

“Мікроструктурні та фазові особливості зумовлені надлишковою енергією інтерфейсів високодисперсних систем з огляду на їх прикладне використання”

Дукаров С.В., Петрушенко С.І., Сухов В.М.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
61022, Україна,
petrushenko@karazin.ua +380974540076

Харків 2024

Стан питання

Серед широкого спектру досліджень, що проводяться Лабораторією фізики тонких плівок варто виділити наступні напрямки:

Переохолодження в бінарних плівках

Переохолодження при кристалізації розплавів обумовлено необхідністю утворення границі розділу між розплавом та новою фазою під час фазового перетворення. В рамках цих досліджень апробовані *in situ* методики визначення температур кристалізації двокомпонентних плівок та встановлені температури кристалізації легкоплавкого компонента в широкому спектрі бінарних систем

Термічне диспергування плівкових систем

Масиви металевих частинок є перспективним об'єктом сучасних технологій. Вакуумні методи створення таких структур є зручним способом отримання зразків, придатних для наукових досліджень. Було встановлено, що процес диспергування початково суцільних шарів може бути спрощено завдяки внесенню в полікристалічну плівку, яка диспергується невеликої кількості легкоплавкого компонента, рідка фаза якого спрощує диспергування

Розмірні ефекти в плівкових системах

Зміна параметрів речовини, які в масивному стані не залежать від розміру мож мати місце при переході до нанорозмірних систем. В найпростіших моделях це явище пояснюється надлишковою енергією поверхні частинки. В рамках кандидатської дисертації встановлено збільшення взаємної розчинності в системах мід–свинець та мід–вісмут. Спостережуване збільшення розчинності досить значне, аби очікувати зміщення контурів фазових діаграм досліджуваних систем

Стан питання

Результати досліджень, виконаних в попередні роки показали необхідність їх розширення, зокрема

Переохолодження в плівкових системах

Встановлені особливості кристалізації в системах “вісмут-полікристалічний шар металу” вимагають доповнення досліджених контактних пар новими системами. Результати дослідження переохолодження однокомпонентних плівок легкоплавких металів доцільно поширити на сплави різних концентрацій. Окремого розгляду вимагає взаємозв’язок між структурою більш тугоплавкого шару, зокрема розміру його кристалітів, та особливостями кристалізації легкоплавкого компоненту

Термічне диспергування плівкових систем

Попередні дослідження вказують на важливу роль кристалітів в диспергуванні початково суцільних плівок металів. З огляду на це виглядає доцільним шляхом розгляду модельних систем встановити взаємозв’язок початкового стану плівок та морфології масивів, які виникають при їх диспергуванні. Дослідження однокомпонентних плівок варто доповнити вивченням сплавів, що дозволить встановити концентраційні особливості процесів самовпорядкування речовини плівок, які відбуваються при диспергуванні вакуумних конденсатів

Розмірні ефекти в плівкових системах

Класичні розмірні ефекти спостерігаються на розрізаних частинках та є добре вивченим явищем. Проте вони можуть виникати не тільки завдяки надлишковій енергії зовнішніх границь, а й бути обумовлені внутрішніми інтерфейсами, зокрема міжзереними границями та інтерметалічними поверхнями. Такі явища пов’язані з внутрішньою структурою плівок та можуть спостерігатись у фактично масивних зразках. Дослідження цих аспектів не лише сприятиме розширенню загальнонаукових уявлень про нанокompозити, а й матиме важливе прикладне значення

Загальнонаукові результати описаних фундаментальних аспектів необхідно доповнити прикладними дослідженнями функціональних нанокompозитних систем

Короткий зміст доповіді

В доповіді наведено результати комплексних досліджень, спрямованих на встановлення взаємозв'язку між різноплановими фізичними явищами, які відбуваються під час відпалювання нанорозмірних та нанокompозитних структур з огляду на їх прикладне використання.

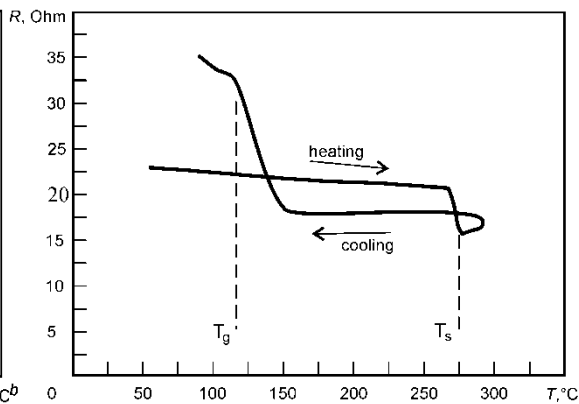
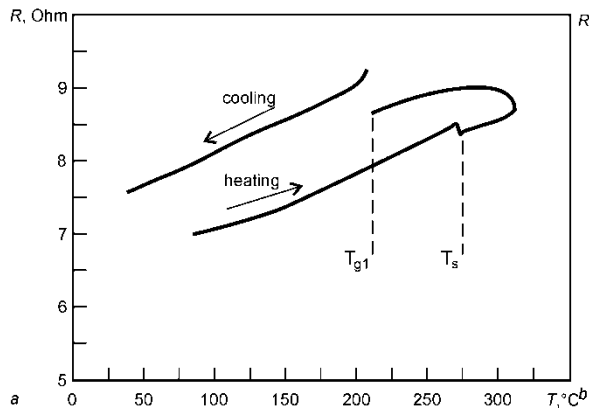
В першій частині доповіді наведено переважно загальнонаукові результати, які присвячено дослідженню переохолодження під час кристалізації металів та сплавів, що перебувають у контакті з різними матеріалами, розмірним ефектам, які обумовлені внутрішньою наноструктурою пліткових систем та процесам морфологічної еволюції плівок, що супроводжують їх відпалювання.

Друга частина доповіді присвячена прикладним дослідженням наноструктурованих функціональних шарів. На прикладі плівок ZnO та CuI показано, що нанокристалічні плівки цих напівпровідникових сполук є перспективним матеріалом для розвитку сенсорних технологій, термоелектричних матеріалів та функціоналізованих тканин.

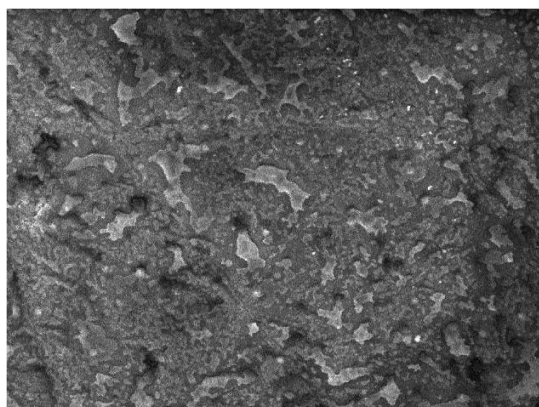
В усіх випадках фактором, що об'єднує дослідження, є внутрішні границі, які забезпечують наноструктурований стан об'єктів дослідження та вимагають врахування розмірних ефектів навіть в тому випадку, коли зразки, взагалі-то кажучи, є масивними структурами

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

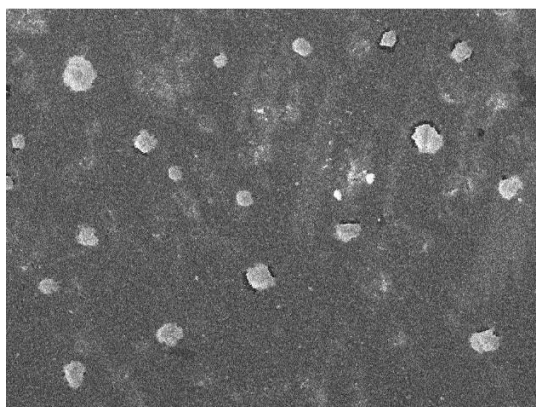
Системи на основі однокомпонентних легкоплавких шарів



Залежність електричного опору від температури в плівках Ag/Bi/Ag, в яких вісмут було конденсовано за механізмом пар-кристал (a) та пар-рідина (b).

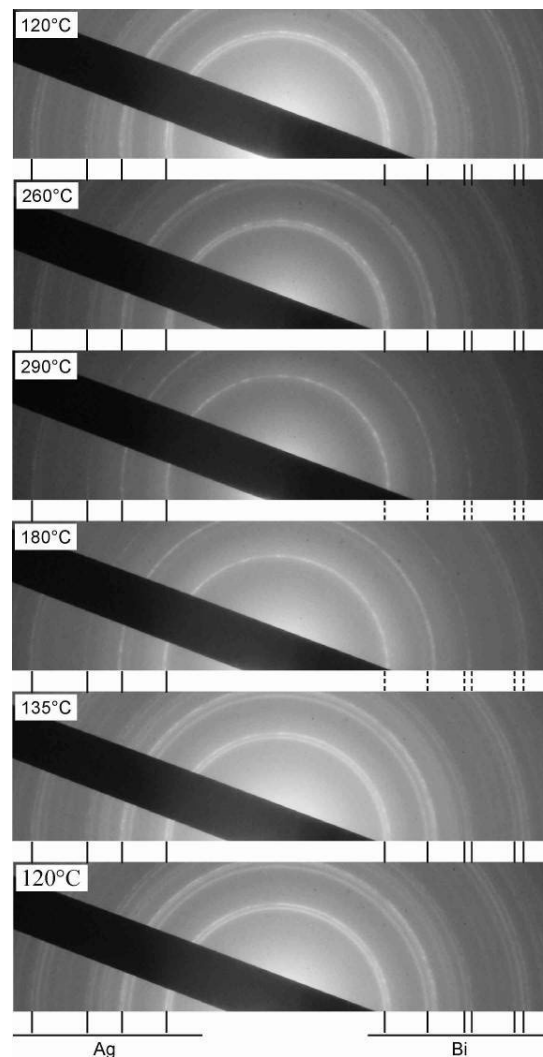


a SEI 20kv x500 10µm
Karazin National University Ag_Bi_v-k WD:31m I:311 No:10140 21.07.17



b SEI 20kv x500 10µm
Karazin National University Ag_Bi_v-L WD:21m I:311 No:10123 21.07.17

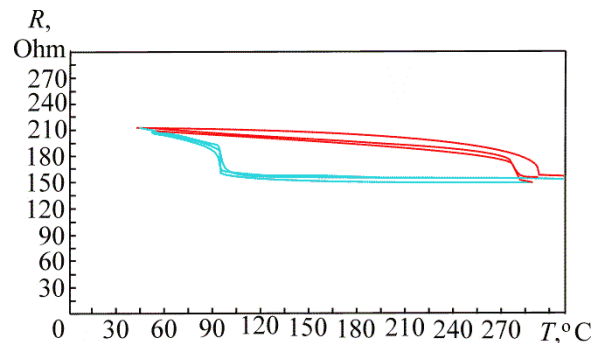
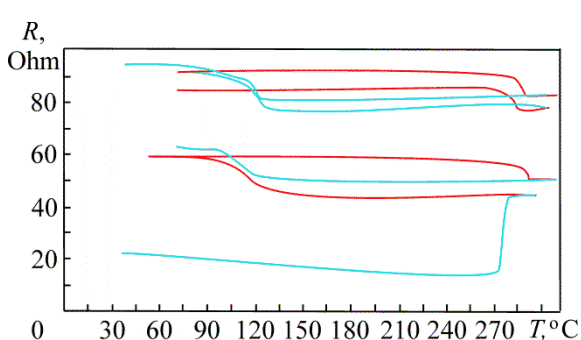
SEM зображення плівок Bi/Ag, в яких вісмут конденсували за механізмами пара-кристал (a) і пара-рідина (б)



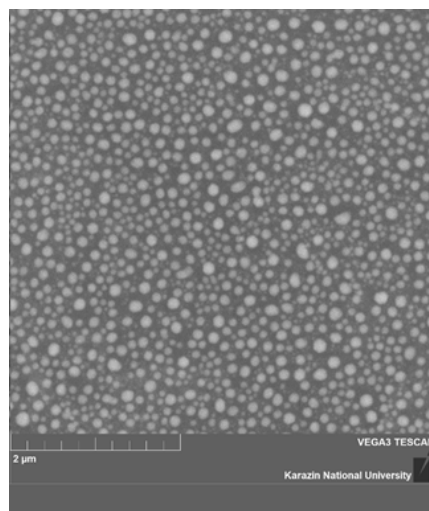
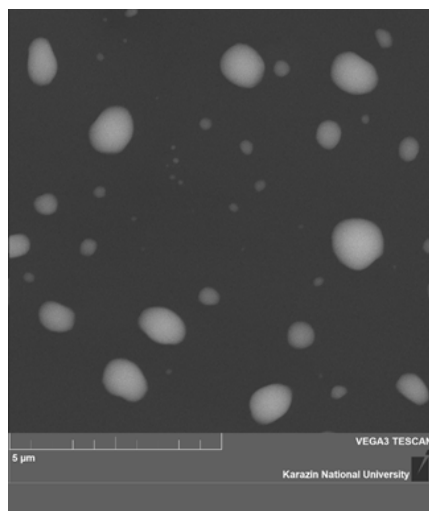
Електронogramи плівки Bi/Ag, які відповідають циклу нагрівання-охолодження

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

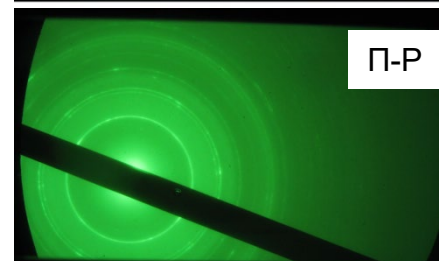
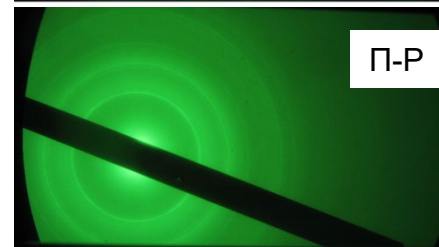
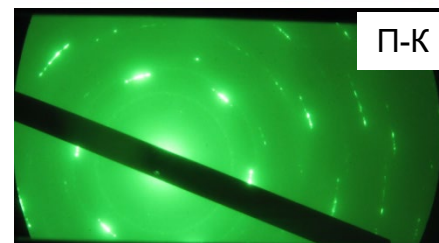
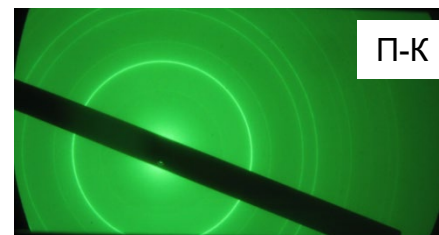
Системи на основі однокомпонентних легкоплавких шарів



Залежність електричного опору від температури в плівках Bi/V, в яких вісмут було конденсовано за механізмом пар-кристал (а) та пара-рідина (б).



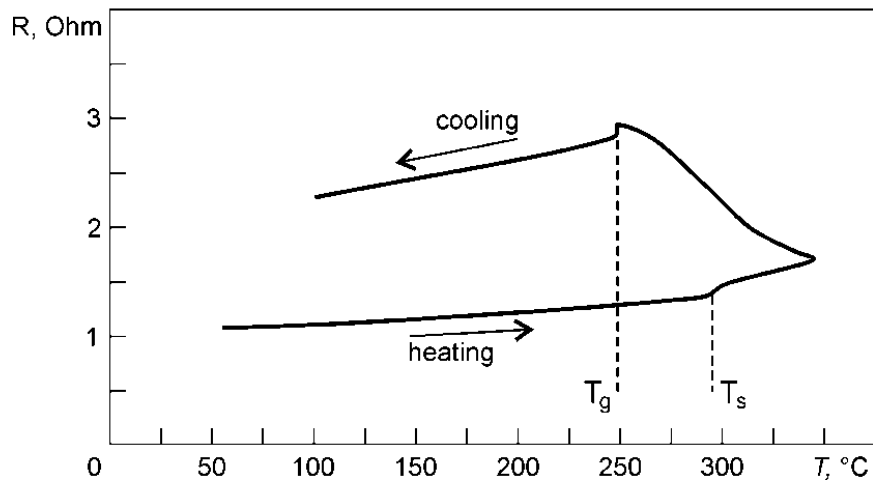
SEM зображення плівок Bi/V, в яких вісмут конденсували за механізмами пара-кристал (а) і пара-рідина (б)



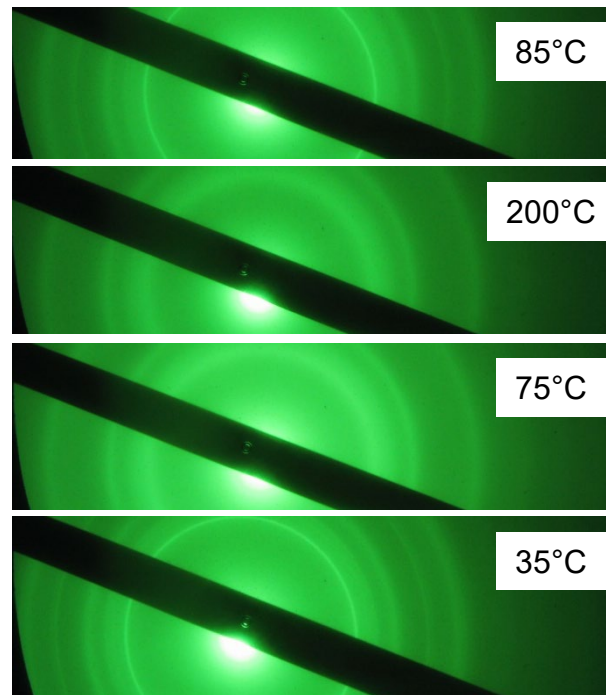
Електроннограмми плівок Bi/V, отриманих за різними механізмами конденсації які відповідають вихідним зразкам, та плівкам, що зазнали кристалізації після плавлення

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

Системи на основі однокомпонентних легкоплавких шарів



Температурна залежність електричного опору плівок Ag/Pb/Ag , нанесених на тонкий шар молібдену

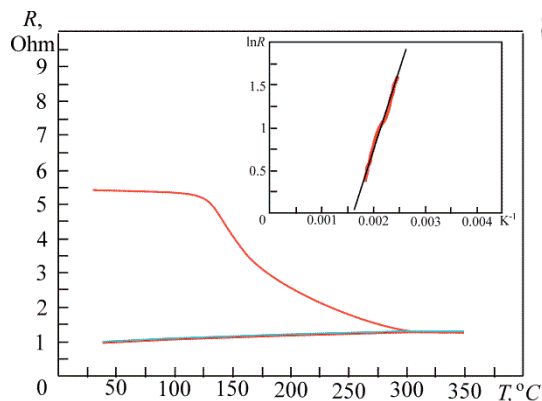
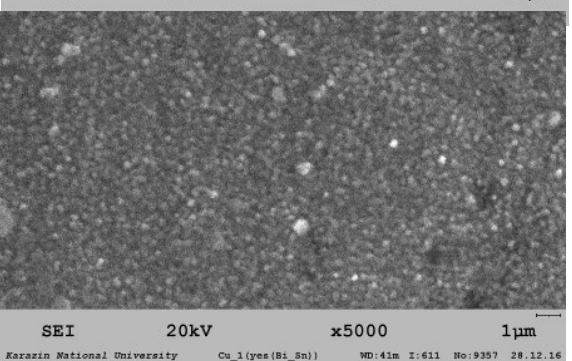
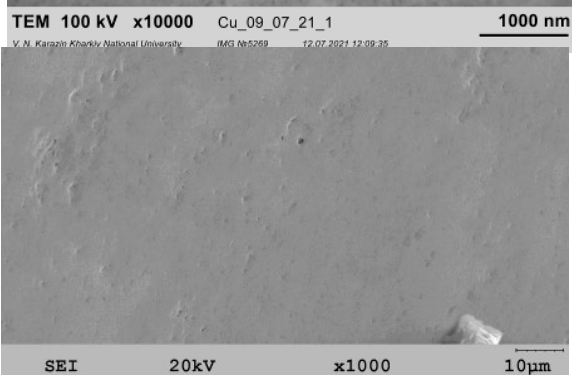
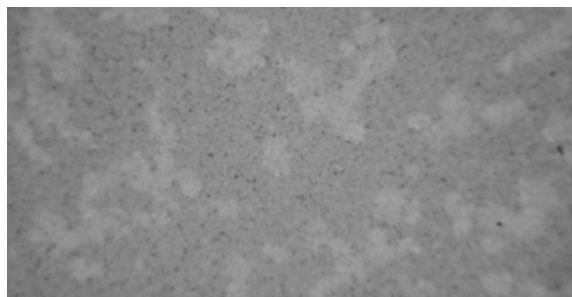


Серія електронограм плівок In/V , яка відповідає циклу нагрівання-охолодження

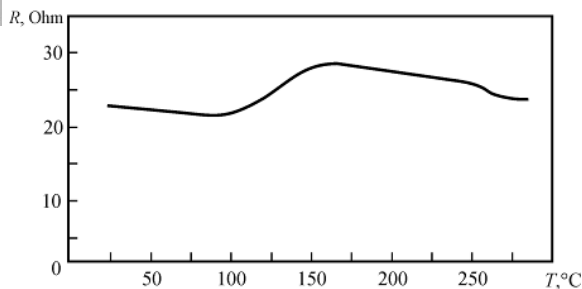
Встановлено, що кристалізація вісмуту в системі Bi/Ag аналогічна тій, яка спостерігалась в плівках Bi/Cu . Для зразків, конденсованих за механізмом пара-кристал спостерігаються невеликі переохолодження, лавиноподібна кристалізація та об'єднана система легкоплавких включень. Для плівок в яких вісмут осаджено в рідку фазу, кристалізація стає дифузною, а величина переохолодження наближається до теоретичного максимуму. Деяко інша поведінка має місце в плівках Bi/V , в яких отримано рекордні переохолодження. В цих зразках об'єднана система легкоплавкого компонента не утворюється, а зміна механізму конденсації впливає на розмір частинок, які внаслідок самоорганізації утворюються на поверхні шару ванадію. Разом з розміром частинок змінюється й температурний інтервал кристалізації, який в цій системі зменшується при конденсації вісмуту в рідку фазу. Вірогідно, відмінності між плівками Bi/Ag та Bi/V пов'язані зі значно різним розміром кристалітів тугоплавкого шару. Поведінка легкоплавкого компонента в плівках Pb/Ag та In/V відповідає попереднім результатам.

