

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу  
Іллі Володимировича Ольховика  
на тему «Вплив лазерного випромінювання на процеси індукованої оловом  
кристалізації аморфного кремнію»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 10 Природничі науки  
за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали

### Актуальність теми дисертації.

Процеси кристалізації аморфного кремнію ( $a$ -Si) усе більше набувають інтересу науковців для виготовлення полікристалічних кремнієвих пристроїв, таких як тонкоплівкові транзистори та сонячні елементи. Для вироблення таких пристроїв застосування кристалізації  $a$ -Si надає можливості використовувати низькотемпературні та, отже, недорогі підкладки, що дуже важливо для зниження загальних витрат на сонячні елементи. Найбільшу увагу в галузі кристалізації  $a$ -Si приділено твердофазній кристалізації та лазерній кристалізації. Але твердофазна кристалізація потребує тривалого часу відпалу та досить високої температури, тоді як лазерна кристалізація залишається дорогим і складним процесом. Для подолання цих обмежень застосовується метал-індукована кристалізація, яка є альтернативним процесом кристалізації для виготовлення тонкоплівкових пристроїв. Застосування олово-індукованої кристалізації  $a$ -Si не змінює електричні, оптичні та структурні властивості Si та дає змогу отримувати кристали Si розміром порядку одиниць нанометрів на відміну від інших металів без впливу на електричні та рекомбінаційні властивості кремнію. Тому обрана здобувачем тема дисертаційної роботи є актуальною і важливою для вдосконалення технології виготовлення аморфно-кристалічних нанокомпозитів на основі Si і контролю якості шаруватих структур Si/Sn/Si для виробництва електронних приладів фотоелектричного перетворення.

### Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1). Вперше виявлено фрактальний характер структуризації  $a$ -Si в мікро- і нанометровому масштабі при його осадженні із газової фази на поверхню рідкого Sn.

2). Вперше експериментально показано, що стимулюючий вплив лазерного опромінення на Sn-індуковану кристалізацію  $a$ -Si має не теплову (тобто таку, що не впливає на температуру зразка) складову.

3). Вперше експериментально показано, що саме нетеплова складова впливу лазерного світла викликає нелінійний за інтенсивністю «червоний» зсув спектра комбінаційного розсіяння нанокристалічного Si, що було пояснено нерівноважною заселеністю фононів через електрон-фононну взаємодію



фотоіндукованих носіїв заряду внаслідок високої швидкості їх генерації за високої потужності збудження лазерним світлом.

Наукові положення, висновки та рекомендації, що сформульовані в дисертаційній роботі, базуються на значному обсязі теоретичних та експериментальних досліджень, є логічно обґрунтованими та підтверджуються результатами експериментів. Достовірність результатів підтверджується високою відтворюваністю експериментальних даних. Під час виконання роботи здобувач використовував сучасні експериментальні методи досліджень та програмне забезпечення.

Наукові дослідження були виконані здобувачем на кафедрі прикладної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках під керівництвом професора, д-ра техн. наук, проф. Воронова Сергія Олександровича та в лабораторії радіаційних технологій Інституту фізики Національної академії наук України у рамках цільової комплексної програми Національної академії наук України «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій» в рамках конкурсного проекту № 12\20-Н «Індукована оловом нанокристалізація об'єму і наноструктуризація поверхні тонких плівок аморфного кремнію» під керівництвом зав. лабораторії, д-ра техн. наук, с.н.с. Неймаша Володимира Борисовича.

Отже, у дисертаційній роботі поставлене наукове завдання встановлення впливу олова та лазерного опромінення на кристалізацію  $\alpha$ -Si у шаруватих структурах a-Si/Sn та оцінка можливості його використання для управління розмірами нанокристалів, а також встановлення впливу поверхні шаруватих плівок Si/Sn/Si, виготовлених методом термічно-вакуумного осадження, на форму та масштаб структуризації поверхні, виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Ольховика І.В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Прикладна фізика».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача в науковий напрям «Прикладна фізика».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Ольховика Іллі Володимировича є результатом самостійних досліджень здобувача та не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

**Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Матеріал дисертації викладено послідовно та доступно, використана загальноприйнята термінологія.



Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 134 сторінки.

У вступі розкрито актуальність теми дослідження та її зв'язок із науковими програмами, планами та темами; визначено мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження; окреслено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; наведено інформацію про апробацію результатів дисертаційної роботи та вказано на особистий внесок здобувача.

