ВЗАЄМОДІЯ ОСТРІВЦІВ З ПІДЛОЖЖЯМ НА ГРАНИЦІ РОЗДІЛУ

Достовірну інформацію про структуру плівок металів одержано в результаті здійснення комплексних електронно-мікроскопічних та рентгеноструктурних досліджень, виконаних з використанням стандартних методик, детально описаних в [4]. Аналіза структури отриманих плівок проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа JSM-6490 LV та Раманової спектроскопії. Вона є найбільш інформативним методом, даючи уявлення про коливальні властивості матеріялів [5, 6]. Спектри отримані на спектрометрі (Renishaw Raman) із максимальною потужністю випромінювання 170 мВт на довжині хвилі 633 нм.

З аналізу результатів електронно-мікроскопічних (рис. 2) та рентгеноструктурних досліджень випливає, що плівки, вирощені за описаною вище технологією утворення, є острівцевими з однорідною полікристалічною структурою металу без переважаючої орієнтації кристалітів. Відомо, що процес конденсації і структура плівок, що утворюється, істотно залежать від кінетичних параметрів конденсації — температури підложжя, щільності падаючого молекулярного пучка. Він визначає концентрацію адсорбованих атомів, характер взаємодії осаджених атомів з підложжям [7].

Плівки утворюється із багатьох дискретних зародків (рис. 2), їх

орієнтація та зміщення відносно один одного призводить до утворення дислокацій та сітки вакансій в області контакту островків, а також до пружних напружень у плівці.

Таким чином, структура межі поділу для даної пари плівка-підложжя залежить і від стадії кристалізації. Морфологічні зміни острівцевих плівок мають складний характер. Результат перетворення структури визначається енергією взаємодії атомів плівки між собою та з підложжям, а також фізико-технологічними параметрами конденсації та наступною обробкою, в особливості температурним режимом осадження та відпалу. Еволюція морфологічних характе-

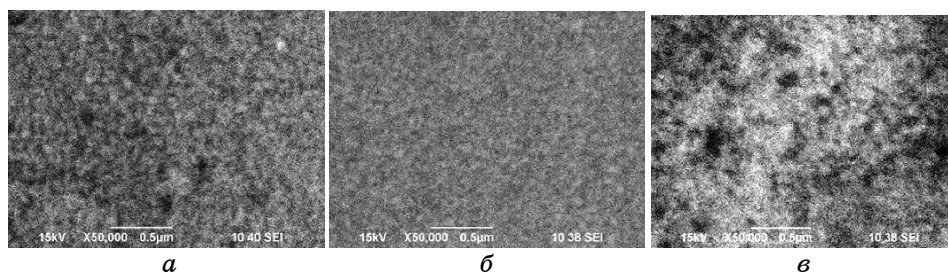


Рис. 2. Мікроструктура плівок міді різної товщини осаджених на чисте підложжя: *a* — ($d_{\text{Cu}} = 80$ нм); *б* — ($d_{\text{Cu}} = 200$ нм); *в* — ($d_{\text{Cu}} = 300$ нм).

Fig. 2. Microstructure of copper films of different thickness deposited on a clean substrate: *a* — ($d_{\text{Cu}} = 80$ nm); *б* — ($d_{\text{Cu}} = 200$ nm); *в* — ($d_{\text{Cu}} = 300$ nm).

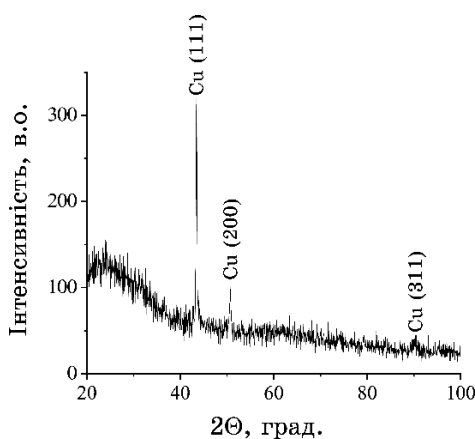


Рис. 3. Дифрактограма тонких плівок міді, одержаних методом термічного напорошення в установці ВУП-5М.