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

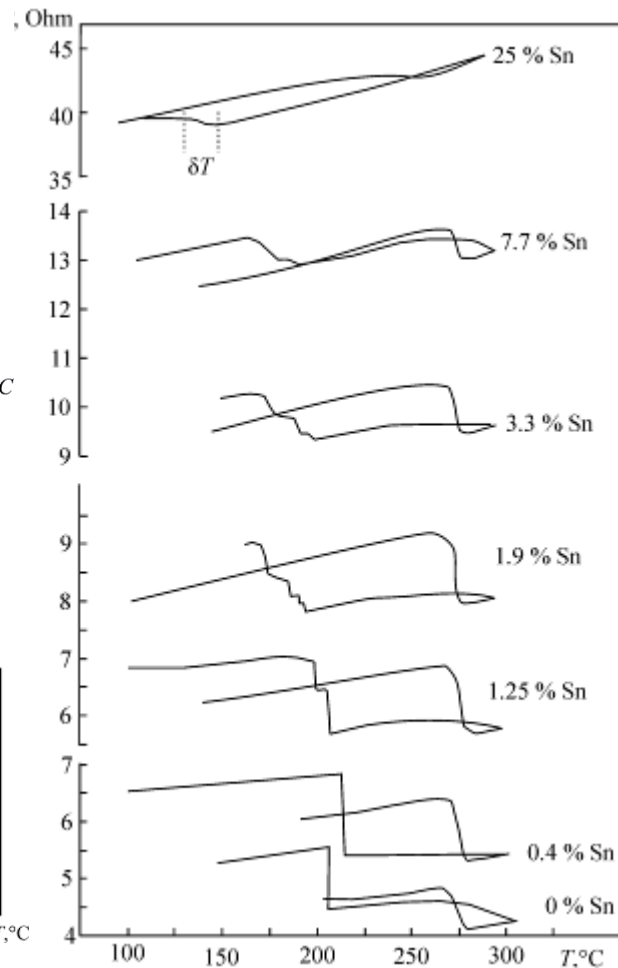
Системи на основі бінарних легкоплавких сплавів



Температурна залежність електричного опору свіжо-конденсованої плівки міді. На врізці графік Ареніуса ділянки, яка відповідає незворотньому зниженню електричного опору



Температурна залежність електричного опору плівки (Bi+Sn)/Cu отримана в першому циклі нагрівання

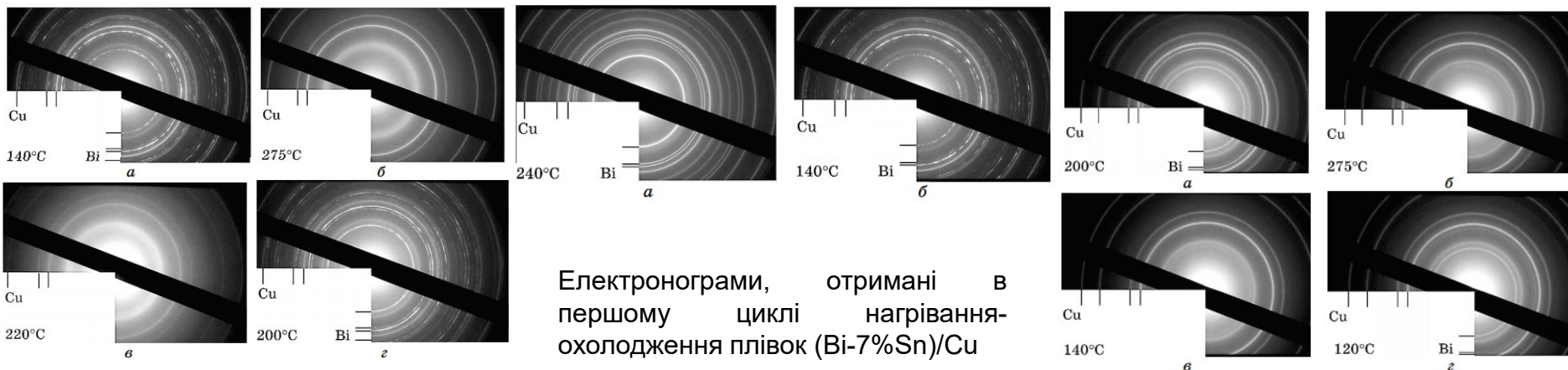


Температурна залежність електричного опору плівок (Bi-Sn)/Cu з різним вмістом олова у легкоплавкому сплаві

TEM зображення плівки міді, SEM зображення плівок Bi/Cu та (Bi+1%Sn)/Cu отримані після термоциклювання

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

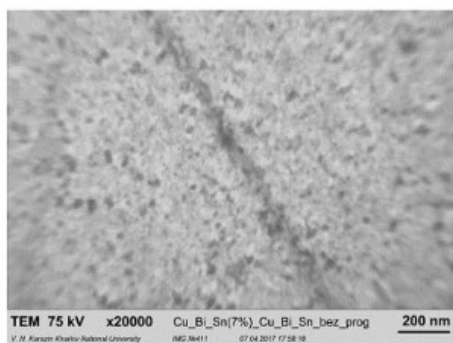
Системи на основі бінарних легкоплавких сплавів



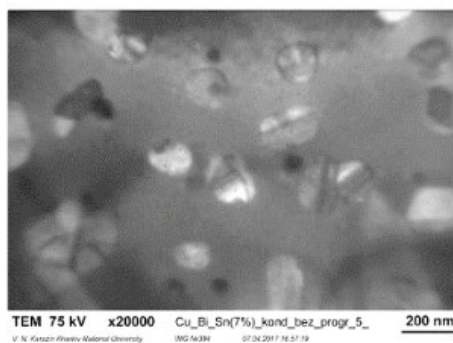
Електронोगрами, отримані в першому циклі нагрівання-охолодження плівок (Bi-7%Sn)/Cu

Серія електронोगрам плівки (Bi-7%Sn)/Cu отримані в процесі нагрівання-охолодження зразка.

Електронोगрами плівок (Bi + 7% мас. Sn)/Cu, які після конденсації шарів Cu і Bi піддавали відпалу.

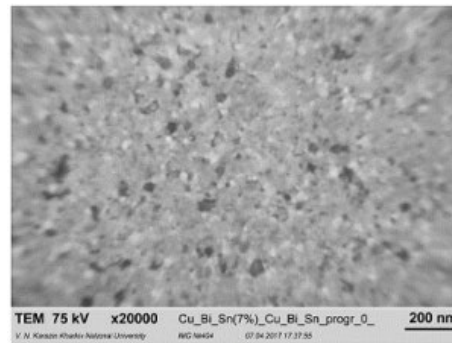


a

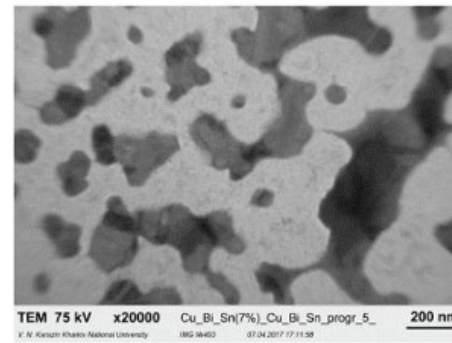


б

ТЕМ зображення плівки Cu/(Bi + 7% Sn) до (а) і після (б) п'яти циклів нагрів-охолодження. Вміст сплаву (Bi + 7% Sn) – 60% мас. Зразок при конденсації не піддавався гомогенізуючому відпалу.



a

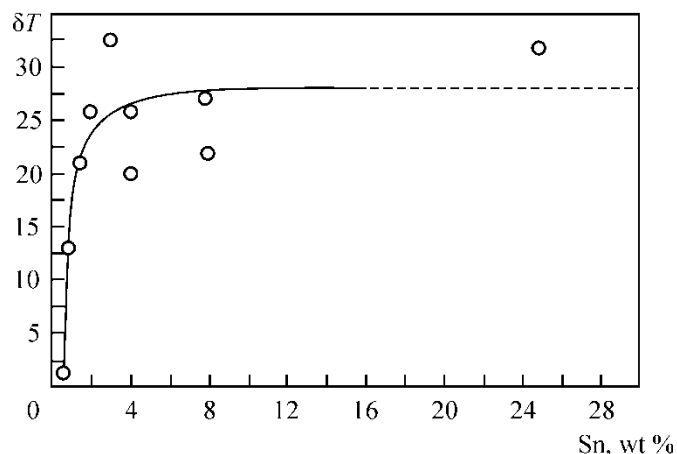


б

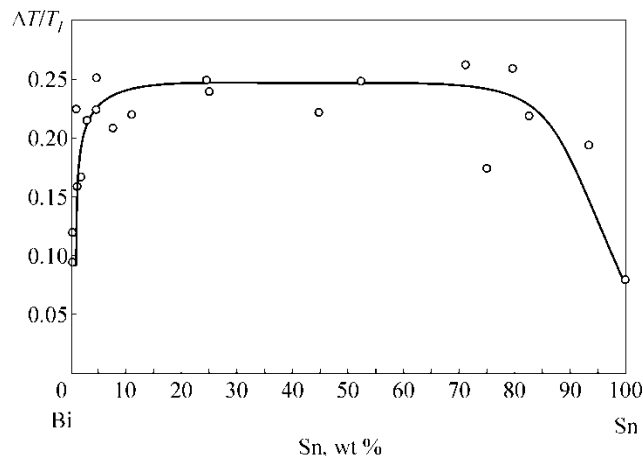
ТЕМ зображення плівки Cu/(Bi + 7% Sn) до (а) і після (б) п'яти циклів нагрів-охолодження. Вміст сплаву (Bi + 7% Sn) – 60% мас. Зразок перед осадженням олова піддавали гомогенізувальному відпалюванню.

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

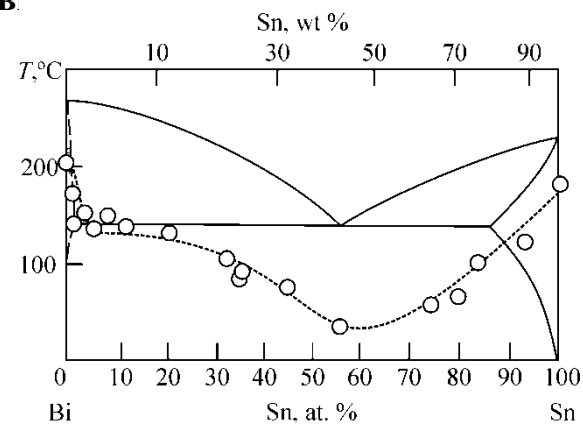
Системи на основі бінарних легкоплавких сплавів¹²



Концентраційна залежність інтервалу кристалізації переохолодженого розплаву Bi-Sn у контакті з полікристалічними шарами міді



Залежність переохолодження під час кристалізації сплаву Bi-Sn (з урахуванням відповідної температури плавлення) від вмісту олова у плівках (Bi-Sn)/Cu

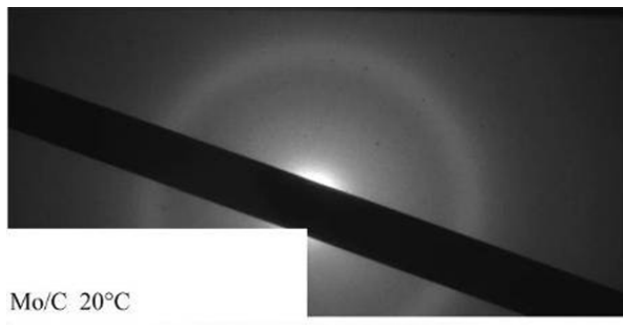


Залежність температури кристалізації переохолодженого розплаву легкоплавкого компонента плівок (Bi-Sn)/Cu від складу сплаву Bi-Sn..

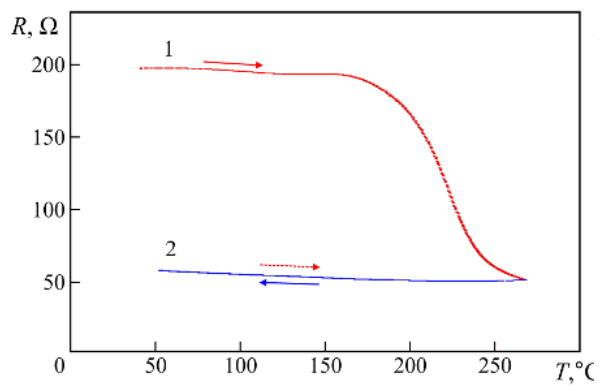
Отримана концентраційна залежність відносного переохолодження в плівках (Bi+Sn)/Cu та показано, що в широкому діапазоні концентрацій відносно переохолодження сплаву (Bi+Sn) становить 0.2–0.25 та не залежить від концентрації його компонентів. Концентраційна залежність температури кристалізації в цілому повторює лінію ліквідусу фазової діаграми. Об'єднана система легкоплавких включень, яка спостерігається в системі Bi/Cu швидко розпадається зі збільшенням концентрації олова, що супроводжується зростанням температурної ширини кристалізації.

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

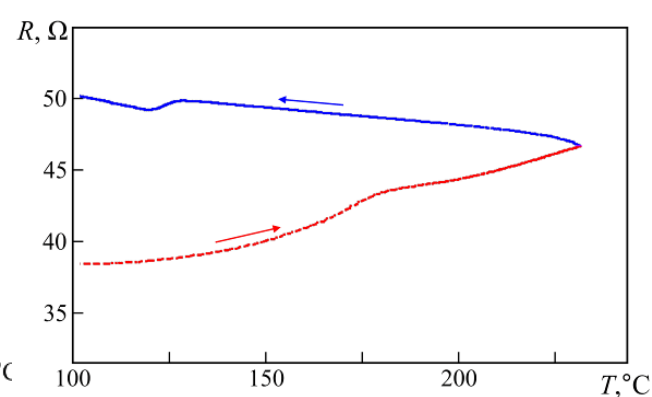
Системи на основі бінарних легкоплавких сплавів



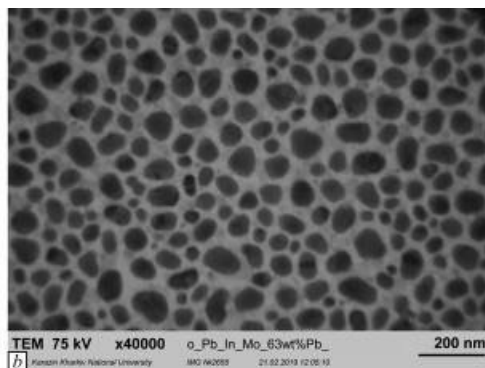
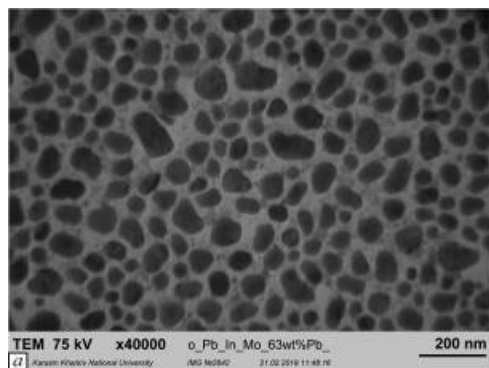
Електроннограма плівки молібдену, що демонструє її аморфну структуру



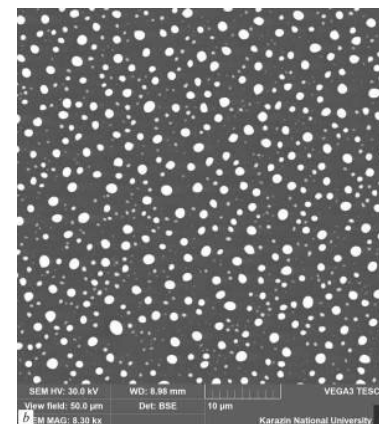
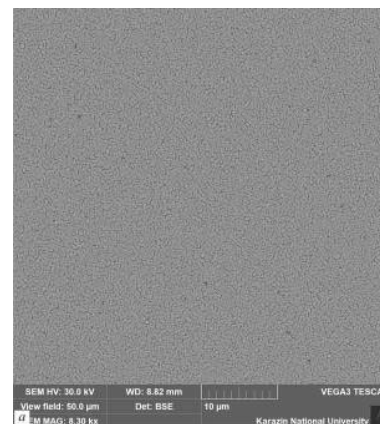
Залежність електричного опору плівок молібдену від температури отримана в першому циклі



Зміна електричного опору плівок Mo/(In + 20 wt% Pb)/Mo в першому циклі нагрівання



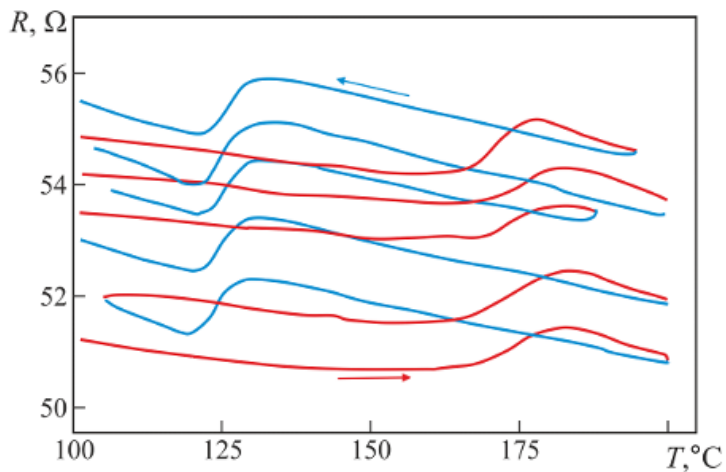
ТЕМ зображення плівок Mo/(In+70 % Pb)/Mo до та після плавлення



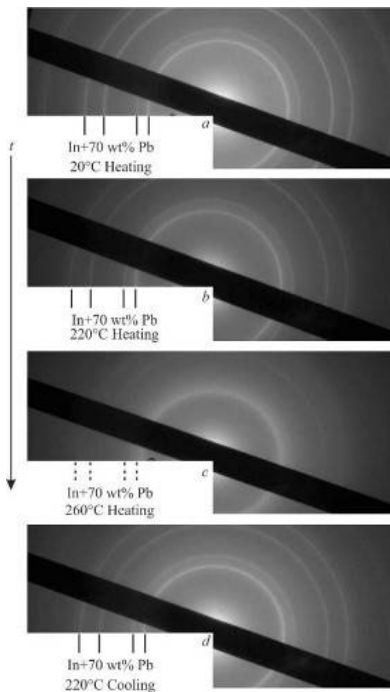
SEM зображення плівок (In + 80 мас.% Pb)/Mo з масовою товщиною плавкого компонента 240 нм до та після плавлення

Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

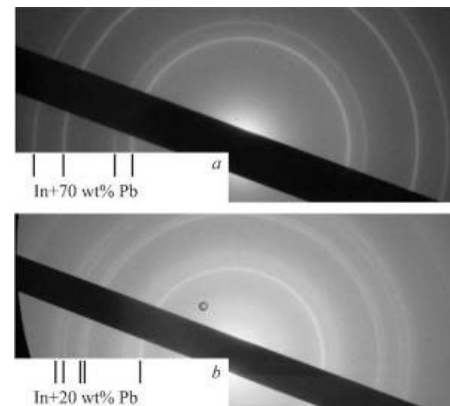
Системи на основі бінарних легкоплавких сплавів



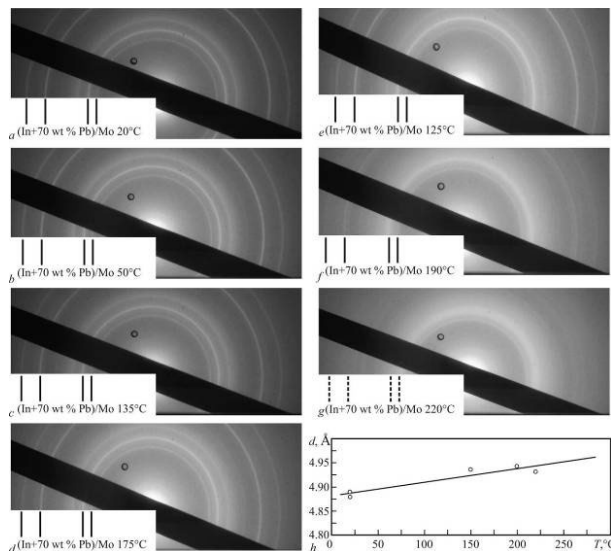
Залежність електричного опору плівкової системи Mo/(In + 9,2 мас.% Pb)/Mo від температури.