У першому розділі «Місце і роль лазерних обробок кремнію в перспективах сонячної енергетики» проаналізовано сучасні вітчизняні та закордонні дослідження, присвячені ефективності сонячних елементів, принципу їх роботи, процесу метал-індукованої кристалізації аморфних напівпровідників на основі кремнію, впливу та механізму легування Si домішкою Sn, а також застосуванню лазерного випромінювання для створення умов кристалізації  $\alpha$ -Si індукованої легуванням Sn.

У другому розділі «Методика експерименту та обробки результатів» описано умови напилу досліджуваних зразків тонко-плівкових шаруватих структур  $\alpha$ -Si/Sn,  $\alpha$ -Si/Sn/ $\alpha$ -Si та Sn/ $\alpha$ -Si на підкладках із монокристалічного Si та боросилікатного скла та опис експериментальних установок для дослідження напиленних плівок методами растрової електронної мікроскопії, рентгенівського флуоресцентного аналізу, атомно-силової мікроскопії, спектроскопії комбінаційного розсіювання.

У третьому розділі «Мікро- та наноструктура шаруватих плівок Si/Sn/Si, утворених методом парового осадження» представлено результати дослідження особливості рельєфу поверхні шаруватих плівок Si-Sn-Si, які використовуються для отримання нанокристалів Si шляхом нанокристалізації  $\alpha$ -Si, індукованою оловом методами електронної та атомно-силової мікроскопії із залученням рентгенівського флуоресцентного мікроаналізу. Визначено, що в отриманих шляхом Sn-індукованої кристалізації  $\alpha$ -Si шаруватих плівках Si/Sn/Si аморфно-кристалічні наноконкомпозити містять нанокристаліти Si із середнім розміром 3 нм і їх часткою в об'ємі плівки  $> 90\%$ . Показано, що шаруваті плівки Si/Sn/Si, виготовлені методом термічно-вакуумного осадження, мають поверхню з рельєфом, структурованим у вигляді квазісферичних утворень із латеральним розміром від 20 нм до 2-3 мкм. Залежно від товщини шару Sn форма й розмір цих утворень змінюється від випуклих еліпсоїдів та багатокутників до грона-подібних дендритів фрактального типу, що можуть створювати порушуватий (розмір пор від 1 до 100 нм) шар  $\alpha$ -Si. Визначено, що спостережене утворення мікро-крапель Sn під дією сил поверхневого натягу в умовах слабого змочування оловом кремнію зумовлює квазісферичний рельєф шару рідкого Sn, на який відбувається подальше осадження атомів Si та формування зовнішньої поверхні.

У четвертому розділі «Вплив лазерного опромінення на формування і властивості нанокристалів кремнію в шаруватих структурах  $\alpha$ -Si/Sn» наведено результати досліджень, проведених на шаруватих структурах  $\alpha$ -Si/Sn/ $\alpha$ -Si, осаджених на двох типах підкладок – боросилікатному склі та монокристалічному Si за допомогою спектроскопії комбінаційного розсіювання. Приведено результати дослідження поведінки спектрів комбінаційного



розсіяння в поверхневому шарі  $a$ -Si за різної інтенсивності лазерного опромінення та за різних температур підкладки. Виявлено, що за температур вище  $230^{\circ}\text{C}$  під впливом лазерного випромінювання потужністю  $10\text{ мВт/мкм}^2$  відбувається збільшення на порядок швидкості нанокристалізації  $a$ -Si, індукованої Sn. Встановлено, що ефект лазерної стимуляції МІК  $a$ -Si зумовлений фотоіонізаційним впливом лазерного опромінення. Спостережено чутливість до інтенсивності лазерного випромінювання спектрів комбінаційного розсіяння нанокристалів Si, яку було пояснено нерівноважною заселеністю фононів, що виникає через електрон-фононну взаємодію фотоіндукованих носіїв заряду внаслідок високої швидкості їх генерації за високої потужності збудження.