Fig. 3. Diffraction pattern of thin copper films obtained by thermal sputtering in the 'VUP-5M' installation.

ТАБЛИЦЯ 1. Результати розрахунку дифрактограм.

TABLE 1. The results of the calculation of diffractograms.

Товщина плівки, нм	Кут 2θ , град.	Міжплощинна відстань, d , Å	Параметр елементарної комірки, a , Å
100	43,43789	2,081466	3,60094
150	43,40076	2,083161	3,60387
200	43,40904	2,081415	3,60512
300	43,42536	2,082052	3,60622

ристик (щільності, розміру, форми островків та проміжків між ними) здійснюється двома шляхами: за рахунок індивідуального формозмінення кожного островка та за рахунок взаємодії між островками. По мірі зростання середньої товщини плівок, крім зменшення числа островків, у визначеному інтервалі товщин відбувається інверсія середньої відстані між островками, тобто цей параметр збільшується [2]. Монотонне зменшення середньої відстані між островками у процесі росту плівки повинно відбуватись у випадку, якщо зростаючі островки нерухомі і середнє відношення висоти островка до площини його підґрунтя не збільшується.

Дослідження атомно-кристалічної структури тонких плівок міді (рис. 3) здійснено методом рентгенівської дифрактометрії [8] на рентгенівському дифрактометрі Ultima-IV, виробництва Rigaku, Японія (Київ, Національний технічний університет України (КП) імені Ігоря Сікорського). Проводилася зйомка полікристалічного матеріалу в паралельному пучку монохроматичного (характеристичного) випромінювання з мідного аноду (довжина хвилі для $K_{\alpha 1} = 1,54051$ Å). Дифракційні умови виконуються для тих кристалів, в яких площини (hkl) утворюють кут θ з падаючим випромінюванням. Дифраговане випромінювання реєструвалось на ПК. Ідентифікацію піків на дифрактограмах проводили за допомогою програмного комплексу ICDD PDF-2 та PDF-4. З отриманих дифрактограм були розраховані міжплощинні відстані d за законом Вульфа-Брегга, а також визначено параметр елементарної комірки a (табл. 1).

Отримані результати, які наведені у табл. 1, свідчать, що із збільшенням товщини напорошеної плівки спостерігається збільшення параметру елементарної комірки міді (рис. 4).

5. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОПТИЧНИХ РЕЗОНАНСІВ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК НА СКЛЯНОМУ ПІДЛОЖЖІ

Методом термічного вакуумного напорошення на поліровані скляні (cat.no.7102, CHINA) підложжя були нанесені тонкі плівки міді рі-

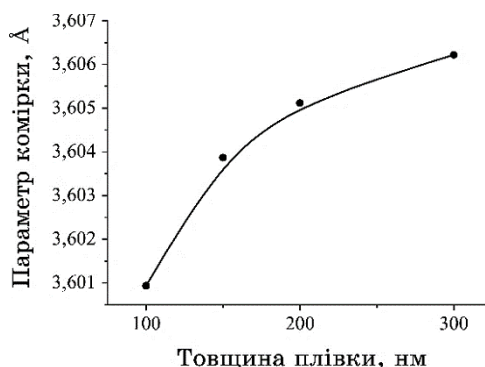


Рис. 4. Параметр елементарної комірки для мідних плівок різної товщини.

Fig. 4. Parameter of the unit cell for copper films of different thicknesses.

