

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію Чурілова Ігора Георгійовича

«Особливості термічного впливу на морфологічні зміни і механізм утворення рідкої фази у конденсованих однокомпонентних плівках (Pb, Sn, In, Bi) та у

бінарних шаруватих плівках (Bi/Sn, Pb/Sn, Pb/In)»,

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних

наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла

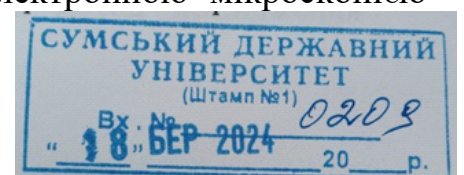
до спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02

у Сумському державному університеті

### *Актуальність теми дослідження.*

Робота Чурілова І.Г. спрямована на розв'язання важливого науково-практичного завдання, пов'язаного зі встановленням суті фізичних процесів, які відповідальні за термічне диспергування, а також із визначенням особливостей утворення рідкої фази у одношарових полікристалічних плівках металів (Pb, Sn, In, Bi) та шаруватих бінарних плівках (Bi/Sn, Pb/Sn). Робота пов'язана з одним із напрямів вдосконалення сучасної цифрової техніки та мініатюризацією функціональних елементів електронних пристроїв. Слід зазначити, що вивчення ефектів, які обумовлені внутрішніми поверхнями зразка, або внутрішнім розмірним ефектом, надає можливість отримати нову інформацію про унікальні явища про взаємодію по межах фаз та кристалітів, а також це є важливим для вирішення багатьох практичних завдань фізики твердого тіла та мікроелектроніки. Поглиблення наявних наукових знань щодо явищ термічного диспергування низькорозмірних структур має важливе значення для вирішення актуальних завдань сучасних технологій.

Один з перспективних шляхів, який розглядає пошукувач в дисертаційній роботі, а саме процеси формування наноструктурованих масивів при термічному диспергуванні суцільних плівок, або при конденсації компонентів у рідку фазу, отримання масивів розрізнених острівців, основні параметри яких контролюються технологічно. Із використанням методів вакуумної конденсації зразків, сучасних методів дослідження поверхні електронною мікроскопією



сканування, цифрових методів обробки зображень, та методів кількісного аналізу експериментальних даних були отримані експериментальні результати, на основі яких сформульовані висновки стосовно термічного диспергування плівок Sn, Pb та шаруватих плівок Bi/Sn, які були суцільними у вихідному стані; незалежності енергія активації поверхневої дифузії в двофазній концентраційній області незалежною від концентрації компонентів; поступового плавлення однокомпонентних плівок навіть за умови мікронних розмірів кристалітів; впливу міжзеренних та міжфазних меж та їх вплив на розмірний ефект плавлення; стосовно нового фізичного міркування щодо механізмів морфологічної еволюції вакуумних конденсатів при їх осадженні та різних етапах відпалювання. Цей сучасний підхід продиктований як природним ходом розвитку прикладної фізики, так і потребами інженерної практики.

У зв'язку з тим, що вакуумні методи можуть забезпечувати високу хімічну чистоту зразків, атомарний контакт між шарами та відтворюваність результатів, вони є надзвичайно перспективними для проведення наукових досліджень, спрямованих на вивчення особливостей утворення впорядкованих масивів. Завдяки процесам самоорганізації речовини такі структури можуть формуватися безпосередньо під час відпалу плівок, а дослідження кінетики їх утворення дає можливість відповісти на актуальні загальнонаукові та прикладні питання. З такої точки зору мета роботи аргументована, а тема роботи є актуальною. Отримані результати можна розглядати як вирішення актуальної задачі фізики твердого тіла.

Актуальність теми роботи підтверджується також ще й тим, що вона пов'язана з виконанням наукових досліджень на кафедрі експериментальної фізики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт: «Плавлення-кристалізація в конденсованих плівках металів та хімічних сполук» (№ держреєстрації 0109U001325), «Фазові перетворення в одно- та двокомпонентних нанорозмірних плівкових системах» (№ держреєстрації 0111U007956), «П'єзокварцевий резонатор як *in situ* метод дослідження

фазових перетворень в нанорозмірних плівках металів та сплавів» (№ держреєстрації 0115U000478). «Фазові і структурні перетворення та електрокінетичні явища у двокомпонентних наносистемах» (№ держреєстрації 0115U000461), «Термічна стабільність та умови утворення впорядкованих острівцевих структур в полікристалічних плівках металів» (№ держреєстрації 0117U004867).

***Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації.***

Оскільки дисертаційна робота Чурілова І. Г. має експериментальний характер, то достовірність отриманих результатів гарантується використанням сучасних та апробованих методів вакуумної конденсації, серед яких метод змінного стану для отримання серії зразків, що знаходяться при різних температурах, та метод змінного складу, який дає можливість отримувати зразки із дискретною або безперервною зміною товщини плівки чи концентрації компонентів, СЕМ мікроскопії, цифрових методів обробки зображень, та метод кількісного аналізу експериментальних даних, що базуються на моделях відомих вчених. На користь висновку про коректність результатів свідчить також їх узгодженість із подібними дослідженнями інших авторів.