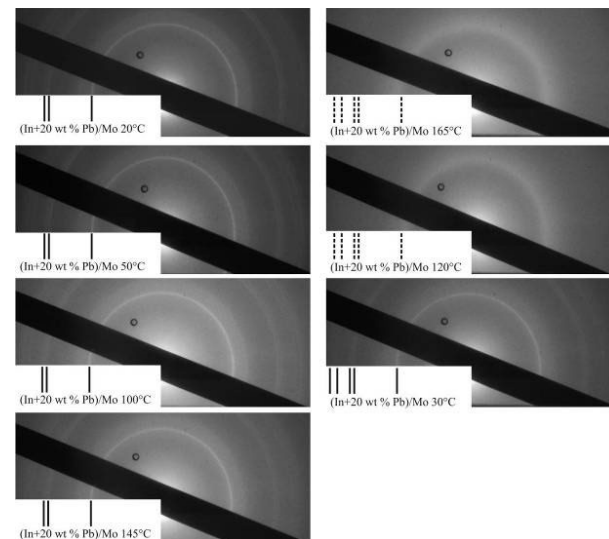
Серія електронogram, отриманих від плівок Mo/(In-70% Pb)/Mo



Дифракційні картини, отримані від плівок Mo/(In + 70 мас.% Pb)/Mo (a) та Mo/(In + 20 мас.% Pb)/Mo (b)

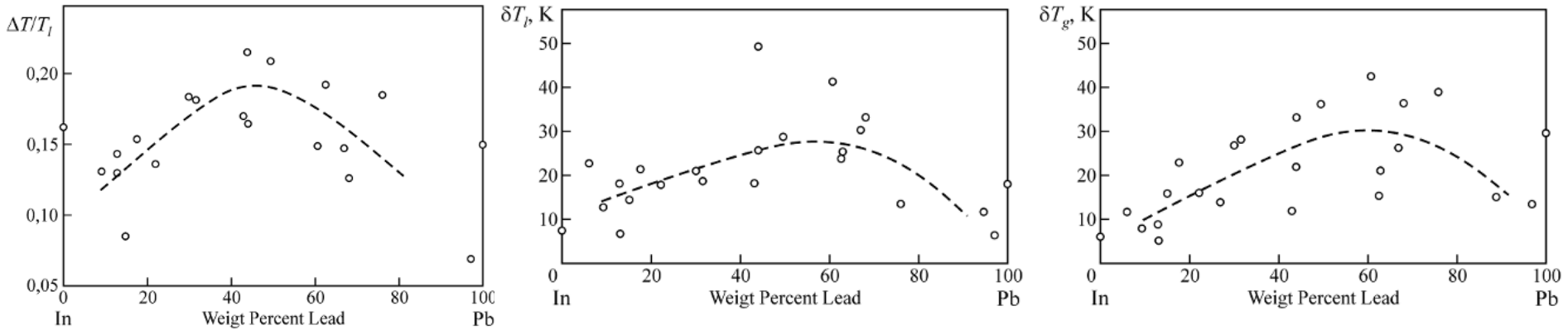


Серія електронogram, отриманих від плівок Mo/(In+70%Pb)/Mo та Mo/(In+20%Pb)/Mo в процесі першого циклу нагрівання-охолодження



Границі стабільності рідкої фази в плівкових системах

Системи на основі бінарних легкоплавких сплавів



Концентраційна залежність відносного переохолодження, інтервалу плавлення та кристалізації легкоплавкого сплаву в плівках Mo/(In-Pb)/Mo

Термодинаміка кристалізації переохолоджених сплавів

$$A = \frac{1}{3} \sigma_{sl} \cdot S_k + \frac{1}{2} \frac{V_k^2}{Nv^2} (x_l - x_s)^2 \frac{d^2 f_l}{dx_l^2}$$

$$A = \frac{1}{3} \sigma_{sl} \cdot 4\pi \left(\frac{2\sigma_{sl} T_l}{\lambda \Delta T} \right)^2 \Phi(\psi) = \frac{16\pi}{3} \cdot \frac{\sigma_{sl}^3}{\lambda^2} \cdot \left(\frac{T_l}{\Delta T} \right)^2 \Phi(\psi)$$

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl} v}{f_l(x_l) - f_s(x_s) + (x_l - x_s) df_l/dx_l}$$

$$\left(\frac{\Delta T}{T_l} \right)^2 = \left(\frac{16\pi}{3k \ln N} \right) \left(\frac{\sigma_{sl}}{\lambda} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{T} \right) \Phi(\psi)$$

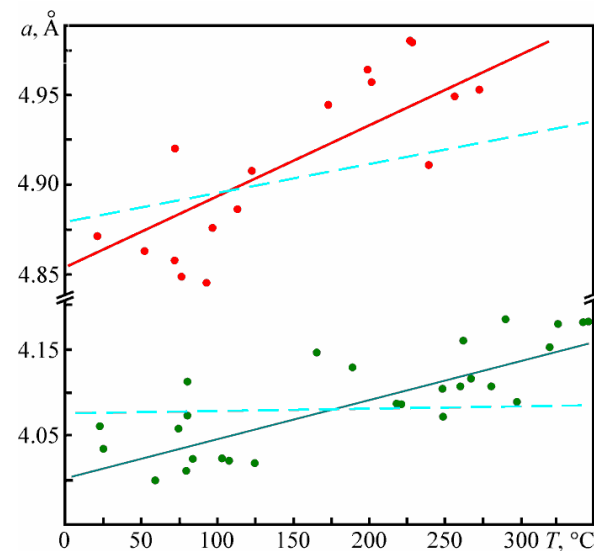
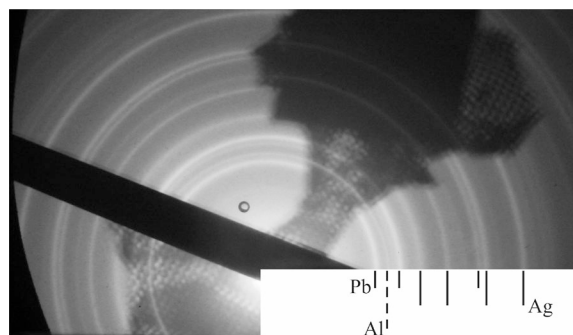
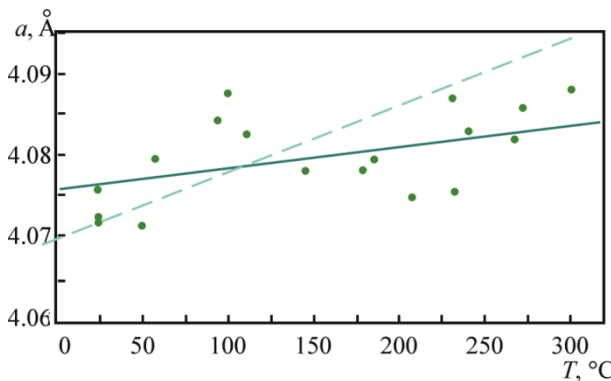
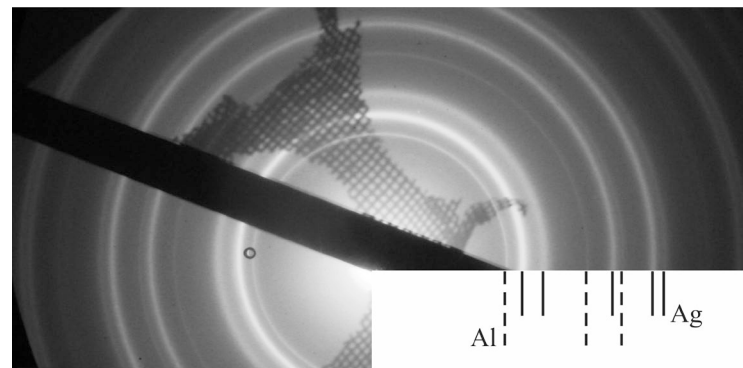
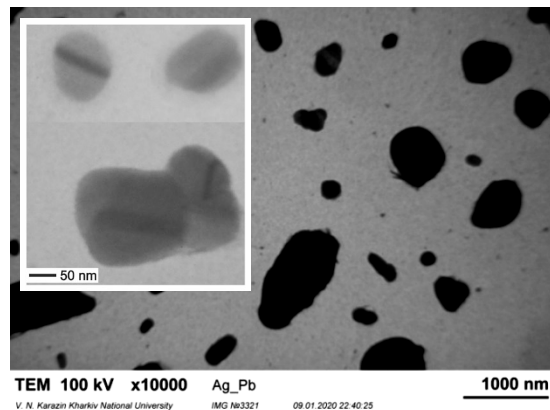
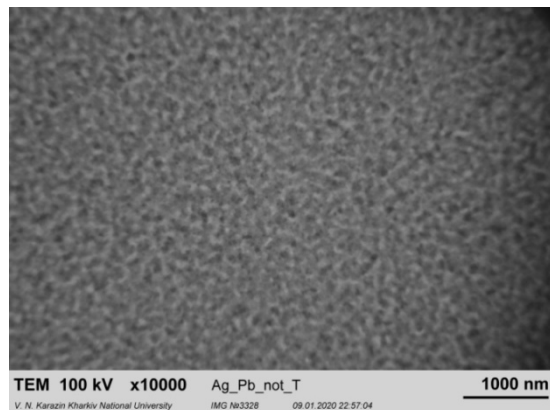
$$V_k^* = V_k \Phi(\psi)$$

$$\left(\frac{\sigma_{sl}}{\lambda} \right)^3 \left(\frac{\lambda}{T_s} \right) = const$$

$$\Phi(\psi) = \frac{1}{4} (2 - 3 \cos \psi + \cos^3 \psi)$$

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

Розмірний ефект розчинення в плівкових системах



Температурна залежність параметру кристалічної ґратки в плівці Ag та електронограма системи Pb/Ag+віддалений еталон

Показано, що розчинність свинцю в сріблі зростає в плівкових системах порівняно з масивним станом. розчинність досягає 6 та 11 відсотків для плівок товщиною 22 та 8 нм відповідно. Отримані величини більш ніж на порядок перевищують табличні значення та вказують на розширення однофазної ділянки діаграми стану

Температурна залежність параметрів кристалічних ґраток Pb та Ag

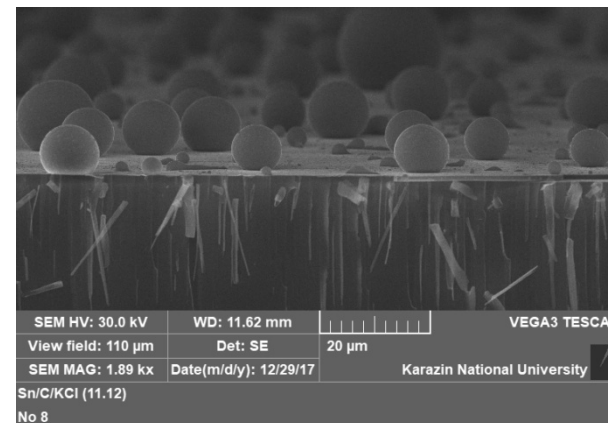
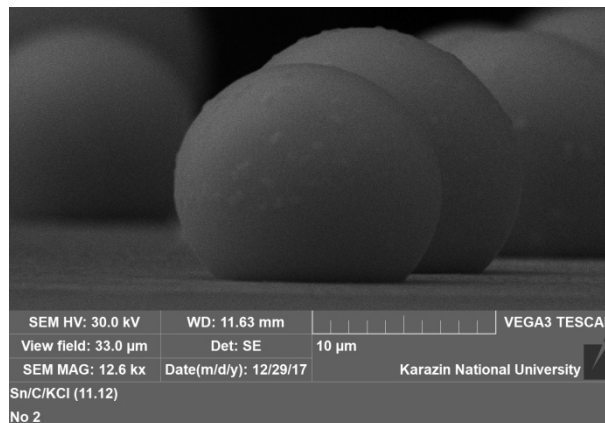
Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

Розмірний ефект коефіцієнту змочування в острівцевих плівках

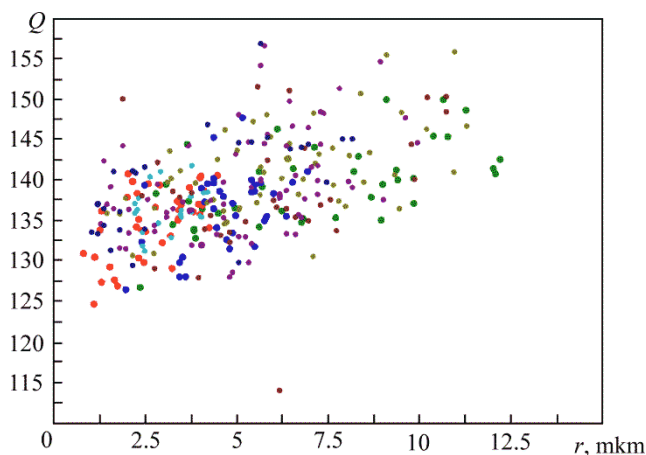
$$\theta_1 = 2 \arctg \frac{2H}{d};$$

$$\theta_2 = \arccos \left(1 - \frac{H}{R} \right);$$

$$\theta_3 = \begin{cases} \arcsin \frac{d}{2R}, & \theta < 90^\circ, \\ 180^\circ - \arcsin \frac{d}{2R}, & \theta > 90^\circ. \end{cases}$$



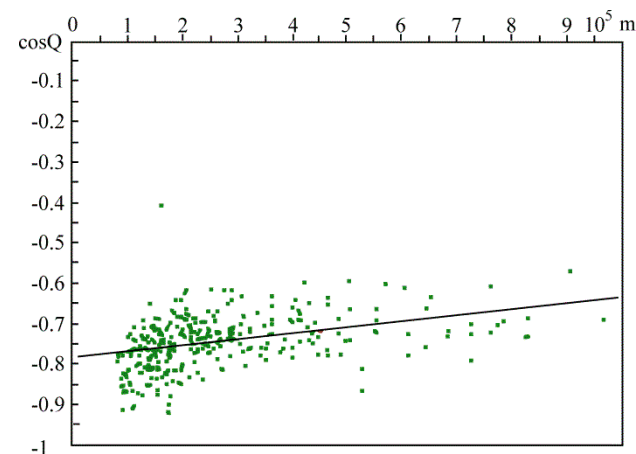
Формули, які використовують для розрахунку крайового кута змочування та приклади SEM зображень отриманих методом сколу, на основі яких проводили вимірювання крайового кута



$$\cos \theta = \cos \theta_\infty - \frac{\tau}{r\sigma}$$

$$\cos \theta \left(\frac{1}{r} \right) = -0.786 + 1.49 \cdot 10^{-7} \frac{1}{r}$$

$$\tau = 0.745 \cdot 10^{-7}$$

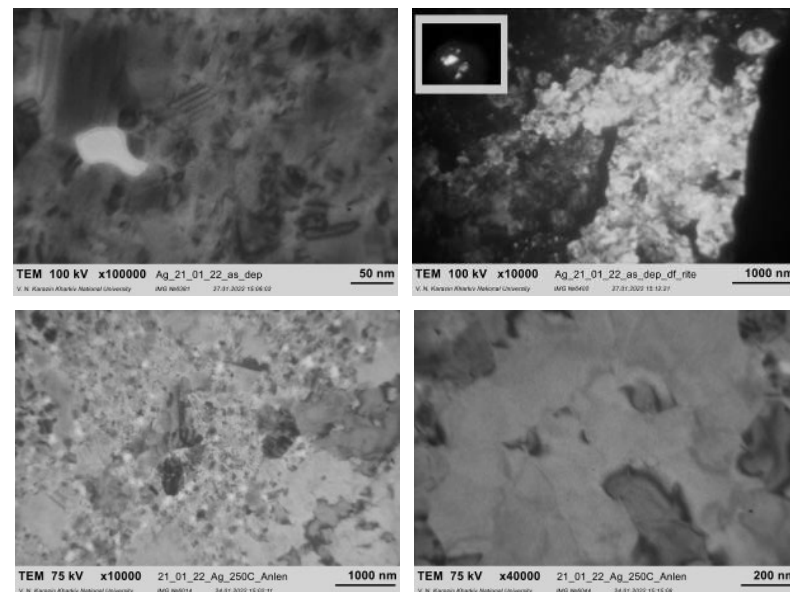
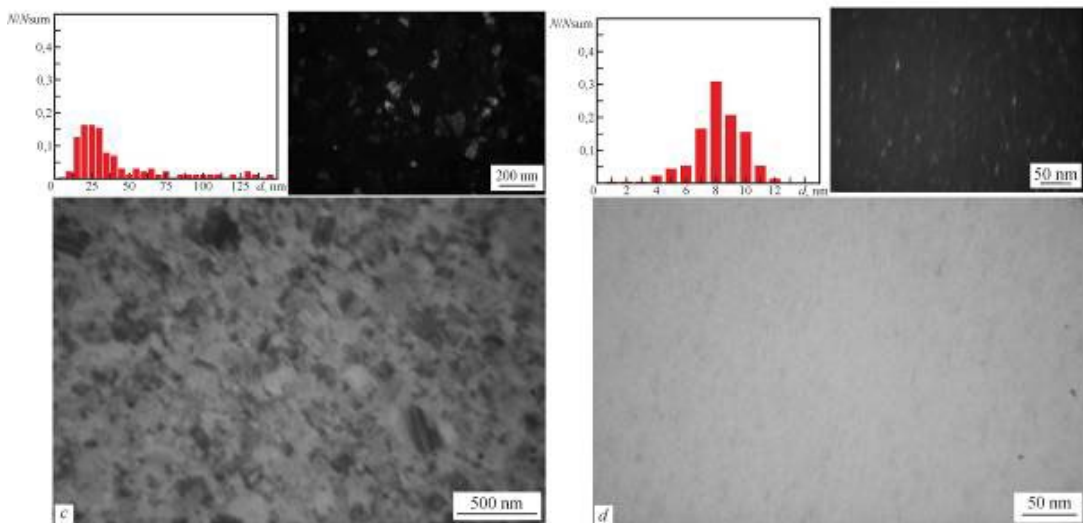
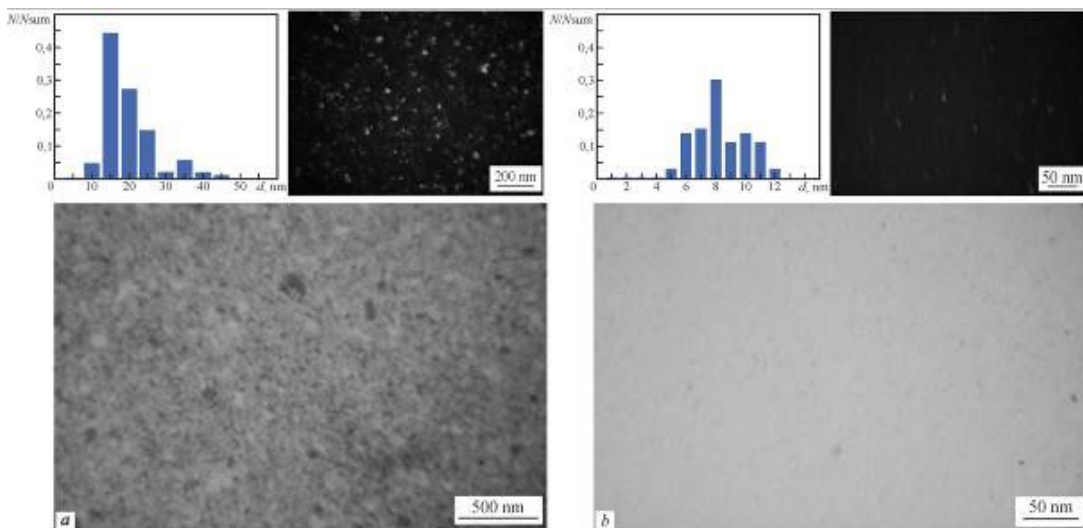


Розмірна залежність крайового кута змочування в системі Sn/C

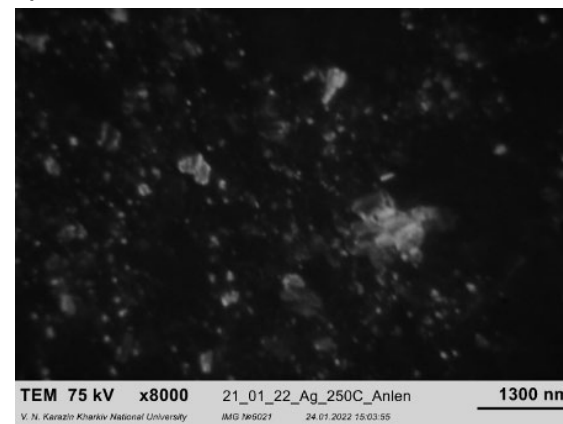
Розмірна залежність крайового кута змочування в системі Sn/C, побудована в координатах $\cos \theta - 1/r$

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

Внутрішній розмірний ефект температурного коефіцієнту опору



ТЕМ зображення свіжоконденсованих та відпалених плівок срібла



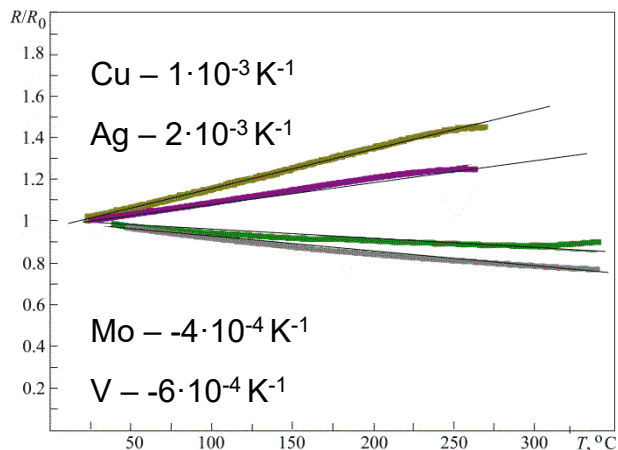
ТЕМ 75 kV x8000 21_01_22_Ag_250C_Anlen 1300 nm
V. N. Karazin National University IMG №8021 24.01.2022 15:03:55

Темнопольне ТЕМ зображення відпаленого шару Ag

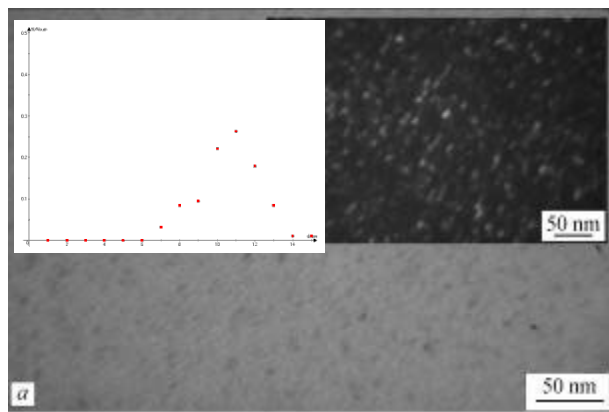
ТЕМ зображення плівок Cu (а, в) та V (б, г). Рис. а, б відповідають свіжоконденсованим плівкам, а в, г зразкам, які зазнали відпалювання.