зної товщини нанокластерної структури з електроопором від 1 Ом до декілька МОм. При зміні товщини шару d відносний внесок поверхневих явищ може варіюватися від нехтовно малого до домінуючого. Так, у режимі дифузного об'ємного розсіювання носіїв струму, який спостерігається у шарах (плівках) мікронних товщин, явища переносу досить добре описуються у рамках моделі вільних електронів, а електрофізичні властивості плівок в основному визначаються процесами, що протікають в об'ємі плівки [9]. Спектри поглинання скляного підложжя та мідних плівок на підложжі були отримані на спектрометрі Shimadzu UV-2401PC. Спектри КР зразків знімалися за допомогою спектрометра Renishaw InVia Raman Microscope при двох значеннях довжини хвилі збудження 633 і 785 нм з аналізом частотного критерію розсіювання випромінення [10, 11]. Типові спектри поглинання та КР скляних підкладок наведені на рис. 5.

Спектер поглинання (рис. 5, а) свідчить, що скло (cat.no.7102) має смугу з максимумом поглинання близько 5 еВ. Спектральна залежність показника поглинання на низькоенергетичному крилі цієї смуги описується експоненціальною залежністю від енергії квантів (правило Урбаха). Такий вид спектра поглинання є типовим для аморфних речовин і спричинений варіацією довжин і кутів зв'язків у матриці скла. Край смуги поглинання лежить в районі 350 нм та характеризує величину забороненої зони, величина якої дорівнює 3,5 еВ. Реєстрація спектрів КР (рис. 5, б) відбувалась у двох режимах: за збудження КР ($I_{\text{потуж}} = 5,0 \text{ кВт/см}^2$) світлом з довжиною хвилі 633 нм (1,96 еВ) і світлом ($I_{\text{потуж}} = 7,5 \text{ кВт/см}^2$) з довжиною хвилі 785 нм (1,6 еВ). Спектри характеризуються низкою особливостей, мають різну форму, залежать від довжини хвилі збуджуючого світла [10, 11].

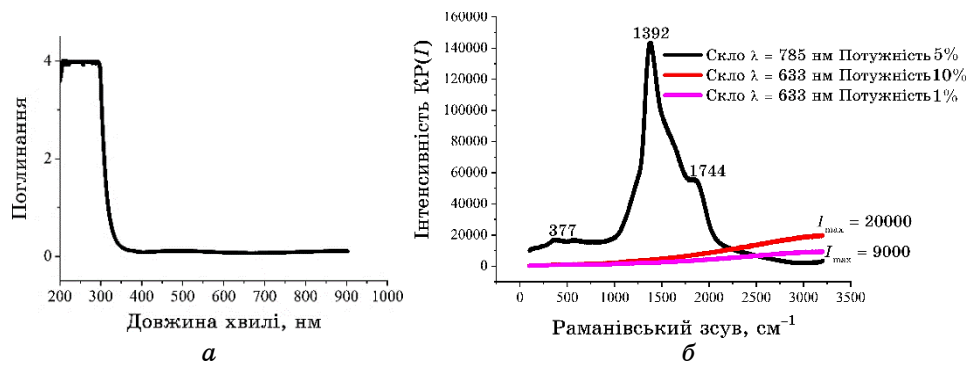


Рис. 5. Оптичні спектри: спектр поглинання скла (а); спектр рекомбінаційної фотолюмінесценції скла при впливі світлом КР (б). Максимальна потужність випромінювання лазера (633, 785 нм) — 100 мВт та 300 мВт. Скло (cat.no.7102, CHINA).

Fig. 5. Glass (cat.no.7102, CHINA): *a* — absorption spectrum; *b* — Raman spectrum at different wavelengths of excitation light. The output power of the laser (633 and 785 nm) is 100 mW and 300 mW (100%).