Робота, яка виконана здобувачем, є закінченою, цілісною, фундаментальною працею, що являє добротний всеохоплюючий огляд літератури, який поєднаний з оригінальними експериментальними знахідками та коректною математичною обробкою даних. Згідно з викладеним вище обґрунтованість наукових положень, висновки результатів дослідження і рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, не підлягають сумніву, а наукові положення і висновки дисертації є обґрунтованими.

**Достовірність результатів досліджень.**

Достовірність отриманих результатів у дисертаційній роботі здобувача Чурілова І. Г. зумовлена коректно поставленими метою та завданнями, а також використанням відповідної методології дослідження. Крім того, достовірність заявлених положень обґрунтовується комплексним підходом у вивченні визначеного об'єкта, забезпеченням використання коректних, надійних і незалежних методів дослідження, порівнянням і узгодженістю експериментальних результатів з сучасними літературними даними, та високим рівнем проведення обробки результатів вимірювань. Інтерпретація результатів експерименту була проведена на підставі загальноприйнятих фізичних теорій, вона порівняна зі сторонніми результатами, що свідчить на користь обґрунтованості наукових результатів дисертації. Таким чином, наукові результати, отримані в дисертаційній роботі І.Г. Чурілова, є достовірними.

***Найважливіші наукові результати, що містяться в дисертації, та нові факти отримані дисертантом.*** Вирішення задач дисертації дозволило отримати ряд нових принципових результатів.

1. В роботі подальший розвиток набули методи аналізу структурного стану, які ґрунтуються на використанні моделі Павлова, як ефективного способу встановлення причин зниження температури початку утворення рідкої фази. Показано, що розмірні ефекти, пов'язані з внутрішніми границями, які зникають при плавленні, можна кількісно описати виходячи з тих самих міркувань, що і для розмірних ефектів, зумовлених зміною поверхневої енергії при плавленні малих частинок.

2. Для полікристалічної плівки Рb визначене середнє значення енергії міжзеренних меж, яке становить 230 мДж/м<sup>2</sup>, ґрунтуючись на отриманих даних щодо зниження температури плавлення.

3. Для двошарових зразків Bi/Sn побудовано залежність від концентрації енергії активації дифузійних процесів, які обумовлюють твердофазне диспергування плівок. Спостережено, що по збільшенню вмісту вісмуту енергія

активації швидко зменшується до мінімуму 0.7 eV при концентрації, яка відповідає граничній розчинності вісмуту в олові.

4. Показано, що підходи, використані в класичних моделях розмірних ефектів плавлення, засновані на розгляді різниці поверхневих енергій рідкої та твердої фаз, можуть бути поширені на нанокмпозитні структури.

5. Визначені середні значення енергії міжзерених меж для одношарових плівок Pb – 230 мДж/м<sup>2</sup>, Sn – 140 мДж/м<sup>2</sup>, а також значення міжфазної енергії границі розділу шарів бінарних систем Pb/Sn – 45 мДж/м<sup>2</sup> та Bi/Sn – 33 мДж/м<sup>2</sup>.

6. Запропоновано нові фізичні міркування стосовно механізмів морфологічної еволюції вакуумних конденсатів при їх осадженні та різних етапах відпалювання

*Апробація дисертації та публікації.* Основні положення роботи викладено та обговорено на наукових конференціях різного рівня: XV International conference «Physics and technology of thin films and nanosystems: ICPTTFN-XV», 11–16 May, 2015, Ivano-Frankivsk, Ukraine; XVI International conference «Physics and technology of thin films and nanosystems: ICPTTFN-XVI», 15–20 May, 2017, Ivano-Frankivsk, Ukraine; VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка і мікросистемні технології», 28 травня – 1 червня, 2018, Одеса, Україна; XVII International Freik Conference on the Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems ICPTTFN-XVII, May, 20–25, 2019, Ivano-Frankivsk, Ukraine; 9th IEEE International Conference on Nanomaterials: «Applications & Properties», Sep 15–20, 2019, Odesa, Ukraine; XIV Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах», 3–6 грудня, 2019, Харків, Україна; Ukrainian Conference with International participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface" dedicated to the 90th birthday of Aleksey Chuiko, Academician of NAS of Ukraine, 2020, Kyiv, Ukraine.

Результати дисертації опубліковані у 22 наукових працях, серед яких 2 розділи у монографіях, опублікованих у Springer Nature, 10 статтях, серед яких 4 – у журналах, що індексуються у Scopus, 5 – у фахових наукових журналах

України, 1 – яка додатково відображає результати роботи та 10 тезах доповідей на наукових конференціях.

**Оформлення дисертації** відповідає вимогам до такого виду робіт і наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

**Значення для науки і практики отриманих результатів.** Отримані у роботі результати можуть бути використані у лабораторіях плівкового матеріалознавства закладів вищої освіти МОН України та у дослідницьких установах НАН України. Крім того їх пропонується використати для поглиблення існуючих загальнонаукових уявлень щодо механізму твердофазного розпаду плівок, суцільних у вихідному стані, та є корисними для прогнозування термічної стабільності при розробці функціональних шарів сучасної наноелектроніки.