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

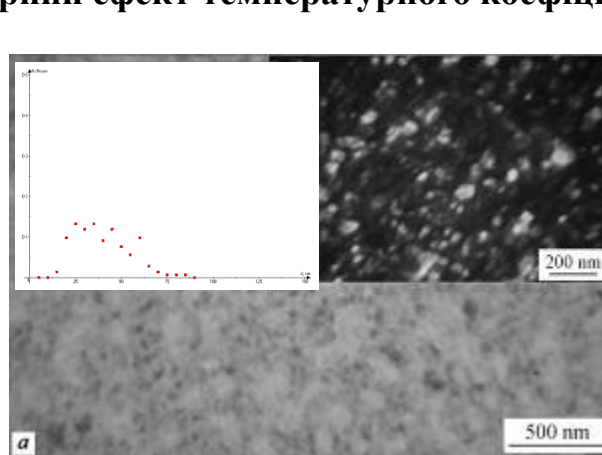
Внутрішній розмірний ефект температурного коефіцієнту опору



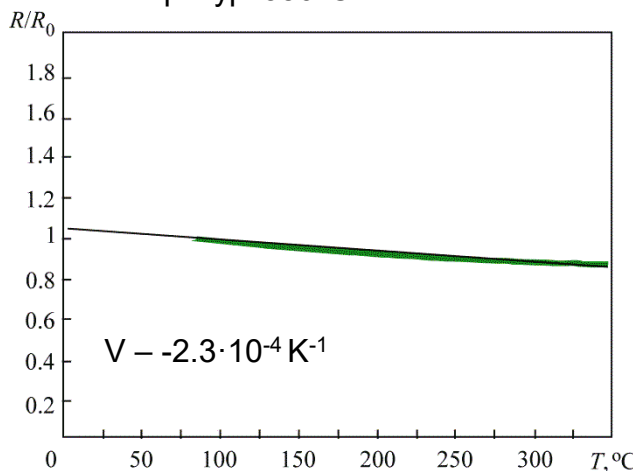
Залежності електричного опору від температури для плівок Cu, Ag, V, Mo



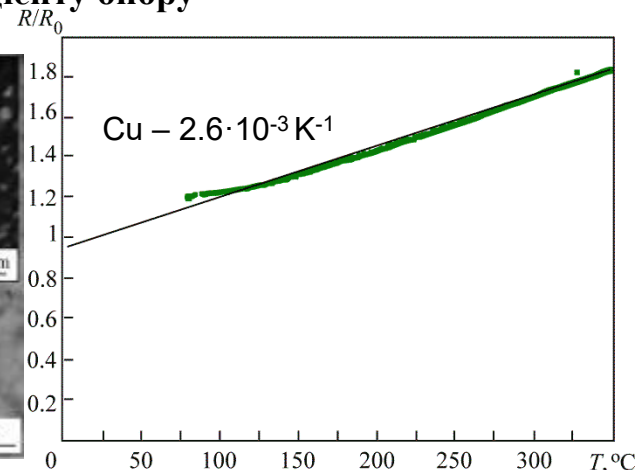
ТЕМ зображення плівки V, конденсованої на підкладку при температурі 350°C



ТЕМ зображення плівки Cu, конденсованої на підкладку при температурі 350°C



Температурна залежність електричного опору в плівках V, конденсованих на підкладку при температурі 350°C



Температурна залежність електричного опору в плівках міді, конденсованих на підкладку при температурі 350°C

$$\frac{R_{\text{Sharvin}}}{R_{\text{Bulk}}} = \frac{4\lambda_{\infty}}{3d}$$

Для свіжоконденсованих плівок $R_{\text{Sharvin}}/R_{\text{Bulk}} = 2.6$

Для відпалених зразків, в яких пройшла рекристалізація, $R_{\text{Sharvin}}/R_{\text{Bulk}} = 1.6$

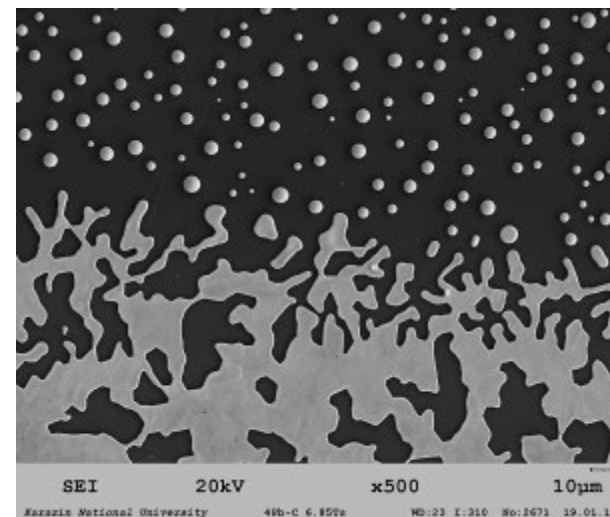
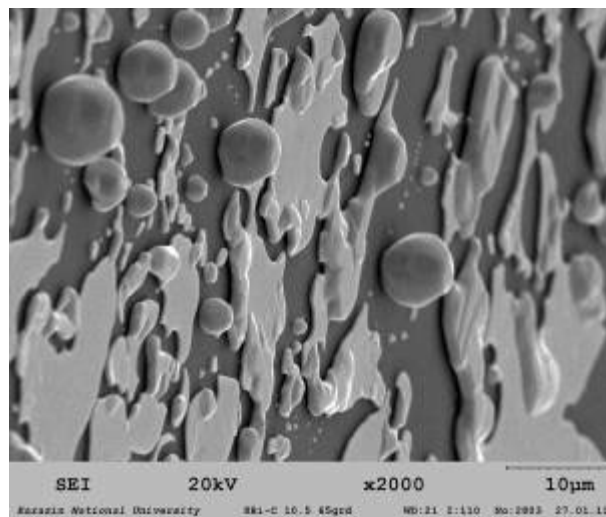
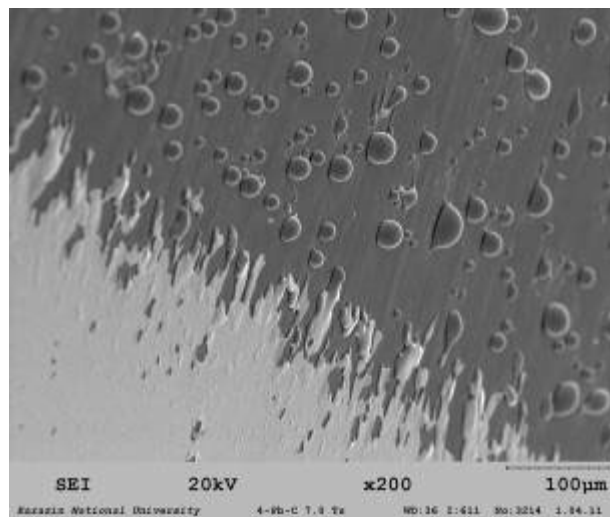
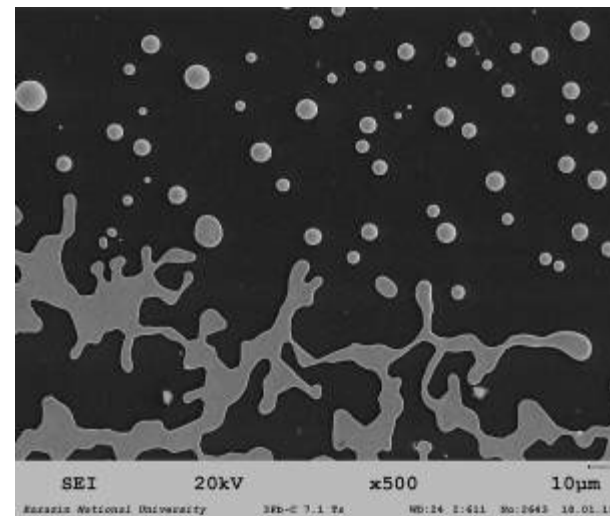
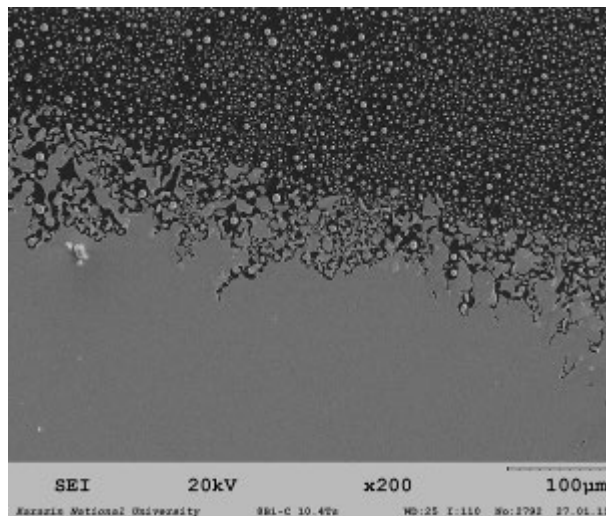
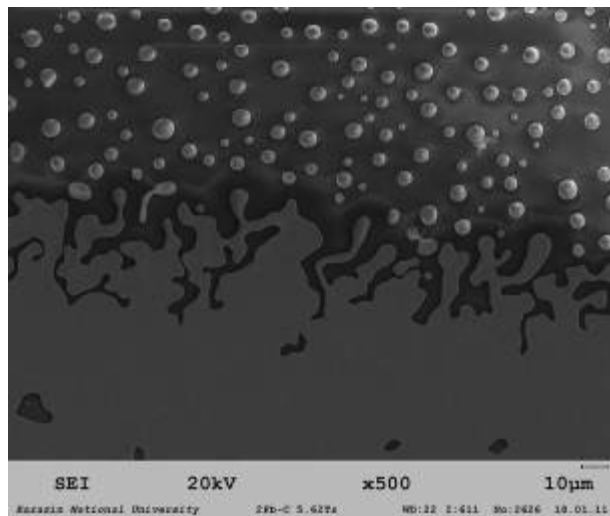
Умова від'ємного температурного коефіцієнту опору

$$(\lambda_{\infty} / d) \ln(1/(1 - P)) > 2$$

Звідки для ванадію $P > 0.36$

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

Внутрішній розмірний ефект температури плавлення полікристалічних плівок

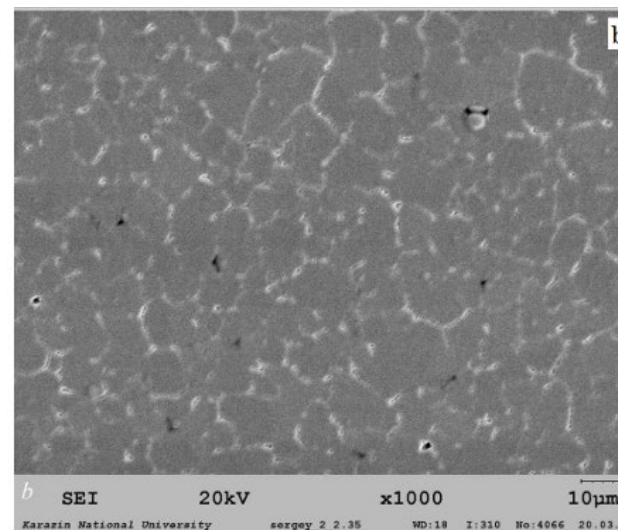
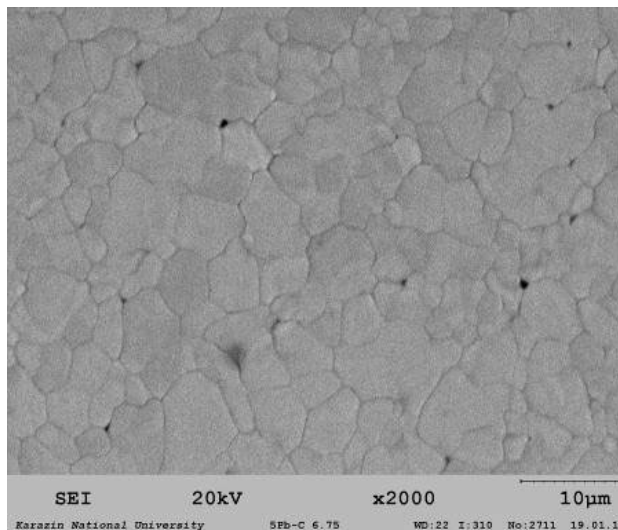
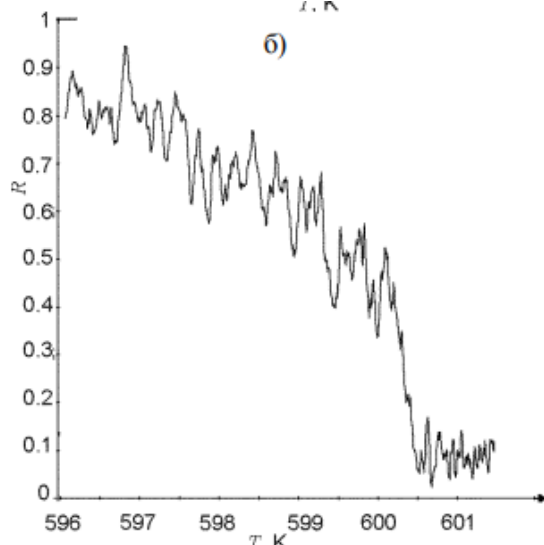
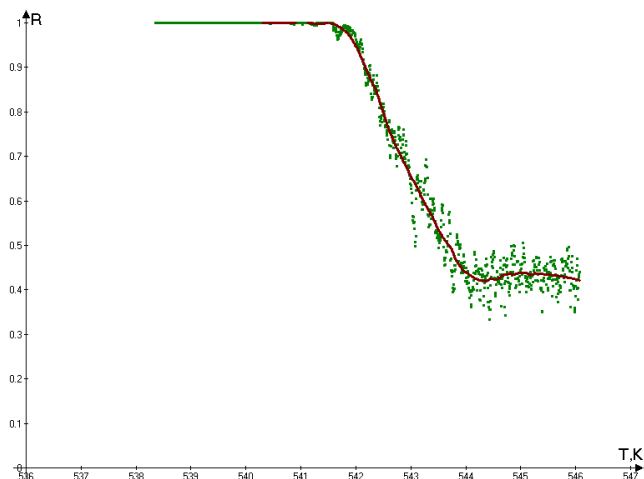


Електронно-мікроскопічне зображення плівки Pb/C та Bi/C, які відповідають зразкам, які зазнали плавлення на підкладці з градієнтом температур

SEM зображення плівок Pb/C товщиною 590 та 670 нм

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

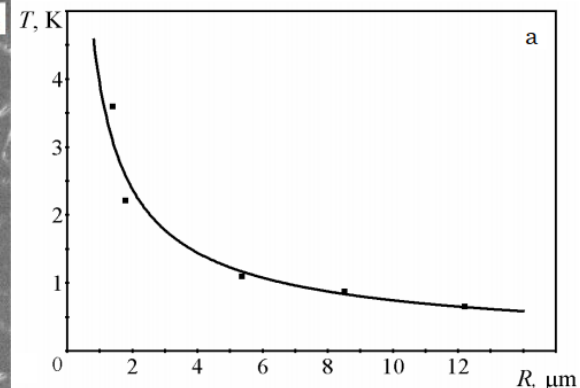
Внутрішній розмірний ефект температури плавлення полікристалічних плівок



$$\frac{\Delta T}{T_s} = \frac{1}{\lambda} \frac{\sigma_b S_{кр}}{V}$$

$$\sigma_b = \frac{2\Delta T \lambda S_{пер}}{T_s l}$$

З використанням відношення $S_{пер}/l$ отримано експериментально визначена міжзеренна енергія в плівках свинцю та олова, яка складає 0.23 Дж/м² та 0.14 мДж/м² відповідно



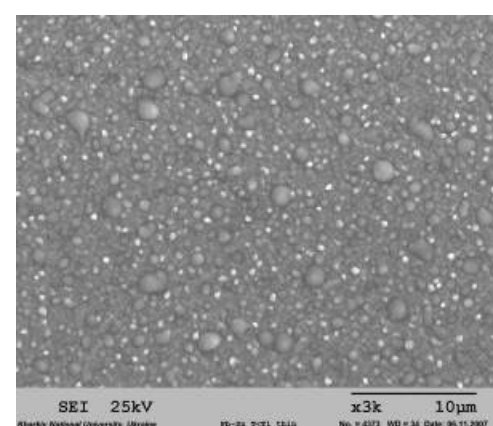
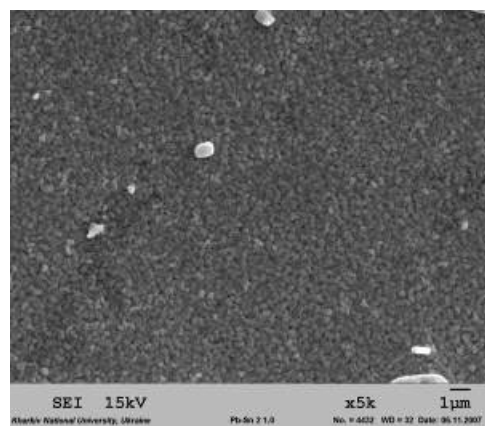
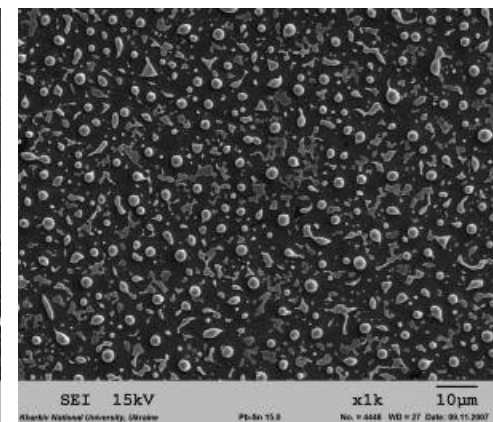
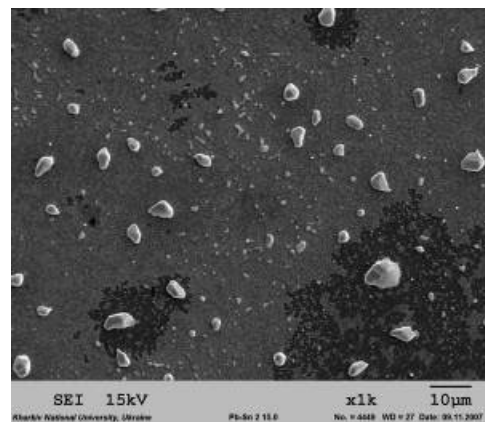
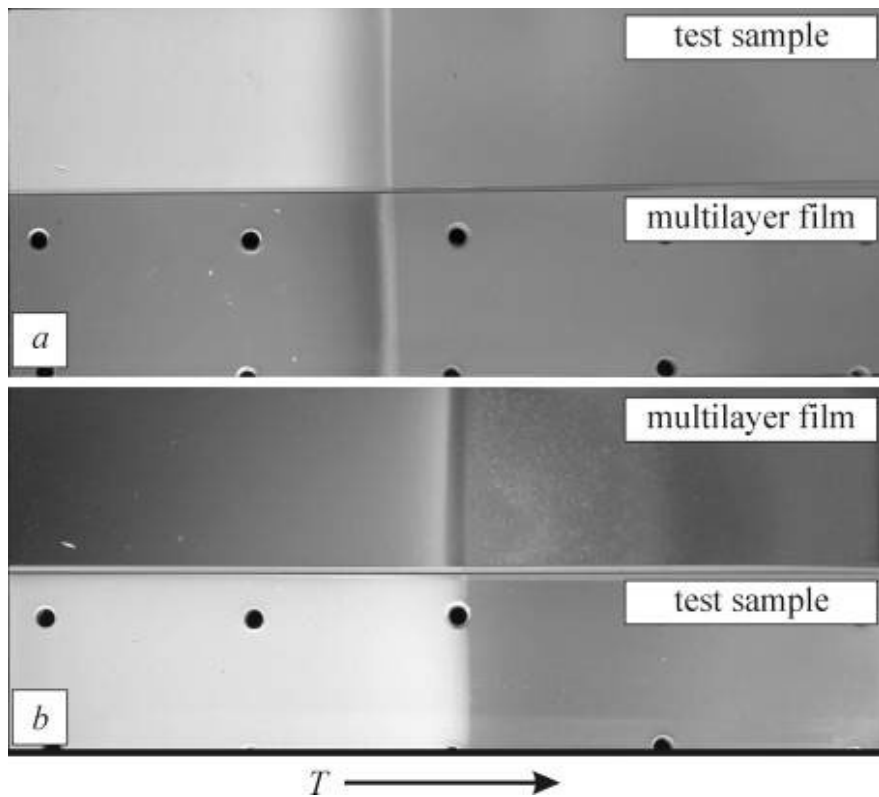
Залежність інтервалу кристалізації плівок свинцю від характерного розміру кристалітів

Температурні залежності коефіцієнту заповнення підкладки плівками вісмуту та свинцю, побудовані поблизу перехідної зони

SEM зображення кристалітів в плівках Pb/C та Sn/C

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

Внутрішній розмірний ефект евтектичної температури



Оптичне зображення плівок Bi/Sn () та Pb/Sn () після їх короткочасного відпалювання на підкладках з градієнтом температур

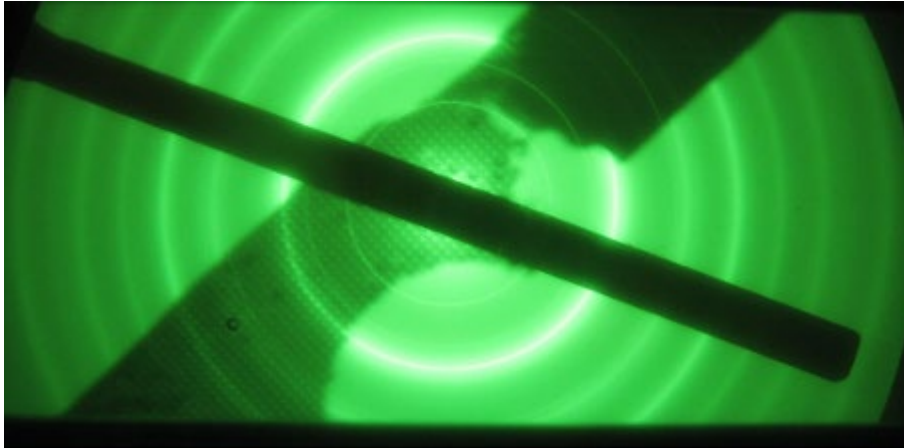
SEM зображення дво-та багат шарових плівок Pb/Sn, які відповідають температурі 187°C та твердофазному стану зразка

$$\frac{\Delta T}{T_S} \approx \frac{\sigma_A + \sigma_B + \sigma_{AB}(n-1) - 2\sigma_\ell}{\frac{n}{2}(d_A + d_B)\lambda} \quad n \gg 1 \quad \sigma_{AB} \approx \frac{1}{2}(d_A + d_B)\lambda \frac{\Delta T}{T_S}$$