Спектр КР скла ($\lambda = 785$ нм) являє собою сукупність широких смуг з неявно вираженими максимумами. Він не має вузьких піків, які, як правило, відповідають мікродомішкам скляної матриці. Амплітуда сигналу розсіювання при збудженні світла з довжиною хвилі 633 нм менше, ніж з $\lambda = 785$ нм. Спектр показує монотонне збільшення сигналу у низькоенергетичній області, що підтверджується наявністю глибоких дефектних рівнів. При збільшенні інтенсивності збуджуючого (рис. 5, б) світла у 10 разів величина сигналу збільшується у 2 рази. Така залежність сигналу розсіювання не типова для спонтанного і вимушеного КР, і свідчить про рекомбінаційну люмінесценцію скла під дією збуджуючого світла КР [11]. В цьому випадку, при збудженні у склі йонізуються певні центри, у процесі чого утворюються дві різнойменно заряджені і незалежні одна від одної частинки. Випромінювання відбувається при їх рекомбінації і характеризується значним Стоксовим зміщенням випромінювання [12].

На рисунку 6, а наведені спектри поглинання об'ємної міді, у якій відсутні значні смуги поглинання, а на рис. 6, б наведені спектри поглинання плівок міді з опором (7 Ом–3,5 МОм), які були напорошені на скляне підложжя за $T = 300$ К. В спектрах можна виділити характерні для мідних плівок смуги поглинання (мінімальне значення при $\lambda = 560$ нм) [11], які перестають проявлятися зі зменшенням товщини плівок. Плівки з опором 7–10 Ом товщиною 70–120 нм мають максимум кривої поглинання близько 700 нм, що можна пов'язати з ефектом плазмонного поглинання [13]. Більш тонкі плівки такого

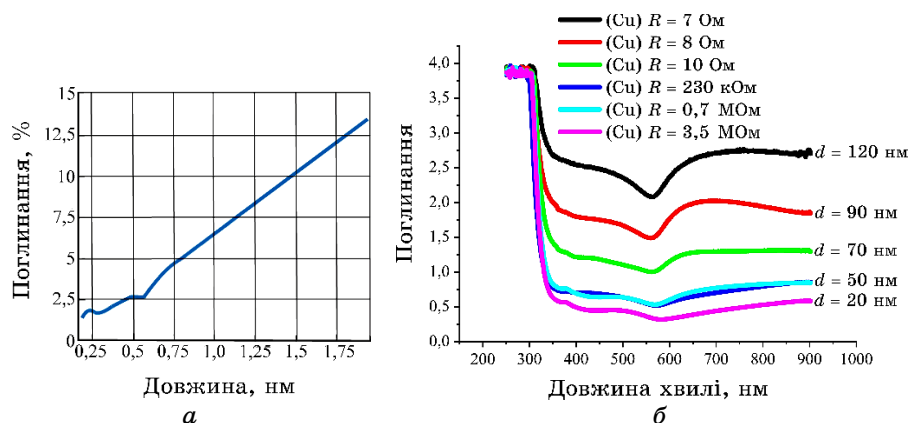


Рис. 6. Спектр поглинання [1, 15]: *a* — об'ємної міді; *б* — плівки міді з різним електропором на скляному (cat.no.7102) підложжі.

Fig. 6. Absorption spectrum [1, 15]: *a* — bulk copper; *б* — copper films with different electrical resistance on a glass (cat. no. 7102) substrate.

максимуму не мають. Оцінка за довгохвильовим порогом поглинання спектральних кривих ($\lambda = 560\text{--}570$ нм) показує, що оптична ширина забороненої зони речовини плівки дорівнює $E_g = 2,17\text{--}2,21$ еВ. Це відповідає даним для оксиду Купруму ($E_g = 2,18$ еВ) [14].

Вирівнювання спектральних кривих поглинання плівок зі зменшенням їх товщини можна пояснити збільшенням частки оксиду міді в тонких плівках, які знаходяться в атмосферних умовах.

Відомо, що оксид Купруму у довгохвильовій області ($\lambda = 900$ нм) не поглинає світло [11], а мідь поглинає. Це доповнюється спостереженням 20% збільшення опору мідних плівок при напуску повітря у камеру випаровування установки.