У п'ятому розділі «Кристалізація аморфного кремнію індукована оловом під дією імпульсного лазерного випромінювання» наведено результати дослідження впливу потужності, тривалості та довжини хвилі імпульсного лазерного випромінювання на процеси МІК у шаруватих структурах  $a$ -Si/Sn/ $a$ -Si. Визначення домінантного розміру кристалів Si та частки об'єму, яку вони займають в аморфній матриці, у досліджуваних зразках було проведено методом спектроскопії комбінаційного розсіювання світла. Визначено, що енергія, необхідна для початку Sn-індукованої кристалізації Si є на порядок меншою при опроміненні потужнішим лазерним опроміненням. Встановлено, що вплив інтенсивності лазерного випромінювання на процеси кристалізації  $a$ -Si індуковану Sn залежно від параметрів лазерного опромінення має пороговий характер, зокрема значення довжини хвилі лазерного опромінення впливає на теплову глибину лазерного проникнення. Важливим результатом є те, що при зміні потужності лазерного променя в імпульсі та кількості серій одноімпульсних сканувань є можливість регулювання розміру та концентрації нанокристалів в аморфно-кристалічному нанокompозиті.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.**

Наукові результати дисертації висвітлені в 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 2 статті в періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, віднесених до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal, що пройшли рецензування.

Також результати дисертації були апробовані на 8 наукових фахових конференціях.

Публікації здобувача вирізняються високим науковим рівнем та отримані з дотриманням принципів академічної доброчесності. У роботах, підготовлених у співавторстві, дисертанту належать лише ті розділи та положення, які розроблені ним самостійно. Інформація про особистий внесок здобувача в кожну з опублікованих ним статей наведена в Додатку А «Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації» (С. 132-134).



Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені в наукових публікаціях здобувача.

Але треба зазначити, що оскільки в дисертації використано ідеї або розробки, що належать співавторам, разом з якими здобувачем опубліковано наукові праці, то відповідно до Наказу МОН від 12.01.2017 №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» здобувач мав зазначити конкретний особистий внесок не лише до опублікованих ним статей у співавторстві, але й до опублікованих тез доповідей науково-практичних конференцій, до того ж здобувач мав також додати посилання на дисертації співавторів, у яких було використано результати спільних робіт.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Здобувач мав надати посилання на дисертації співавторів у тексті роботи, у яких було використано результати спільних робіт.

2. Здобувач мав уточнити особистий внесок до опублікованих тез доповідей науково-практичних конференцій.

3. На Рис. 1.6 показано залежність як функцію діаметра точки, а в підпису до рисунка зазначено радіус.

4. З підпису до Рис. 1.7 незрозуміло яким методом було отримано дане зображення.

5. На стор. 50 зазначено, що «З рис. 1.16 можна зробити важливий висновок. Для того, щоб нанокристали мали властивості квантових точок їх розмір має бути менше 10 нм.». Таке твердження є загальновідомою властивістю квантових точок і не впливає з Рис. 1.16.

6. На стор. 59 надано посилання на Рис. 1.23в, але на рисунку така частина відсутня.

7. Оскільки здобувач особисто отримував експериментальні зразки, то було б інформативно показати не лише фото зовнішнього вигляду установки вакуумного напилу, але й навести принципову блок-схему даної установки.

8. На стор. 81-82 зазначено, що «Високий, на рівні 20-30 %, вміст вуглецю в досліджених спектрах зумовлено залишковим забрудненням камери мікроскопу після попередніх дослідів з вуглецевими композитами». Проте з тексту дисертації незрозуміло чи впливає це забруднення на отримані результати.

9. З тексту на стор. 96 незрозуміло, що таке «стаціонар інтенсивності».

10. На Рис. 4.10, 4.11 наведено результати моделювання спектрів комбінаційного розсіяння, проте не зазначено за допомогою якого програмного забезпечення це було виконано.

11. На деяких рисунках відсутні пояснення в підписах до частин а, б, в.

12. У дисертаційній роботі присутні граматичні та стилістичні помилки.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними та не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.



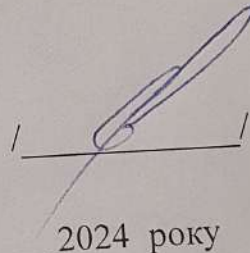
### Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Ольховика Іллі Володимировича на тему «Вплив лазерного випромінювання на процеси індукованої оловом кристалізації аморфного кремнію» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для природничих наук. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Ольховик Ілля Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали.

### Рецензент:

В.о. завідувача кафедри загальної фізики  
та моделювання фізичних процесів  
фізико-математичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
доктор фізико-математичних наук



Дарія САВЧЕНКО

М.П.

«31» січня

2024 року