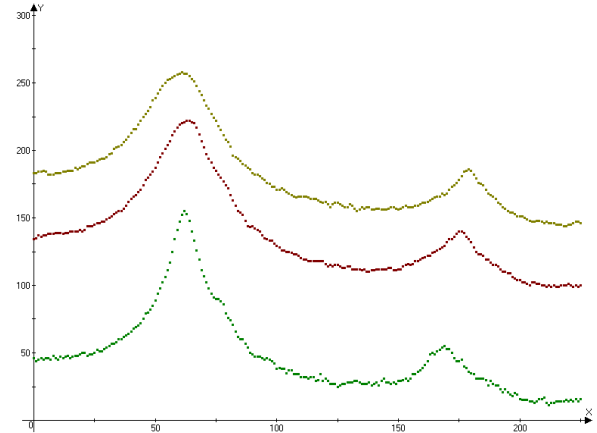
Величини міжфазної енергії становлять 0.03 та 0.045 Дж/м² для контактних пар олово-вісмут та олово-свинець відповідно

Розмірні ефекти в вакуумних конденсатах

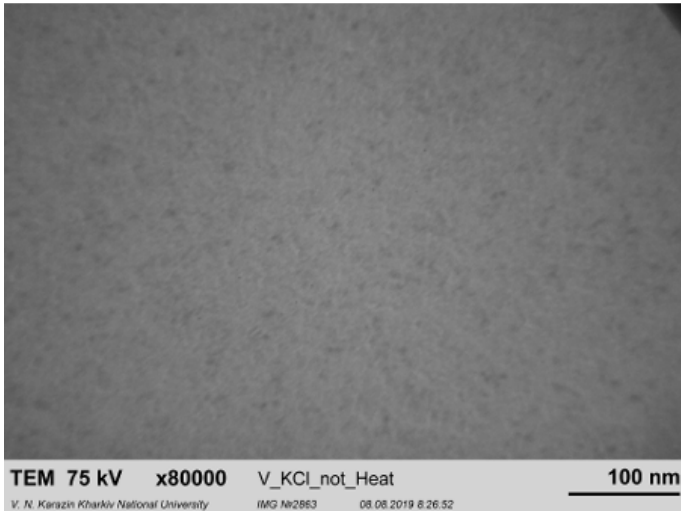
Внутрішній розмірний ефект температурного коефіцієнту термічного розширення



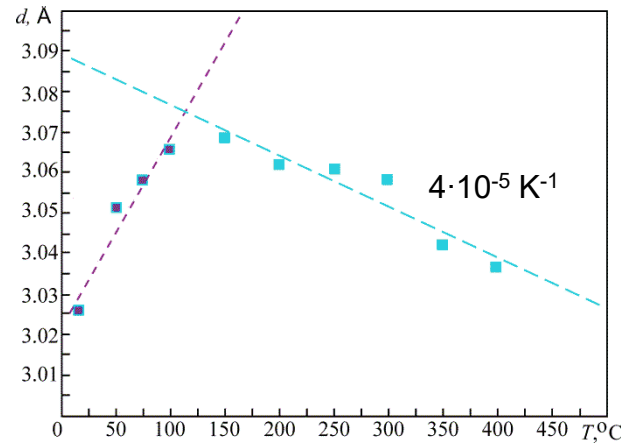
Режим дифракції
TEM image of V_KCl_11_12_20



Електронограма V + еталон (KCl) та фотометрування електронограм свіжоконденсованих, нагрітих та відпалених плівок



ТЕМ зображення свіжоконденсованої плівки V



Температурна залежність параметру кристалічної ґратки плівок V

$$dG = -S^e dT - PdV$$

$$\frac{\partial G}{\partial T} = -S^e - P\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

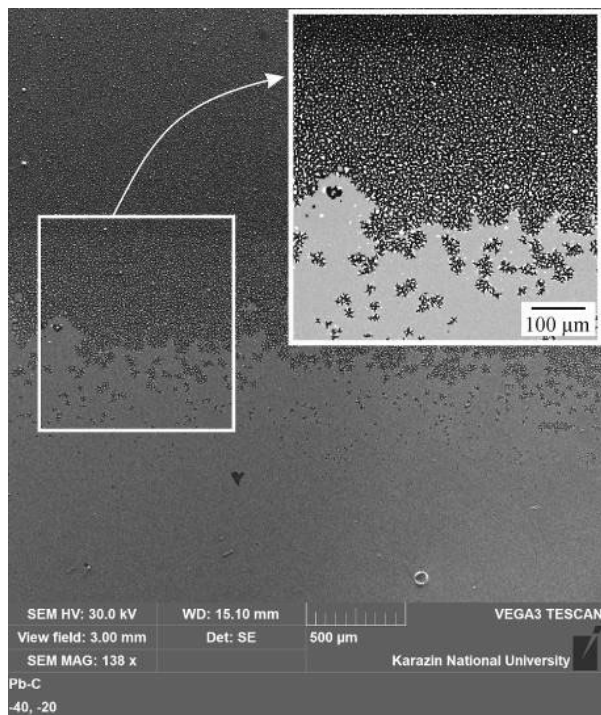
$$G = G_V V + \sigma S_{\text{гран}}$$

$$\frac{\partial G}{\partial T} = \frac{\partial G_V V}{\partial T} + \frac{\partial \sigma_b S_{\text{гран}}}{\partial T}$$

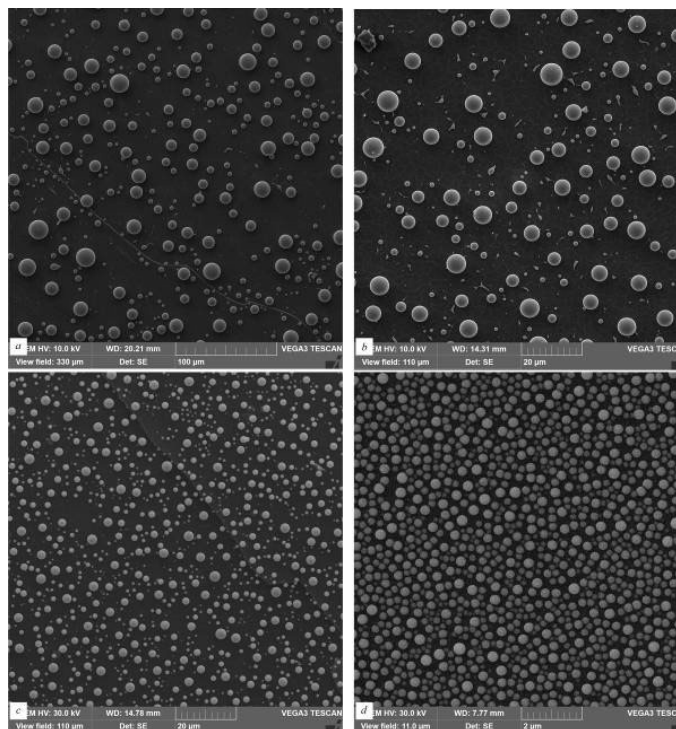
$$\frac{\partial S_{\text{гран}}}{\partial T} > 0$$

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

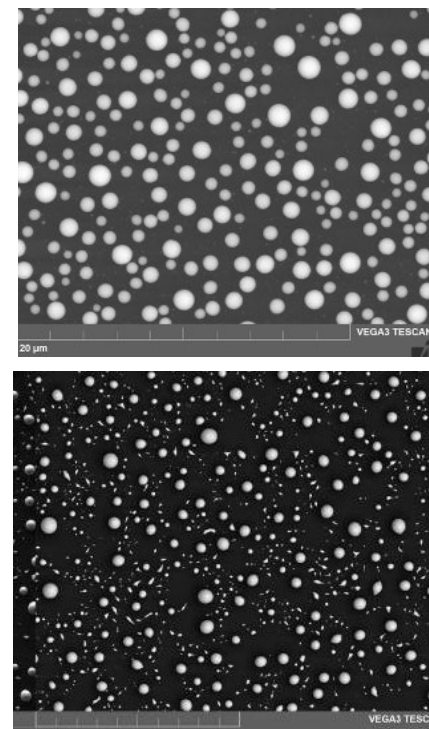
Термічне диспергування плівок індію, олова та свинцю



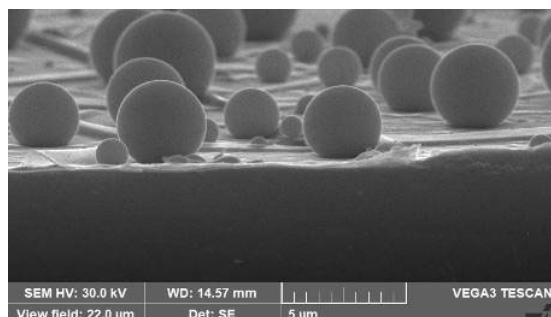
Оглядове SEM зображення плівки Pb/C, відпаленої на підкладці з градієнтом температури



SEM зображення плівок Sn/C, які відповідають зразкам з масовою товщиною а) 1000 нм, б) 420 нм, с) 275 нм, д) 70 нм

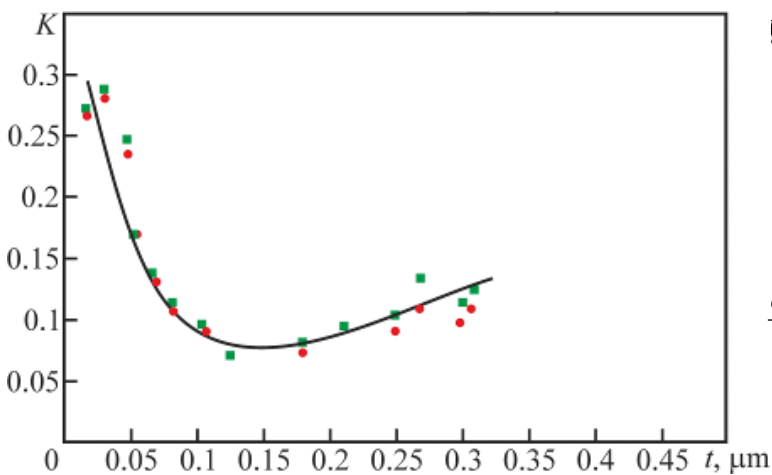


SEM зображення плівок In/C та Pb/C, отримані після повного плавлення зразка



SEM зображення сколу плівок Sn/C, отримане для зразка, в якому олово повністю розплавлене

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів



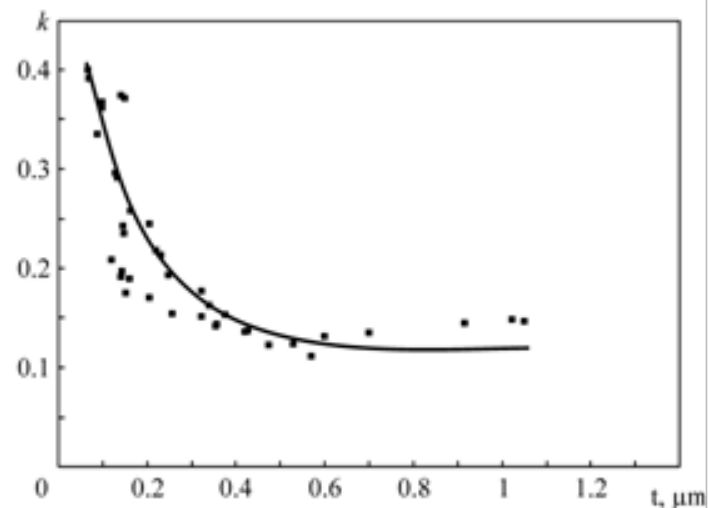
ування плівок індію, олова

$$K_{зан} = \frac{3t}{4r\Phi(\theta)}$$

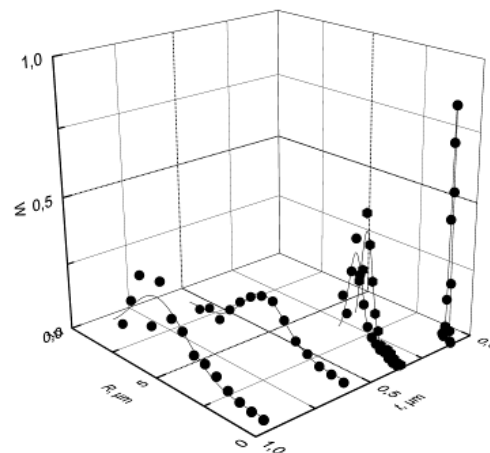
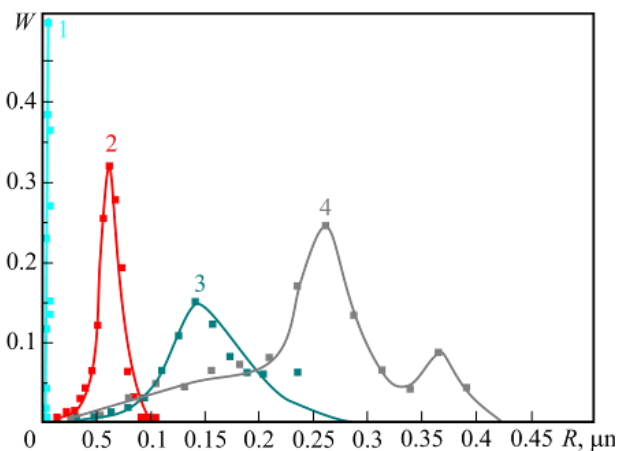
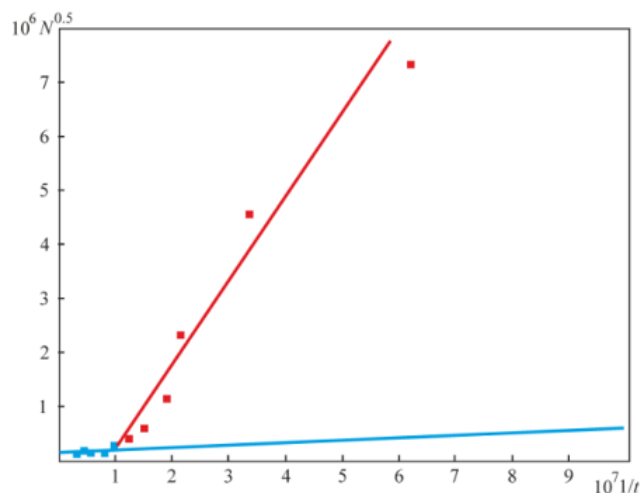
$$K_{зан} = N\pi r^2$$

$$\frac{dK}{dt} = \frac{3\pi}{K^2 16\Phi^2(\theta)} \left(2tN + \frac{t^2 dN}{dt} \right)$$

$$\frac{2N}{t_{кр}} = -\frac{dN}{dt}$$



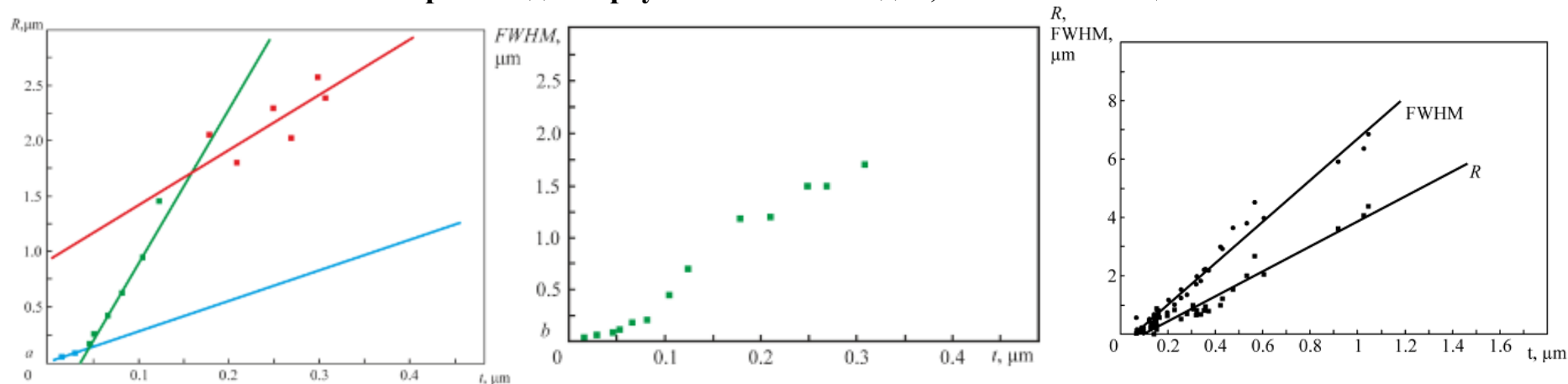
Залежність коефіцієнту заповнення підкладки плівкою для зразків Pb/C та Sn/C



Залежність густоти частинок від товщини плівки Pb/C та гістограми розподілу за розмірами частинок, які утворюються при термічному диспергуванні зразків Pb/C та Sn/C

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

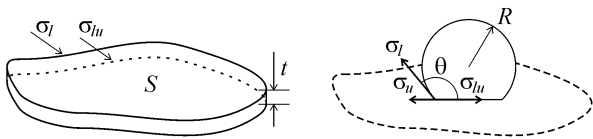
Термічне диспергування плівок індію, олова та свинцю



Розмірна залежність найбільш вірогідного радіусу та напівшири гістограм розподілу в самовпорядкованих масивах, які формуються при диспергуванні плівок Pb/C та Sn/C

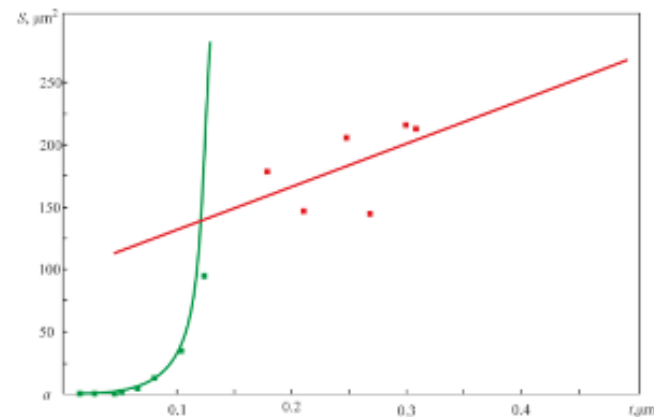
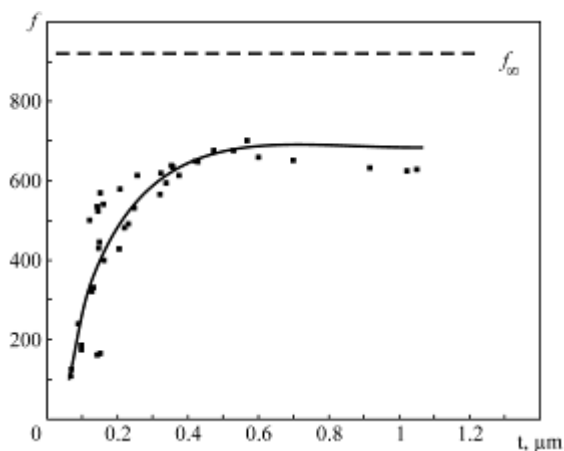
$$r_{\min} = \frac{3}{2} \left(\frac{4}{9\pi g(\theta)\beta} \right)^{\frac{1}{3}} t = \alpha t$$

$$f = \sigma_l (1 - \cos\theta - 4K_{3an}\Phi(\theta))$$



$$S_{3\phi} = \frac{4\pi r^3}{3t} \Phi(\theta)$$

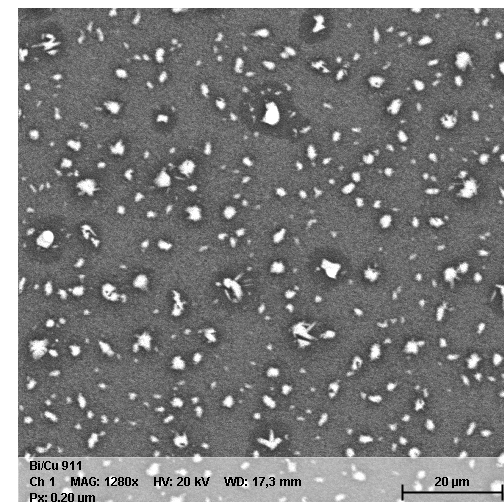
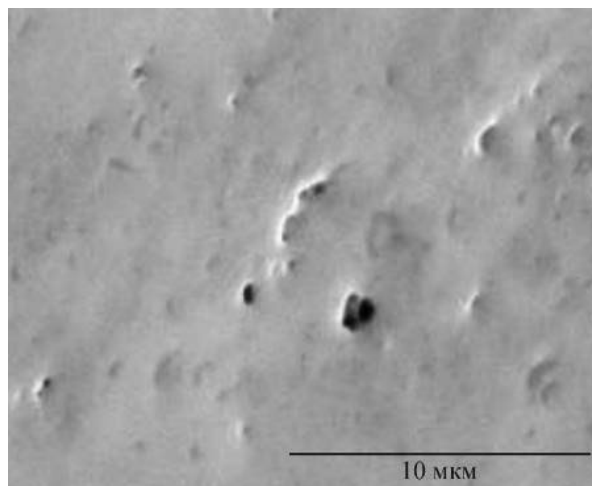
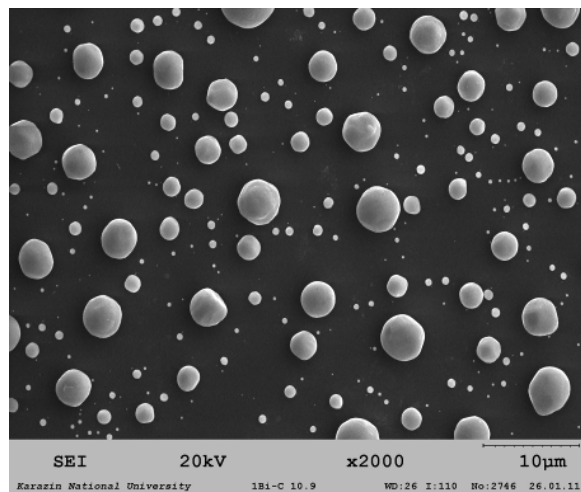
$$\Phi(\theta) = \frac{1}{4} (2 - 2\cos\theta + \sin^2\theta \cos\theta)$$