На рисунку 7, *a* наведені спектри КР тонких плівок міді з опором 7, 8, 10 Ом, напорошені на скляні підложжя з різною напруженістю ($E = 80,74,70$ В/см) поля електронного випаровувача вакуумної установки ВУП 5М. У цьому випадку при напорошенні міді відбувається електронне збудження та йонізація атомів міді, що визначається складними механізмами зростання та осадження матеріалу на підложжя. Спектри КР міді мають різний (рис. 7, *a, б*) вигляд при збудженні світлом з довжиною хвилі 785 нм через різну структуру плівок, їх взаємодії зі спектральним складом випромінювання скла. Плівка з опором 8 Ом/см² ($d = 90$ нм), поглинає сильніше ніж плівка з опором 10 Ом ($d = 70$ нм), і слабше, ніж плівка з опором 7 Ом ($d = 120$ нм) (рис. 6, *б*). Однак вона має найбільшу інтенсивність КР (смуги 1600 см⁻¹ і 1850 см⁻¹) (рис. 7, *a*), що свідчить про наявність нелінійних оптичних властивостей, які пов'язані з фрактальною стру-

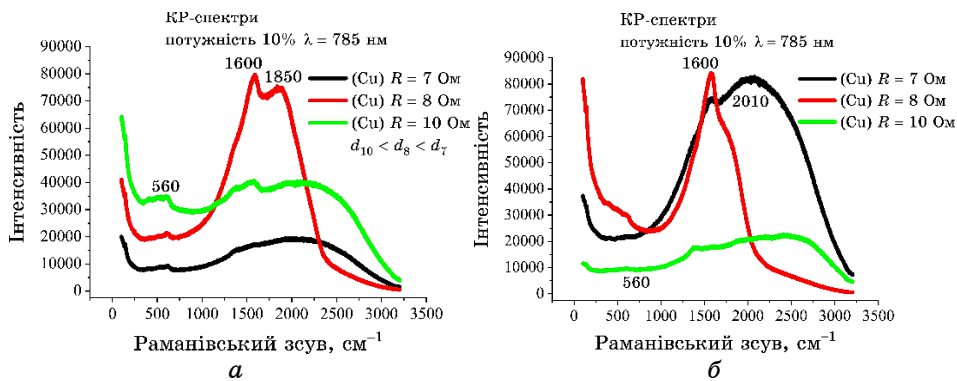


Рис. 7. Спектр КР мідних плівок різного електроопору на скляному підложжі: *a* — при одній експозиції; *б* — при подвійній експозиції.

Fig. 7. CR spectrum of copper films of different electrical resistance on a glass substrate: *a* — at one exposure; *b* — with double exposure.

ктурою агрегатів плівки [16–18]. Відомо, що фрактальна структура агрегатів призводить до виникнення значних оптичних нелінійностей на частоті поверхневого плазмону. В силу властивості фрактальним агрегатам локальної анізотропії оточення кожної частинки, взаємної компенсації локального поля не відбувається. Тому, оптичне випромінювання індукує електродинамічні взаємодії фрактальних частинок, і поблизу частинок — складових фракталу виникають локальні поля в десятки разів вищі за середнє поле, яке збуджує плазмонні коливання [18].

Це супроводжується появою резонансів електромагнітного поля всередині металевих частинок плівки, перенесенням електронів з частинок металу в матрицю скла, які призводять до збільшення інтенсивності випромінювання. Подібні ефекти спостерігалися в підложжях з мідними шарами з опором кілька кОм, хоча інтенсивність спектра КР була менше (рис. 7, б).

6. ВИСНОВКИ

Показано, що плівки, вирощені за описаною вище технологією, є острівцевими з однорідною полікристалічною структурою металу без переважаючої орієнтації кристалітів. Плівки утворюються із багатьох дискретних зародків, їх орієнтація та зміщення відносно один одного призводить до утворення дислокацій та сітки вакансій в області контакту острівців, а також до пружних напружень у плівці. Таким чином, структура границі розділу для даної пари плівка-підложжя залежить і від стадії кристалізації. Морфологічні зміни

острівцевих плівок мають складний характер. Результат перетворення структури визначається енергією взаємодії атомів плівки між собою та з підложжям, а також фізико-технологічними параметрами конденсації та наступною обробкою, в особливості температурним режимом осадження та відпалу.