Фундаментальне значення отриманих у роботі результатів полягає в тому, що ефект внутрішнього розмірного ефекту у фактично масивних зразках, механізми еволюції морфології плівок під час їх диспергування, вплив міжзеренних та міжфазних меж на особливості фазових перетворень у нанокристалічних структурах можуть бути використані для поглиблення теоретичних уявлень фізики конденсованого стану.

Крім цього, результати, які отримані в роботі, можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці магістрів та докторів філософії.

**Оцінка змісту дисертації та її завершеності.** Дисертація, яка рецензується, є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена комплексна задача встановлення фізичного сенсу процесів, що відповідальні за термічне диспергування, та у визначенні особливостей утворення рідкої фази у одношарових полікристалічних плівках металів (Pb, Sn, In, Bi) та шаруватих бінарних плівках (Bi/Sn, Pb/Sn). Результати досліджень дисертанта повністю висвітлені у наукових журнальних публікаціях, матеріалах конференцій та відображені у змісті дисертації.

### *Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертації.*

Стосовно тексту дисертації можна зробити наступні зауваження.

1. Стор. 32. «Компоненти зразків випаровували з човників» ... та «конденсували на підкладки з аморфного вуглецю, молібдену або нікелю». Що аморфний молібден? Щось наплутав. А ось що важливо, це шорсткість підкладки. Про це ні слова.
2. В роботі використовується та багато разів обговорюється так звана «модель Палатника». В мене є заперечення с приводу такого формулювання. По-перше чому без ініціалів, що за неповага. А по-друге, в монографії (посилання 104) головним ідеологом був Черемський П.Г. при всій повазі до професорів Палатніка Л.С. та Фукса М.Я. Вони підтримали, як потім визначились, вітчизняного класика теоретика та практика по пороутворенню. Може краще булоб написати «модель Палатника-Черемського – Фукса».
3. Дисертант сконцентрував увагу на моделі Павлова, яка хоч й була однією з перших, однак з того часу було розвинуто велику кількість інших підходів, які биль точно описують природу фазоутворення. Це потребує пояснення.
4. Стор.48. Дисертант не зовсім вірно використовує термінологію. «...пори утворюються переважно в місцях концентрації великої кількості дефектів, якими в полікристалічних зразках в першу чергу є потрійні стики зерен». Не зовсім згоден, бо потрійний стик це і є сам дефект, як і межа. А чи є мікроскопіч високої роздільності від потрійних стиків.
5. В дисетації автор кінцево не зупинився на тому яку термінологію використовувати. Це починається зі смісту. «2.5 Електронно-мікроскопічні дослідження плівок і цифрова обробка отриманих зображень». А треба було використовувати Скануюча електронна мікроскопія – СЕМ. Стор. 51. Рисунок 3.8 – «Електронно-мікроскопічні зображення плівок  $\text{Bi/Sn}$ » Знову не СЕМ. Рис.4. 3 тут вже все добре. 4,7 та 4,8 знову ЕМ. Нема узгодженності та порядку.

6. На прикінці розділу 3 дисертант підіймає питання, приводить деякі роздуми щодо визначення положення меж, щодо дифузії в гомогенних системах, та їх роль у пороутворенні, але я вважаю, що тут треба бути обережними та продовжити подібні дослідження, а не посилатися лише на одного науковця.
7. Стор.69, якщо рис.4. 13 взято з літератури, то посилання треба давати й під рисунком. Так як на рис.4.14.
8. Для температурного інтервалу плавлення краще було використовувати позначення  $\Delta T$ , а не  $T$ .
9. Стор. 74. З тексту дисертації не зрозуміло звідкіля дисертант взяв, або отримав вираз (4.3).
10. Зауваження-побажання. В роботі бажано було б дати аналіз залишкових макронапружень та мікронапружень та їх впливу на процеси фазових перетворень, які спостерігались.
11. Надписи на рисунку 2.1 наведені не державною мовою.
12. Географія представлення матеріалу дисертації на міжнародних конференціях представлена лише Україною.

Проте, наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Чурілова Ігора Георгійовича.

## **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Чурілова Ігора Георгійовича «Особливості термічного впливу на морфологічні зміни і механізм утворення рідкої фази у конденсованих однокомпонентних плівках (Pb, Sn, In, Bi) та у бінарних шаруватих плівках (Bi/Sn, Pb/Sn, Pb/In)» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка дозволила встановити фізичний сенс відповідальних за термічне диспергування процесів та визначити особливості утворення рідкої фази в об'єктах дослідження.



Дисертаційна робота відповідає вимогам п. п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Чурілов Ігор Георгійович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент

завідувач кафедри фізики металів та напівпровідників

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

доктор фізико-математичних наук, професор

Сергій МАЛИХІН

Підпис зав. каф. ФМН, доктора фіз.-мат. наук, проф. Малихіна С.В.

ЗАСВІДЧУЮ

вчений секретар Національного технічного університету

"Харківський політехнічний інститут"

Юрій ЗАЙЦЕВ