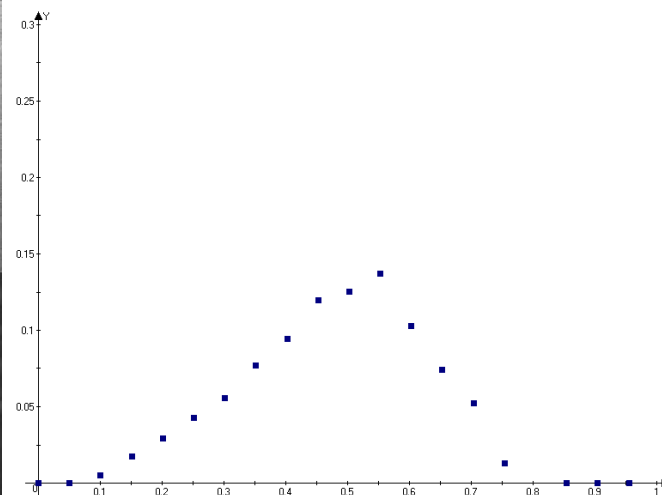
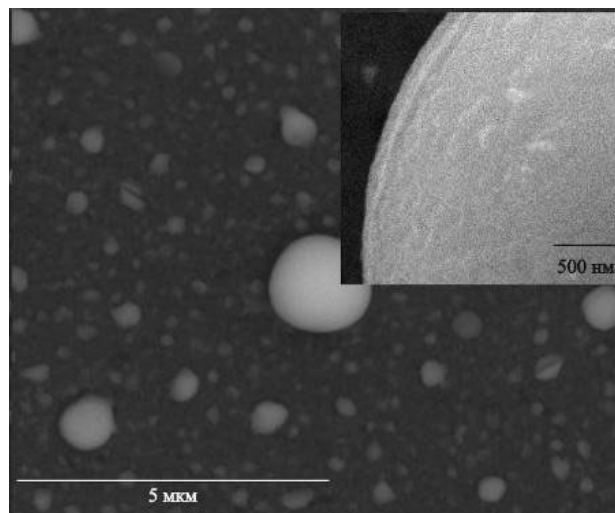
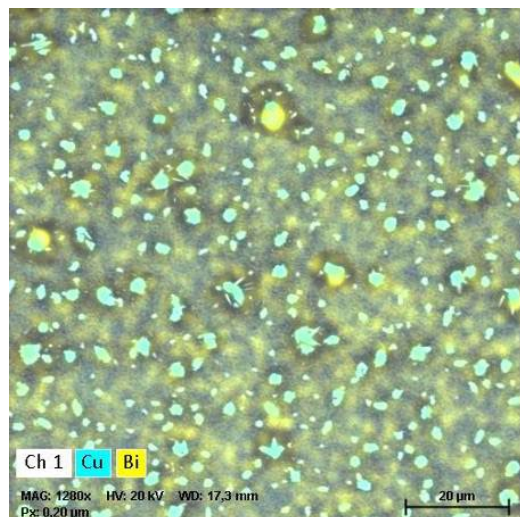
Розмірна залежність надлишкової енергії плівок Sn/C та площі $S_{3\phi}$, з якої збирається речовина, яка утворює частинки розплавлених плівок Pb/C

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

Термічне диспергування плівок вісмуту, конденсованих на підкладки різної природи



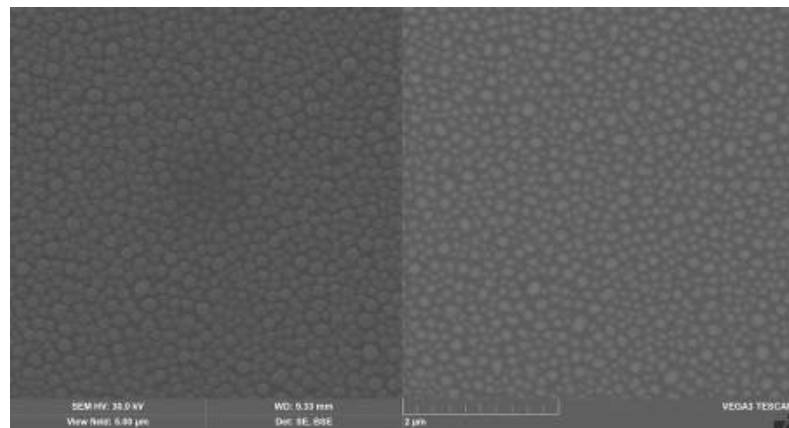
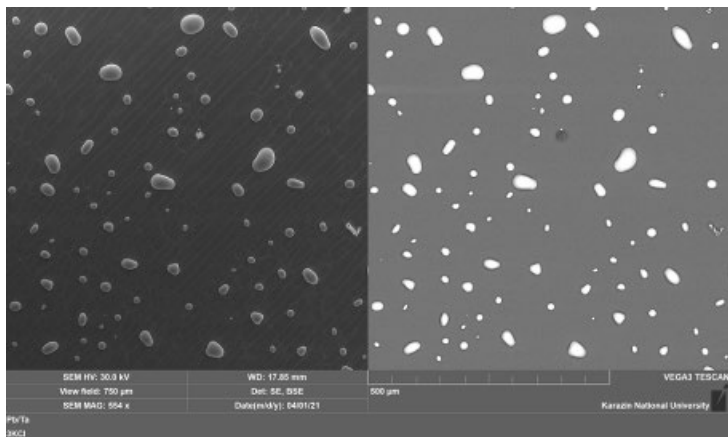
SEM зображення плівок Bi/C та Bi/Cu з різною товщиною мідного шару



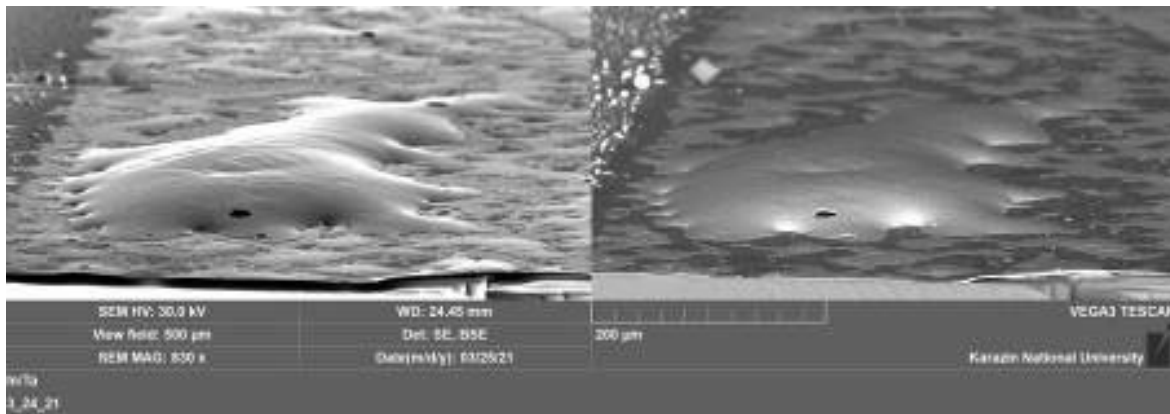
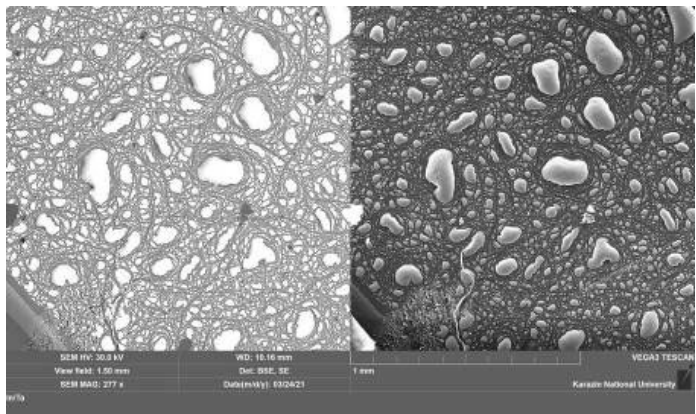
EDS карта плівки Bi/Cu, SEM зображення системи Bi/CuO₂ та гістограма розподілу за розмірами отримана в зразках Bi/V

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

Диспергування однокомпонентних плівок в умовах значного змочування



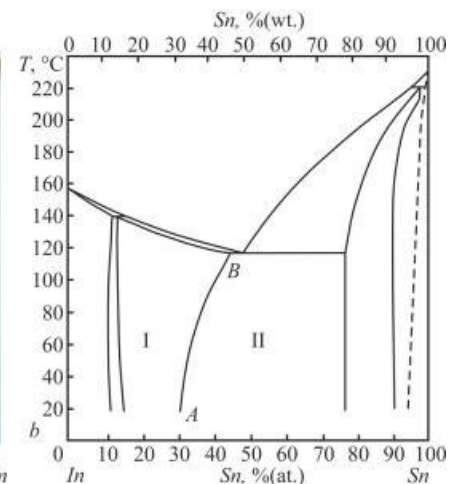
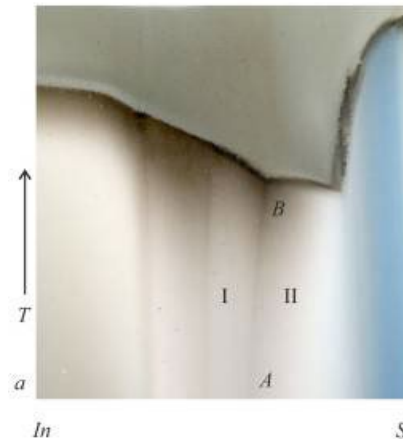
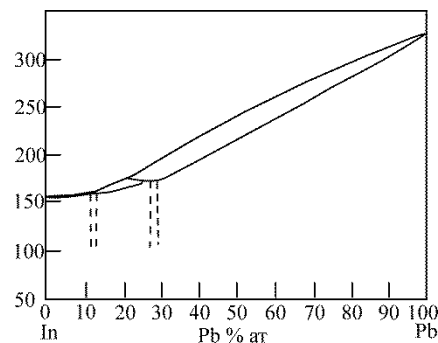
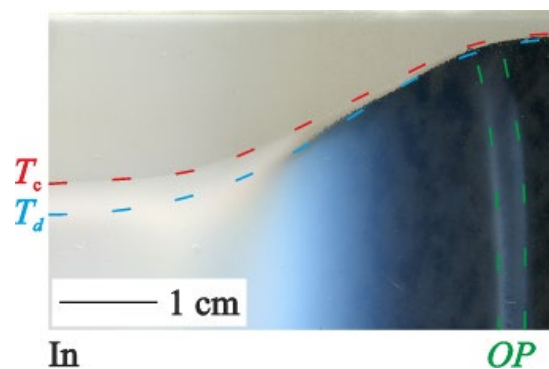
SEM зображення плівок Pb/Cr та In/Cr



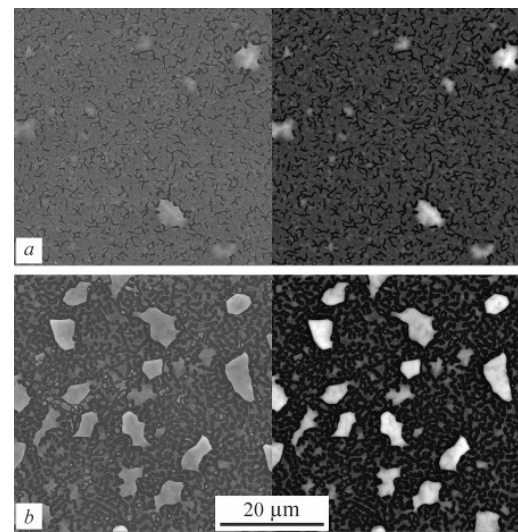
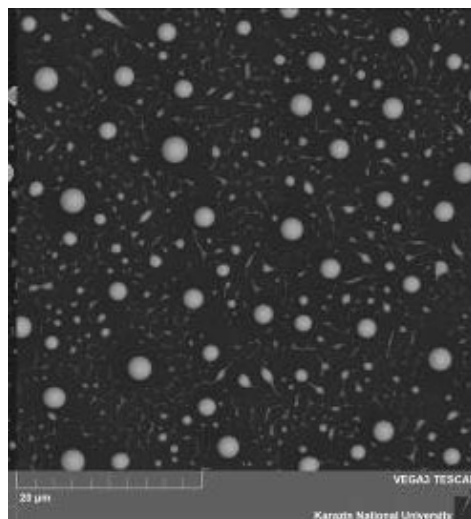
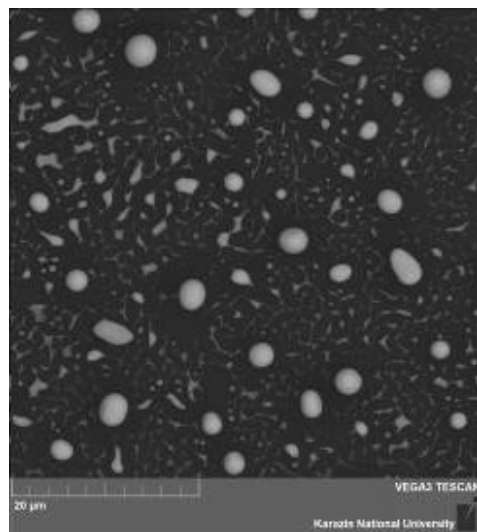
Пряме та похиле SEM зображення плівок In/Ta

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

Диспергування бінарних систем



Оптичні зображення підкладок з плівками, які конденсовані методом змінного складу та стану і відповідні фазові діаграми

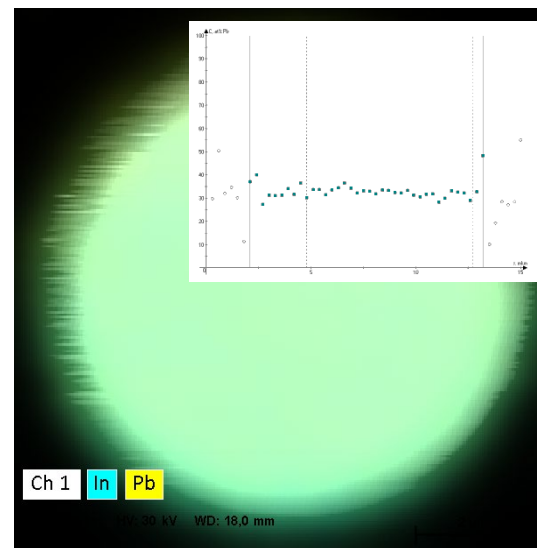
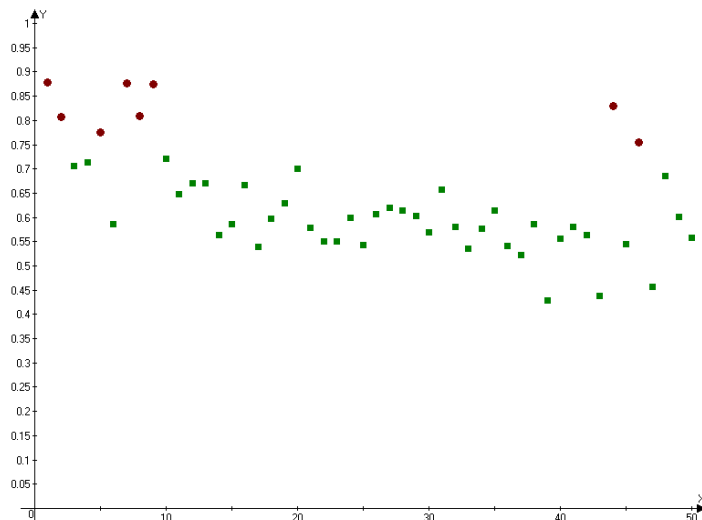
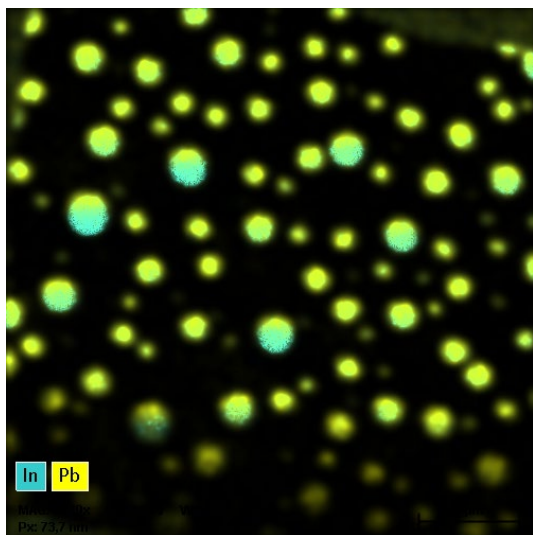


SEM зображення плівок Pb/In/C, отримані дещо вище лінії солідусу (а - 170°C) і при більш високій температурі (б - 180°C)

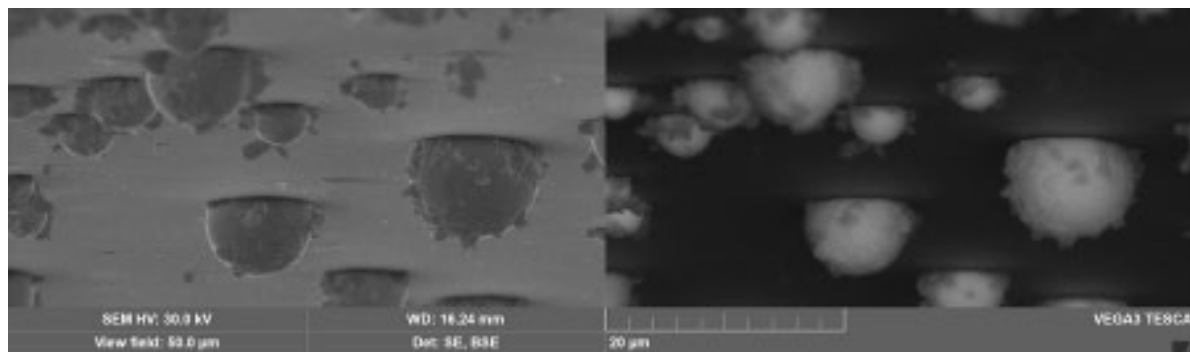
SEM зображення плівок Pb/In/C, отримані нижче (а) і вище (б) лінії розпаду суцільної плівки (T_d) на окремі острівці)

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

Диспергування бінарних систем



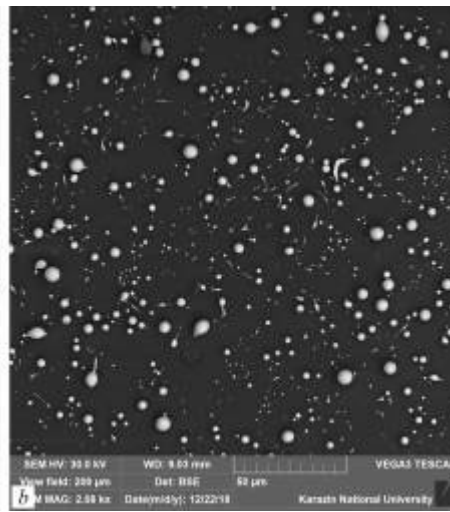
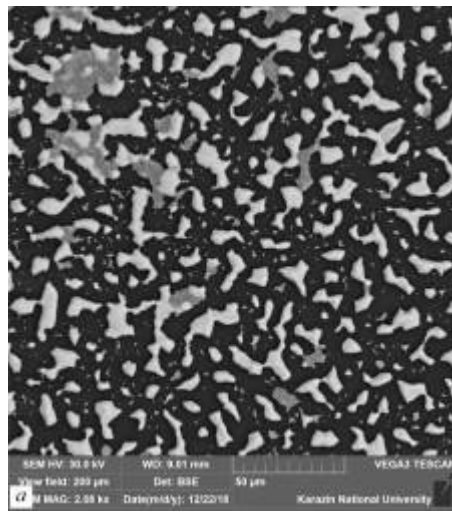
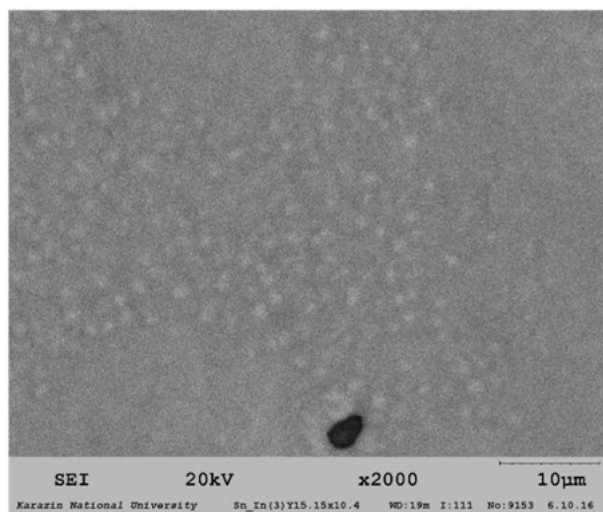
EDS карта розподілу елементів в масиві In-Pb, демонстрація розподілу елементів в бінарних та однокомпонентних частинках, карта розподілу елементів в окремій частинці