Для плівок з товщиною менше 100 нм параметр елементарної комірки збільшується з ростом товщини плівки, яка формується на скляному підложжі, що може бути пов'язано з ефектом епітаксії.

Показано, що люмінесценція скляних підложжів під дією КР, на які напорошені тонкі плівки міді, сприяє ідентифікації їх плазмонних властивостей. Резонанси ідентифікують шляхом зіставлення спектрів поглинання та КР при різних довжинах хвиль збуджуючого світла. Серед зразків з близьким рівнем поглинання, зразок з найбільшою амплітудою сигналу КР характеризується максимальним значенням оптичних резонансів. Як правило, такі плівки під впливом збуджуючого світла змінюють колір та спектр КР.

Запропоновано методику ідентифікації та управління світлом резонансних властивостей тонких металевих плівок. Металеві плівки, які отримувались осадженням на скло, аналізували шляхом зіставлення спектрів поглинання та комбінаційного розсіяння (КР) з різними довжинами хвиль збуджуючого світла. За найбільшою амплітудою сигналу КР визначався зразок з максимальним значенням оптичних резонансів, що дозволяло діагностувати плазмонний ефект у металевих плівках без використання аналізу (речовини, що аналізується).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. М. Ю. Барабаш, *Журнал нано- та електронної фізики*, **10**, №1: 01025 (2018).
2. Л. И. Трусов, В. А. Холмянский, *Островковые металлические пленки* (Москва: Металлургия: 1973).
3. А. П. Шпак, Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, Ю. А. Куницький, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **8**, №2: 339 (2010).
4. Ю. А. Куницький, Я. І. Купина, *Електронна мікроскопія* (Київ: Либідь: 1998).
5. A. C. Ferrari and J. Robertson, *Phys. Rev. B*, **61**, No. 20: 14095 (2000).
6. Yu. Liu, C. Pan, and J. Wang, *J. of Materials Science*, **39**: 1091 (2004);
7. Ю. Ф. Комник, *Фізика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты* (Москва: Атомиздат: 1979).
8. Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев, *Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия* (Москва: Металлургия: 1982).
9. Р. І. Бігун, З. В. Стасюк, М. Ю. Барабаш, Ю. А. Куницький, *Хімія, фізика та технологія поверхні*, **1**, №2: 128 (2010).
10. М. Ю. Барабаш, А. А. Колесніченко, Д. С. Леонов, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **8**, №2: 339 (2010).

- матеріали, нанотехнології*, **15**, №4: 757 (2017).
11. M. Yu. Barabash, G. G. Vlaykov, A. A. Kolesnichenko, and L. V. Rybov, *Selected Papers from the 2018 International Conference on 'Nanomaterials: Applications & Properties'* (Springer Nature Singapore Pte ltd.: 2019), p. 169.
 12. J. Robertson, *Adv. Phys.*, **35**: 317 (1986).
 13. M. Yu. Barabash, E. I. Martynchuk, E. S. Zhitluchina, 'XXII Galyna Puchkovska International School-Seminar Spectroscopy of Molecules and Crystals' (September 27–October 4, 2015) (Uzhgorod: Chynadiyovo: 2015), p. 260.
 14. В. Б. Лазарев, В. В. Соболев, И. С. Шаплыгин, *Химические и физические свойства простых оксидов металлов* (Москва: Наука: 1983).
 15. <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Cu&page=Johnson>
 16. M. Yu. Barabash, G. G. Vlaykov, A. A. Kolesnichenko, R. V. Litvin, A. Yu. Sezonenko, and V. E. Martynchuk, *Proceedings of the 2018 IEEE 8-th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018)* (9–14 September, 2018) (Odessa: Zatoka: 2018), Part 3, p. 03TFNMC03-1-4.
 17. M. Yu. Barabash, S. O. Sperkach, and V. E. Martynchuk, *Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2017)* (23–26 серпня 2017) (Чернівці: 2017), с. 401.
 18. A. V. Butenko, Yu. E. Danilova, P. A. Chubakov, S. V. Karpov, A. K. Popov, S. G. Rautian, V. P. Safonov, V. V. Slabko, V. M. Shalaev, and M. I. Stockman, *Z. Phys. D*, **17**: 283 (1990).

REFERENCES

1. M. Yu. Barabash, *Zhurnal Nano- ta Elektronnoy Fizyky*, **10**, No. 1: 01025 (2018).
2. L. I. Trusov and V. A. Holmjanskij, *Ostrovkovyye Metallicheskie Plenki* (Moskva: Metallurgiya: 1973).
3. A. P. Shpak, R. I. Bihun, Z. V. Stasiuk, and Yu. A. Kuniyskiy, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **8**, No. 2: 339 (2010).
4. Yu. A. Kuniyskiy and Ya. I. Kupyna, *Elektronna Mikroskopiya* (Kyiv: Lybid: 1998).
5. A. C. Ferrari and J. Robertson, *Phys. Rev. B*, **61**, No. 20: 14095 (2000).
6. Yu. Liu, C. Pan, and J. Wang, *J. of Materials Science*, **39**: 1091 (2004).
7. Yu. F. Komnik, *Fizika Metallicheskih Plenok. Razmernyye i Strukturnyye Ehfefekty* (Moskva: Atomizdat: 1979).
8. Ya. S. Umanskiy, Yu. A. Skakov, A. N. Ivanov, and L. N. Rastorguev, *Krystallografiya, Rentgenografiya i Ehlektronnaya Mikroskopiya* (Moskva: Metallurgiya: 1982).
9. R. I. Bihun, Z. V. Stasiuk, M. Yu. Barabash, and Yu. A. Kuniyskiy, *Khimiya, Fizyka ta Tekhnolohiya Poverkhni*, **1**, No. 2: 128 (2010).
10. M. Yu. Barabash, A. A. Kolesnichenko, and D. S. Leonov, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **15**, Iss. 4: 757 (2017).
11. M. Yu. Barabash, G. G. Vlaykov, A. A. Kolesnichenko, and L. V. Rybov, *Selected Papers from the 2018 International Conference on 'Nanomaterials: Applications & Properties'* (Springer Nature Singapore Pte ltd.: 2019), p. 169.
12. J. Robertson, *Adv. Phys.*, **35**: 317 (1986).
13. M. Yu. Barabash, E. I. Martynchuk, and E. S. Zhitluchina, 'XXII Galyna Puchkovska International School-Seminar Spectroscopy of Molecules and Crystals

- (September 27–October 4, 2015, Chynadiyovo–Uzhgorod), p. 260.
14. V. B. Lazarev, V. V. Sobolev, and I. S. Shaplygin, *Khimicheskie i Fizicheskie Svoystva Prostyykh Oksidov Metallov* (Moskva: Nauka: 1983).
 15. <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Cu&page=Johnson>
 16. M. Yu. Barabash, G. G. Vlaykov, A. A. Kolesnichenko, R. V. Litvin, A. Yu. Sezonenko, and V. E. Martynchuk, *Proceedings of the 2018 IEEE 8-th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018) (9–14 September, 2018, Zatoka–Odessa)*, Part 3, p. 03TFNMC03-1-4.
 17. M. Yu. Barabash, S. O. Sperkach, and V. E. Martynchuk, *Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2017) (23–26 August, 2017, Chernivtsi)*, p. 401.
 18. A. V. Butenko, Yu. E. Danilova, P. A. Chubakov, S. V. Karpov, A. K. Popov, S. G. Rautian, V. P. Safonov, V. V. Slabko, V. M. Shalaev, and M. I. Stockman, *Z. Phys.D*, **17**: 283 (1990).