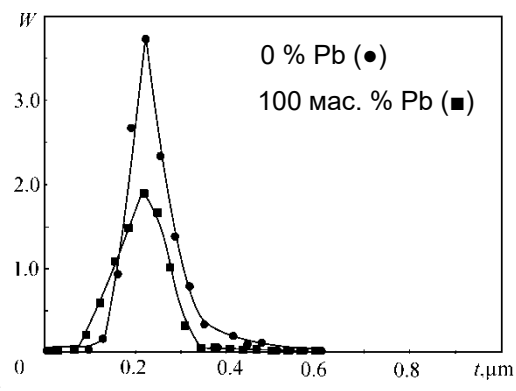
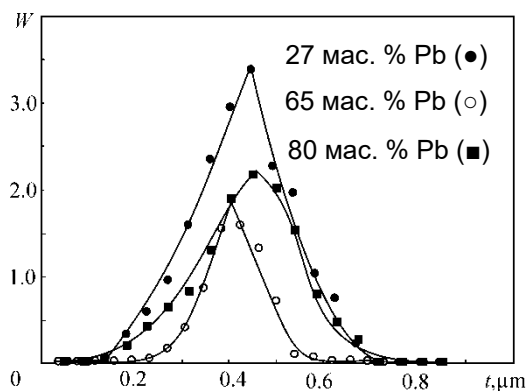
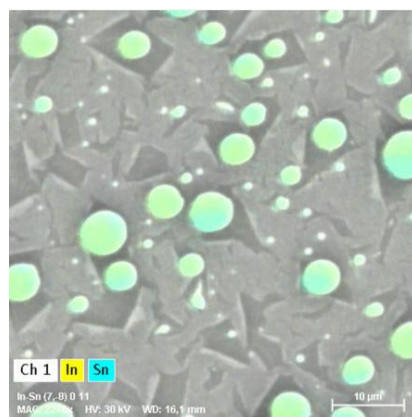
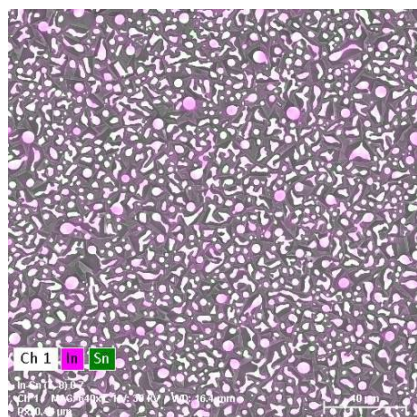
SEM зображення масиву частинок In-Pb, які утворюються при диспергуванні плівок In/Pb з незначним вмістом індію

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

Диспергування бінарних систем



SEM зображення плівки концентрація якої відповідає твердофазному існуванню In_3Sn , та зразків In-Pb, відпалених при температурах 130°C (a) та 180°C (b)

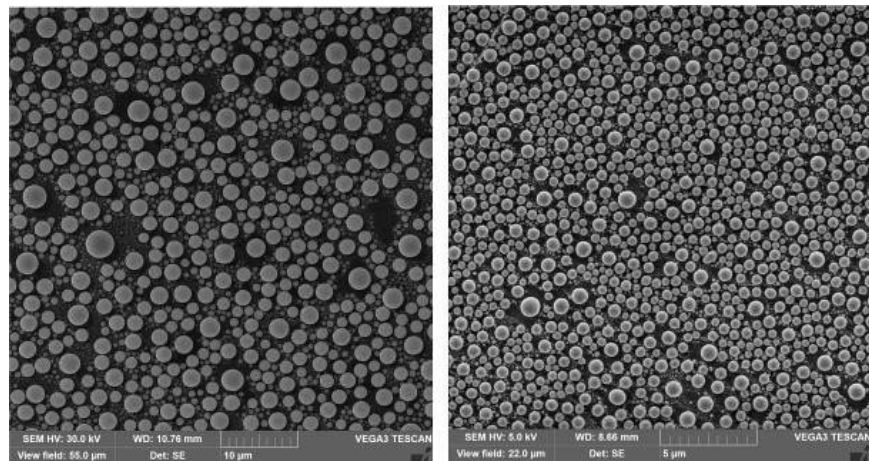


EDS карти розподілу елементів в плівках, які відпалювали за температури нижче та вище ліквідусу

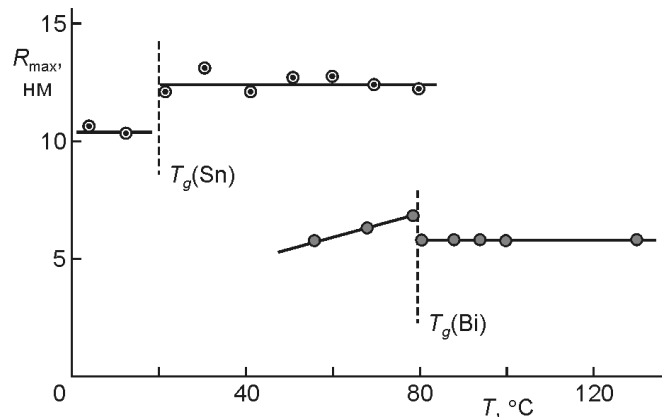
Гістограми розподілу частинок In-Pb за розмірами. Наведено гістограми сплавів з концентрацією компонентів

Морфологічна еволюція вакуумних конденсатів

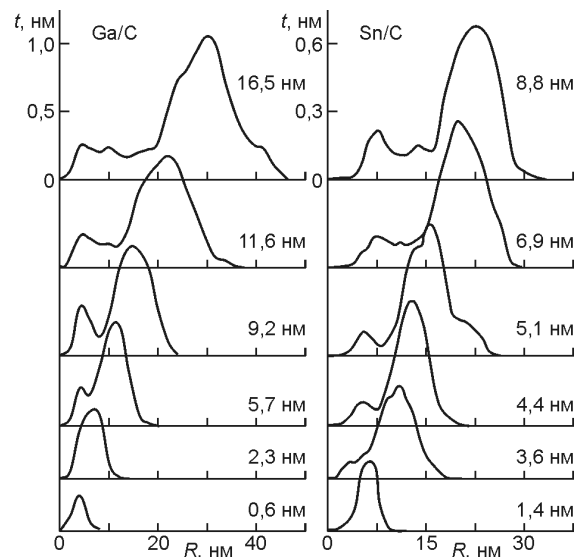
Острівцеві структури, які формуються у зразках при їх конденсації у рідку фазу



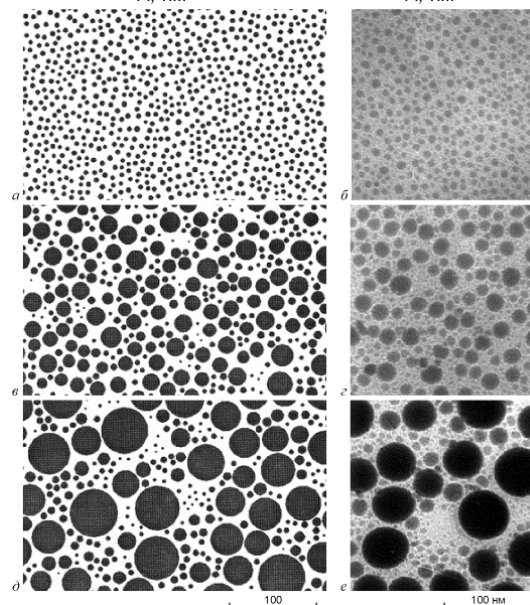
SEM зображення плівок Sn/C в яких олово конденсувалося в рідку фазу. Масова товщина плівок значно відрізняється



Температурна залежність положення головного максимуму розподілу острівців за розмірами в плівках олова і вісмуту на аморфній вуглецевій підкладці. Масові товщини плівок: 5 нм (Sn) і 2 нм (Bi)



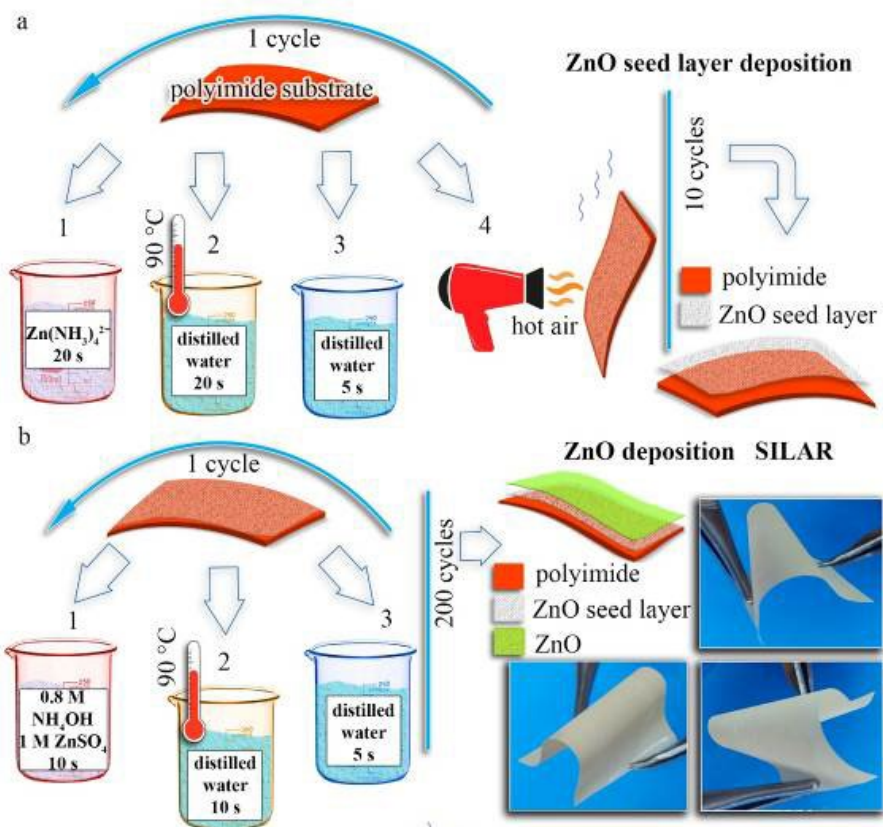
Еволюція гістограм розподілу острівців за розмірами в острівцевих конденсатах галію і олова на аморфних вуглецевих підкладках



Зображення різних етапів модельного (а, в, д) і реального (б, г, е: Ga / C, 2, 5 і 14 нм) зростання острівцевих плівок

Прикладне використання високодисперсних систем

Термоелектричні генератори на основі масивів ZnO та CuI



Схематичне зображення процесу отримання функціональних шарів ZnO

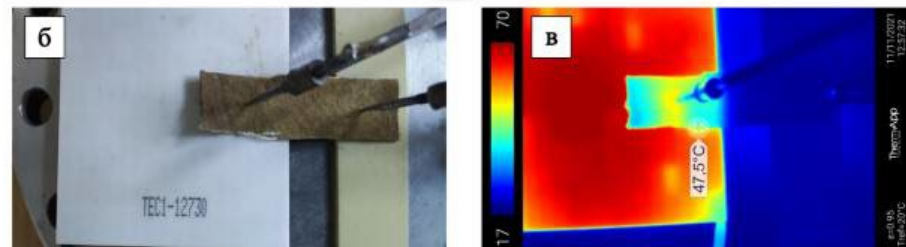
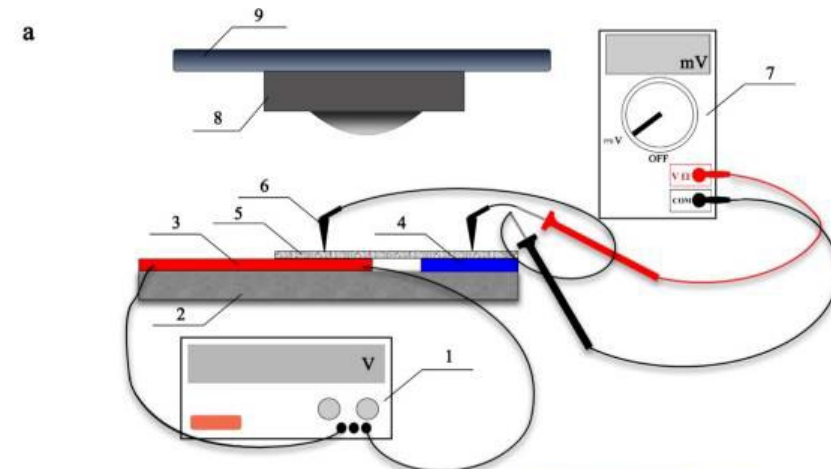
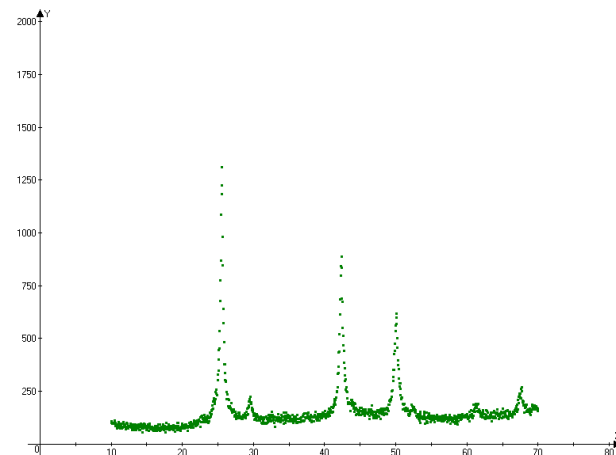
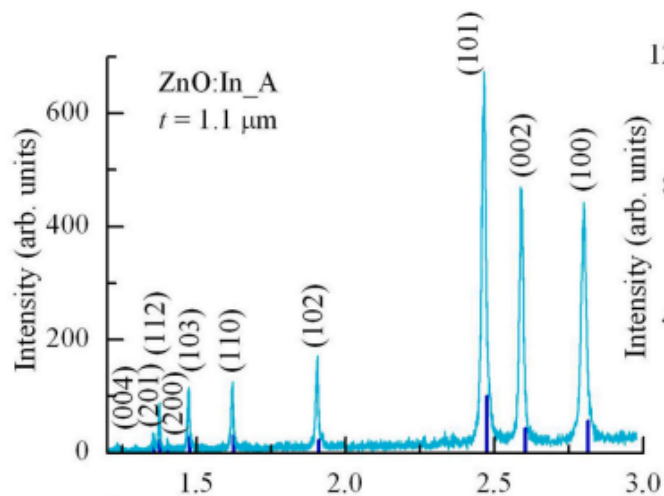
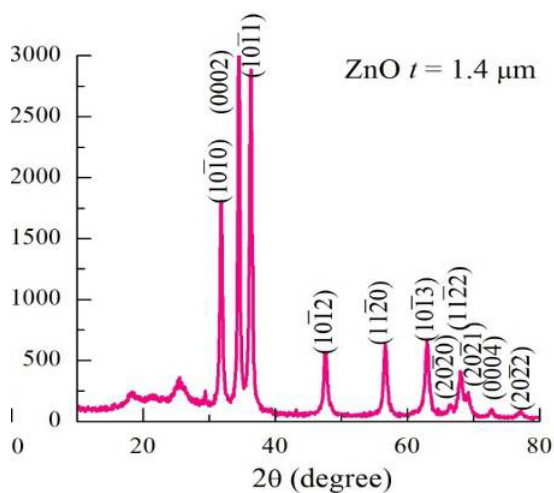


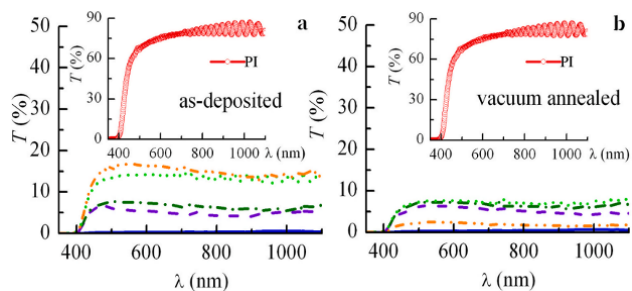
Схема для швидкого вимірювання термоелектричних параметрів зразків

Прикладне використання високодисперсних систем

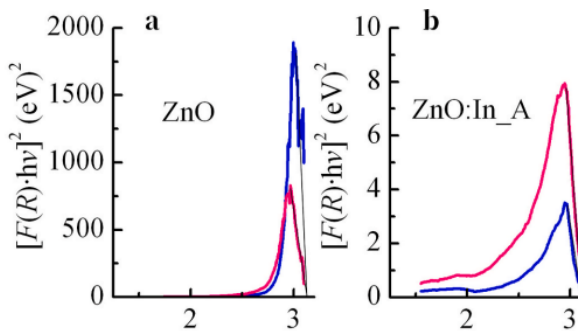
Термоелектричні генератори на основі масивів ZnO та CuI



Рентгенограми шарів ZnO, ZnO:In та CuI отриманих методом SILAR



Спектри оптичного пропускання плівок ZnO та ZnO:In. На врізках наведено спектри пропускання поліамідної підкладки



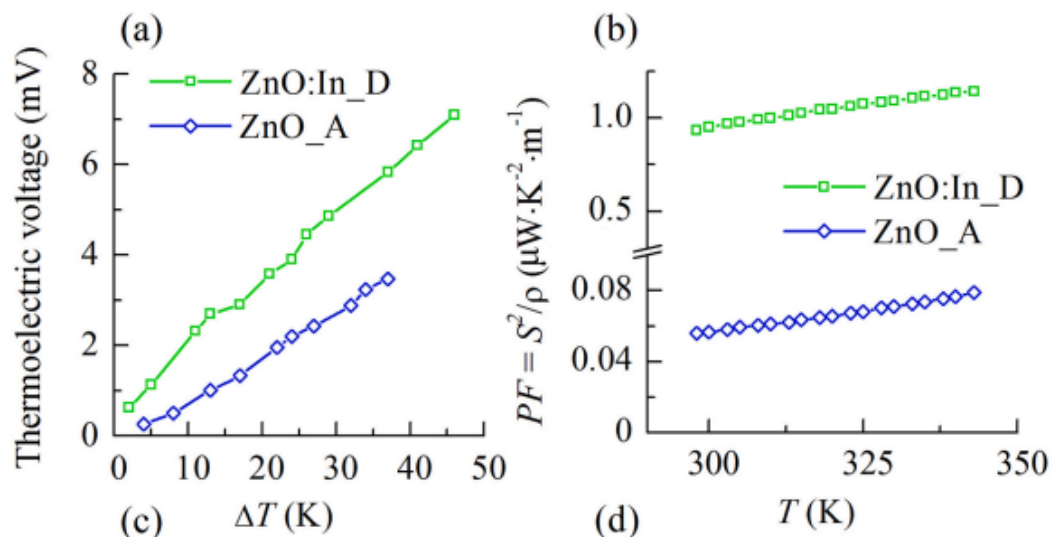
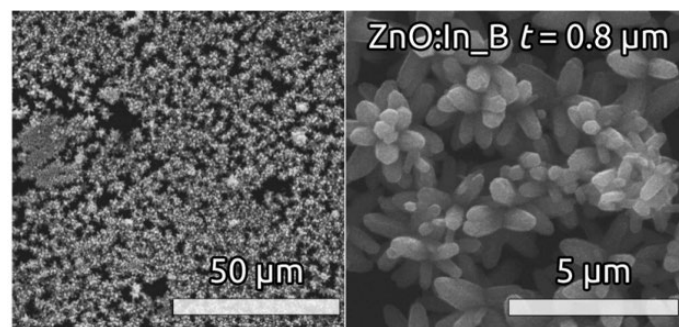
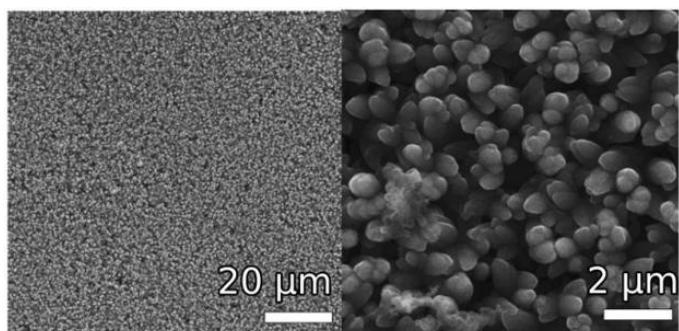
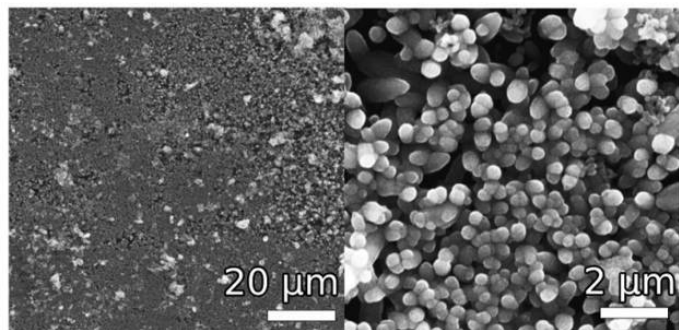
Графіки визначення оптичної ширини забороненої зони, отримана з використанням функції Кубелка-Муна0

$$F(R_{refl}) = \frac{(1 - R_{refl})^2}{2R_{refl}}$$

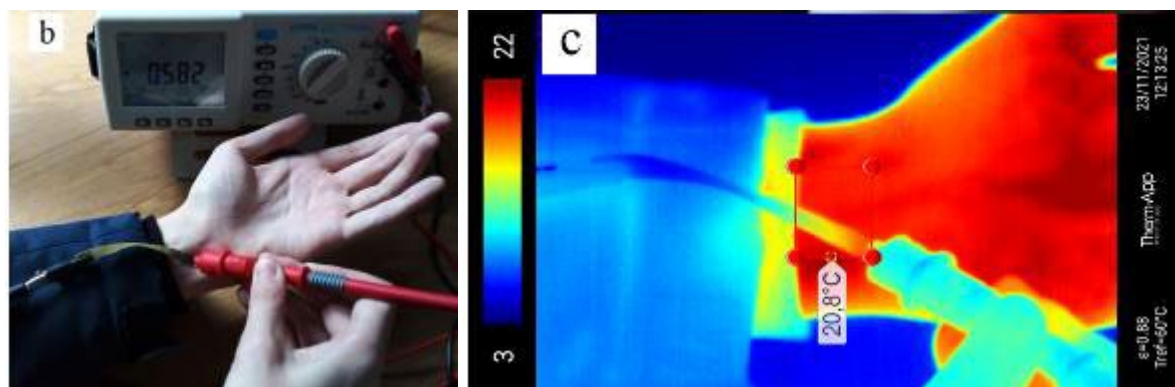
Оптична ширина забороненої зони становить 3.2 еВ, що дещо нижче табличного значення. Зниження ширини обумовлено донорними дефектами

Прикладне використання високодисперсних систем

Термоелектричні генератори на основі масивів ZnO та CuI



Залежність термоелектричної напруги різниці температур та термоелектричної потужності від температури

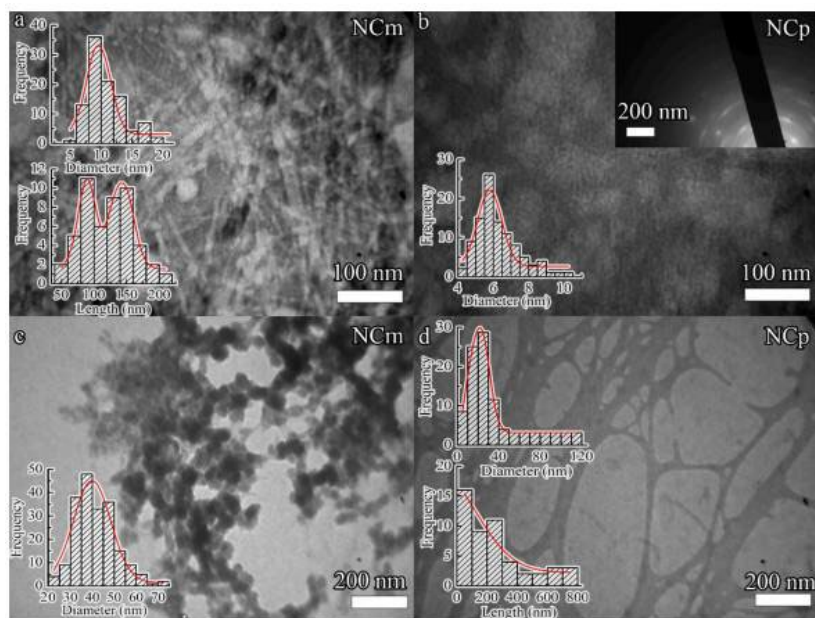


SEM зображення вихідних, відпалених та легованих шарів на основі ZnO

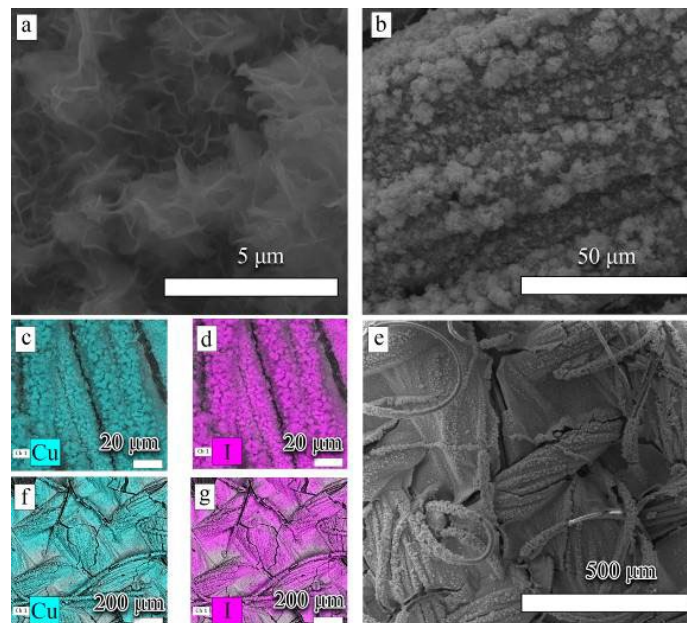
Оптичне та термографічне зображення прототипу термогенератора на поліамідній плівці

Прикладне використання високодисперсних систем

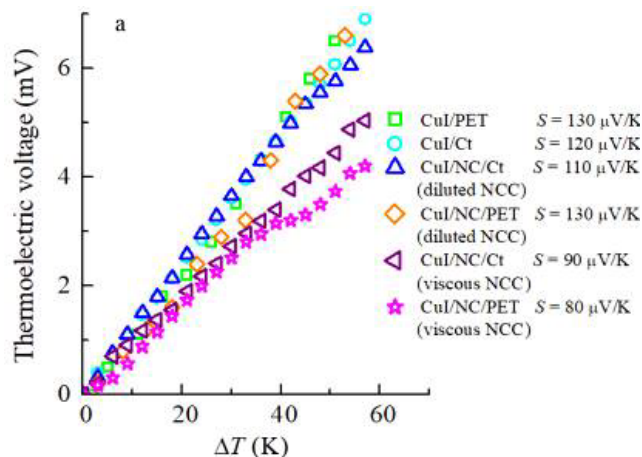
Нанокompозитні термоелектричні генератори на основі масивів ZnO та CuI



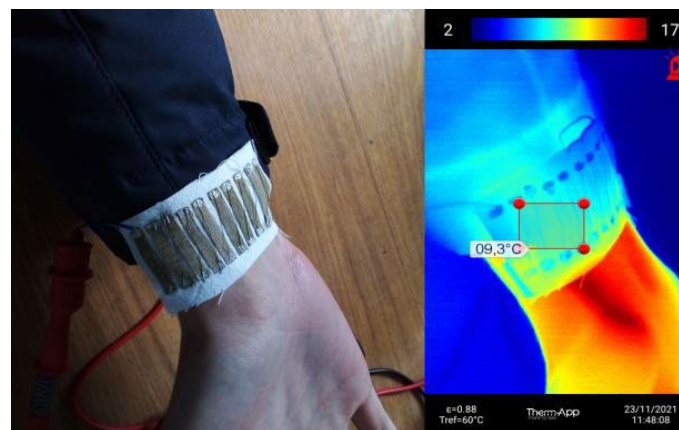
ТЕМ зображення наноцелюлози, гістограми розподілу за діаметрами та довжинами частинок наноцелюлози



SEM зображення та EDS карти структур CuI/NC/ПЕТ

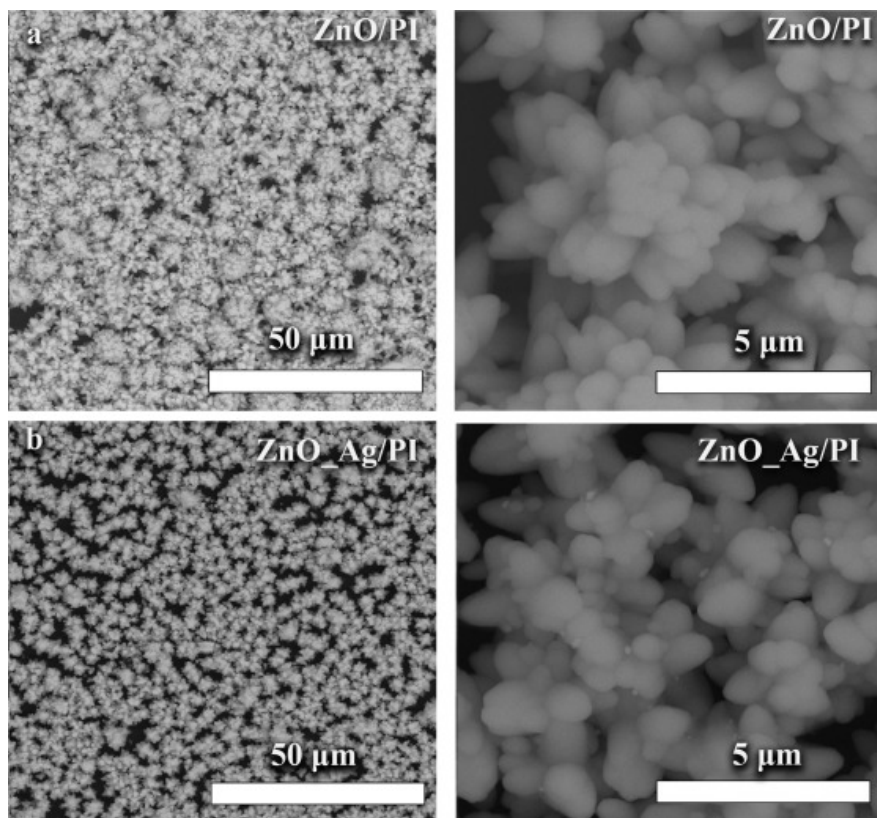


Залежність термоЕРС генератора від різниці температур, коефіцієнти Зеєбека та зображення прототипу генератора

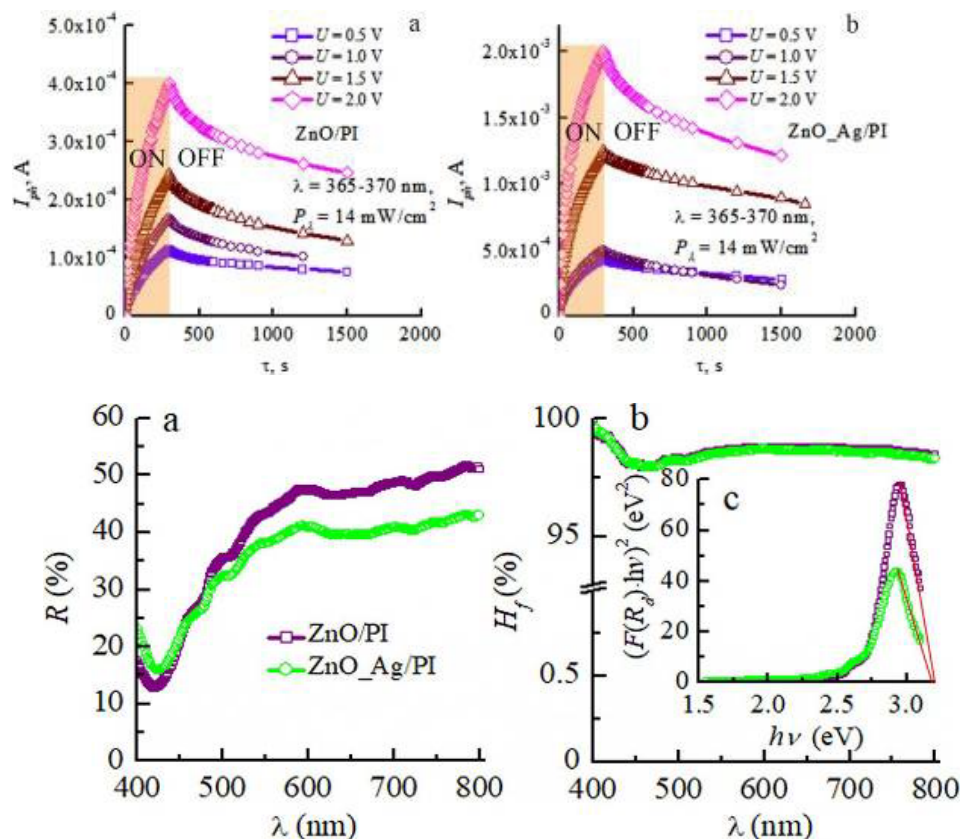


Прикладне використання високодисперсних систем

Сенсорні властивості масивів ZnO та CuI



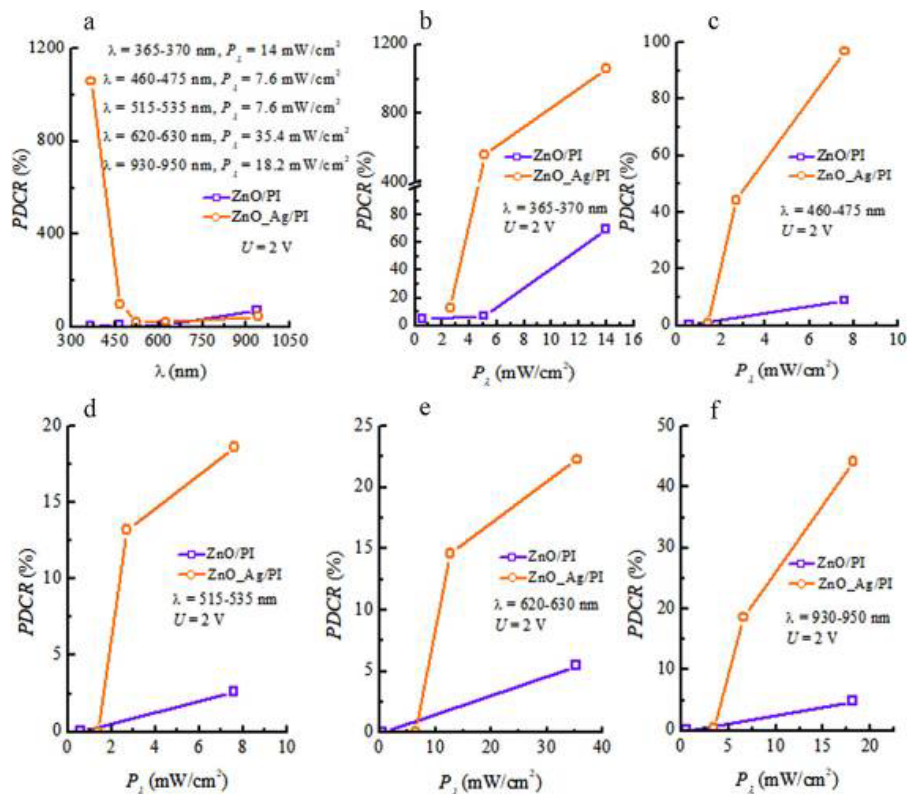
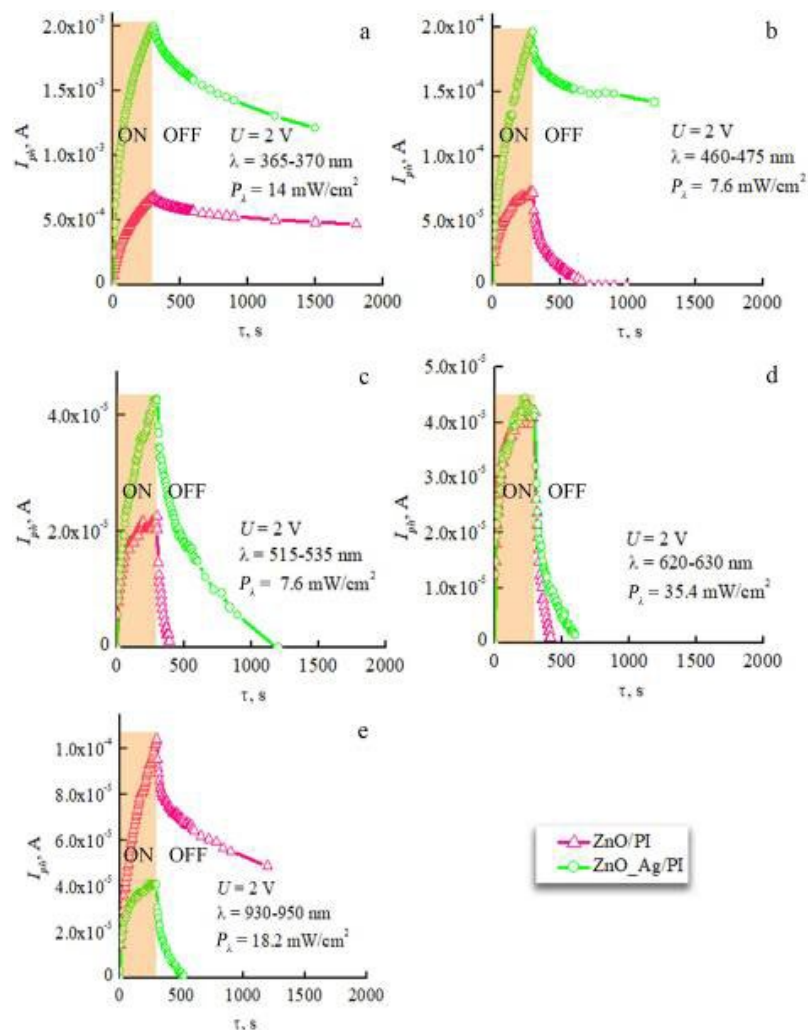
BSE зображення плівок ZnO/PI та ZnO/PI + Ag наночастинки



Залежність фотоструму від напруги зміщення для легованих та нелегованих функціональних структур; спектри повного віддзеркалення (а), коефіцієнту мутності (б) На врізці рис. б наведено графіки Кубелка-Муна

Прикладне використання високодисперсних систем

Сенсорні властивості масивів ZnO та CuI



Відношення фотоструму до темного струму. Рис. а демонструє залежність фоточутливості від довжини хвилі. Рис. г-є демонструють залежність фоточутливості від енергії опромінення

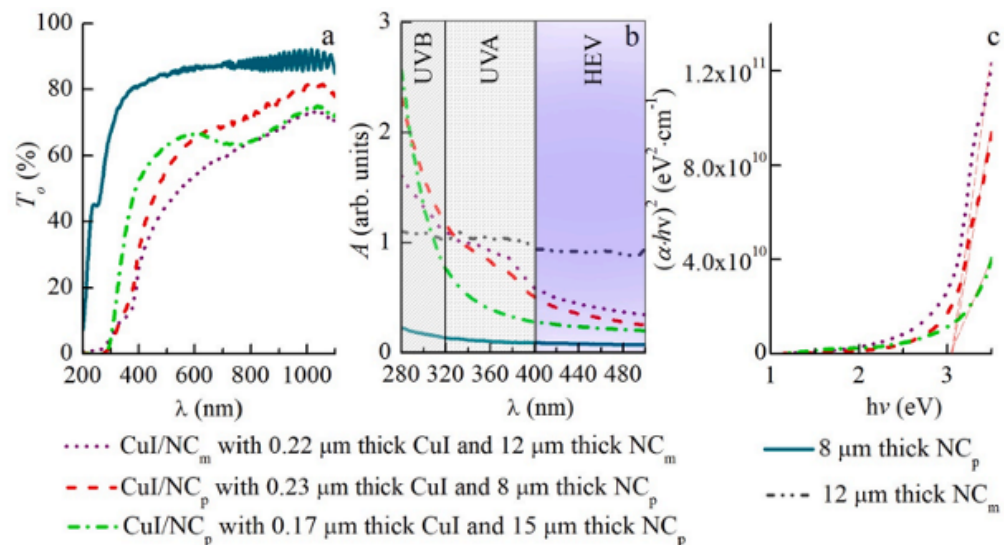
Залежність від часу фотоструму, який виникає при опроміненні структур ZnO та ZnO+Ag наночастинки світлом з різною довжиною хвилі

Прикладне використання високодисперсних систем

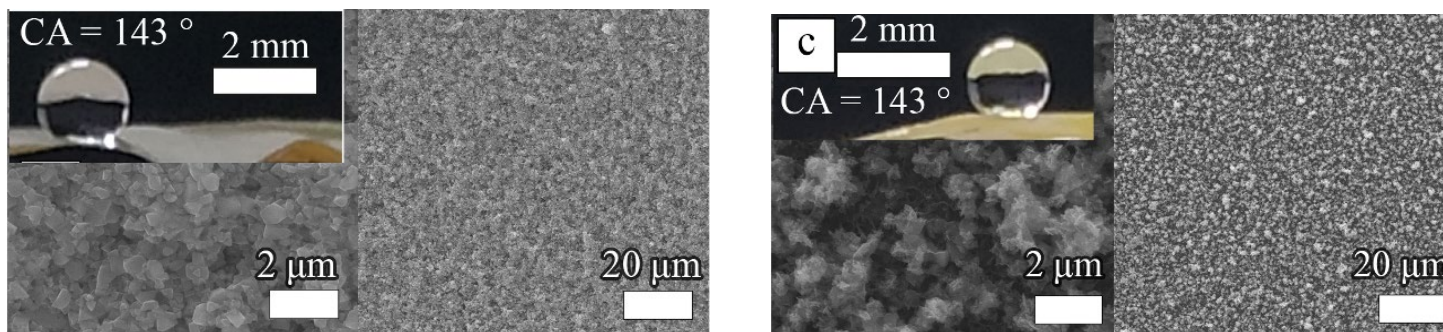
Захисні та гідрофобні властивості функціональних тканин

$$UV - blocking(\%) = 100 - \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_t d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda}$$

$$SPF = \frac{\int_{280}^{400} E(\lambda)I(\lambda)d\lambda}{\int_{280}^{400} E(\lambda)I(\lambda)10^{-A_0(\lambda)C} d\lambda}$$



Спектри пропускання (а) та повного оптичного поглинання (б) для вихідної та модифікованої nanoцелюлози



SEM зображення плівок CuI/NC_p та макроскопічних крапель на їх поверхні. Товщина CuI становить 1.1 та 2.2 мкм

Поточний стан досліджень

На сьогодні основна наша увага зосереджена на продовженні наукових досліджень присвячених впливу внутрішніх елементів нанорструктури на фізичні властивості плівкових систем. В цих дослідженнях ми поширюємо загальнонаукові результати на розв'язок прикладних проблем.

Зокрема ми виконуємо цілеспрямовані дослідження впливу розмірного фактора на фоточутливість шарів ZnO. Передбачається, що шляхом зміни розміру структурних елементів плівок можна забезпечити зростання їх чутливості та швидкодії. Нами запропоновано методики простої функціоналізації нанокристалічних плівок міді. Отримані таким чином структури з внутрішньою нанобудовою демонструють непогані сенсорні властивості та можуть стати основою матриць тепловізійних пристроїв. Вони мають термоелектричні властивості та є чутливими до летючих органічних сполук. Ми проводимо дослідження механічних властивостей нанокристалічних шарів та з'ясовуємо вплив нанометрового розміру зарен на твердість шарів та їх адгезію до підкладки.

Новим напрямком досліджень є вивчення трибоелектричних властивостей наноструктурованих шарів оксиду цинку. Нами показано, що плівки ZnO, нанесені на вуглецеву тканину, можуть не лише генерувати електричну енергію, а й є ефективними сенсорами. Які можуть реагувати на дотик чи вібрацію. Передбачається, що покращенню технологічних властивостей таких структур може сприяти використання структурного фактора та створення нанокомпозитів на основі функціонального шару та біополімерів. Дослідженню розмірного фактора в таких системах так само присвячена значна частина наших поточних досліджень.