

## ВІДГУК

офіційного опонента про дисертацію **Бучковської Марії Дмитрівни «Металічний характер провідності в післяперколяційній ділянці товщин ультратонких плівок металів з кубічною кристалічною ґраткою»** представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.18 - фізика і хімія поверхні

Для мініатюризації пристроїв сучасної мікро- та наноелектроніки необхідно розробити методики створення тонкопліткових зразків нанометрових розмірів. Пошук методів формування таких надтонких провідних шарів є актуальною технологічною проблемою цікавою з практичної точки зору і з точки зору вивчення фундаментальних властивостей поверхні твердих тіл. Однією з ключових проблем розвитку тонкопліткових технологій є створення надійних електропровідних елементів мікросхем на основі плівок металів.

В процесі формування електричносуцільної металевої плівки виникають неабиякі технологічні труднощі, пов'язані з тим, що її ріст розпочинається з виникнення ізольованих між собою зародків кристалізації з тенденцією до коалесценції, що перешкоджає пошаровому росту плівки та сприяє формуванню острівцевих пліткових систем. Одним із перспективних засобів розв'язання цих проблем є застосування методики «замороженої конденсації» та використання ультратонких підшарів поверхневоактивних речовин, які послаблюють коалесценцію. З іншого боку, актуальним є кількісний опис процесів електроперенесення, які можуть бути здійснені на основі сучасних квазікласичних та квантових моделей явищ перенесення заряду в металевих зразках обмежених розмірів. У рамках даних підходів стає можливим прогнозування електричних властивостей плівок металів різної товщини. Отримана внаслідок подібних досліджень інформація є необхідною для розуміння впливу розмірного ефекту на перебіг фізичних процесів у плівках металів і може бути використана для розробки методів формування тонкопліткових електричносуцільних металевих зразків із наперед заданою структурою та кінетичними коефіцієнтами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізичної та біомедичної електроніки в лабораторії фізичної електроніки НДЛ-12 Львівського національного університету імені Івана Франка за планом наукових держбюджетних тем.

До найбільш **важливих і нових результатів** отриманих в дисертаційній роботі можна віднести:

1. Вперше розроблено технологію формування електричносуцільних дрібнокристалічних плівок міді, золота марганцю та паладію, товщиною в декілька нанометрів з наперед заданою структурою і морфологією поверхні на основі сумісного використання методики “замороженої конденсації” та попереднього нанесення на поверхню аморфної діелектричної підкладки ультратонких підшарів поверхневоактивних речовин, що запобігають коалесценції металевих конденсатів.

2. Вперше розроблено методики приготування плівок металів із заданими середніми лінійними розмірами кристалітів, величина яких не залежить від товщини плівки металу.

3. Здійснено надійний кількісний опис розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів плівок з використанням сучасних квазікласичних та квантових теоретичних моделей кінетичних явищ у металевих зразках обмежених розмірів та визначено параметри перенесення заряду в плівках міді, золота, паладію та марганцю.

4. У результаті аналізу меж придатності сучасних теоретичних моделей розмірних явищ для кількісного опису залежностей кінетичних коефіцієнтів плівок металів вперше розроблено рекомендації по використанню створених методик формування плівок золота, міді, паладію та марганцю для виготовлення провідних покриттів із заданою структурою та відповідними величинами кінетичних коефіцієнтів.

**Достовірність та надійність** наукових результатів та висновків дисертації Бучковської М.Д. забезпечено використанням в процесі досліджень сучасного комплексу експериментальних методів, отриманням добре відтворюваних та систематизованих експериментальних даних, використанням сучасних пакетів комп'ютерних програм для їхньої обробки, а також залученням до інтерпретації отриманих результатів теоретичних підходів та положень. **Обґрунтованість** наукових висновків дисертації зумовлена коректністю поставлених задач, відповідністю розрахованих і експериментально виміряних параметрів, правильною інтерпретацією отриманих результатів, їхньої узгодженістю між собою та з літературними даними інших авторів.

Важливе **практичне значення** має одержана в результаті проведених досліджень інформація про вплив ультратонких поверхневоактивних підшарів на структуру та електрофізичні властивості плівок металів. Проведені комплексні експериментальні дослідження та теоретичний аналіз отриманих

даних дозволили виробити рекомендації для приготування полікристалічних металевих плівок із наперед заданими структурою та електричними властивостями. Основні результати дисертаційної роботи використано при постановці лабораторних практикумів до курсів «Технологія тонких плівок», «Фізика тонких плівок» та «Фізика розмірних явищ», які читаються студентам факультету електроніки ЛНУ ім. І. Франка. Наукові результати, отримані в процесі виконання дисертаційної роботи, можуть бути використані в сучасному матеріалознавстві, мікро-, наноелектроніці та інших галузях науки і техніки для виготовлення плівкових об'єктів придатних для використання в якості провідних елементів.

Значимість особистого внеску дисертанта полягає в самостійному пошуку, систематизації та аналізі літературних джерел за темою дисертації, розробці експериментальних методик, виборі технологічного обладнання для дослідження електропровідності тонких плівок та безпосередній участі у виконанні експериментальних досліджень їх структури та електричних властивостей, обробці експериментальних даних та їхній теоретичній інтерпретації, підготовці матеріалів до друку і формуванні висновків, поданих в дисертації та авторефераті.

Матеріали дисертаційної роботи викладено в 20 наукових публікаціях, у тому числі в 9 статтях, опублікованих у фахових наукових журналах (3 з них опубліковано у журналах, які внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз) та матеріалах 11 міжнародних конференцій.

Автореферат дисертації достатньо повною мірою відображає зміст опублікованих наукових праць. Зміст автореферату дає повну уяву про зміст дисертації. Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 182 найменувань. Повний обсяг дисертації складає 158 сторінок, 71 рисунок та 9 таблиць.

У **вступі** до дисертації обґрунтовано актуальність і доцільність проведеного дослідження, сформульовано мету та основні завдання дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих експериментальних результатів. Подано інформацію про публікації за матеріалами дисертації та апробацію результатів і висновків роботи. Обговорено структуру і обсяг дисертації.

В оглядовому розділі роботи здійснено короткий аналіз наукових робіт, пов'язаних з тематикою виконаного дослідження. Розглянуто особливості перенесення електричного заряду в гранульованих та електричносуцільних плівках металів та особливості переходу від активаційного до омичного

механізму провідності. Проаналізовано межі застосування сучасних квазікласичних та квантових теорій перенесення заряду в електричносуцільних плівках металів.

У **другому розділі** дисертаційної роботи наведено інформацію про об'єкти дослідження, методики препарування зразків, методи дослідження їхньої структури та електричних властивостей.

У **третьому розділі** роботи наведено результати дослідження впливу аморфних поверхневоактивних підшарів германію, кремнію або сурми різних масових товщин на структуру, морфологію поверхні та електричні властивості плівок металів. Згідно з наведеним літературним джерелом, вплив атомів поверхнево активних речовин на формування плівки у початковій фазі конденсації зводиться до створення ковалентного зв'язку з атомами металу і, таким чином, до запобігання коалесценції зародків металевої фази на поверхні підкладки. Особливістю формування плівки металу на поверхні підшару поверхнево активного матеріалу є поява у початковій фазі росту плівки дрібніших кристалітів, ніж у випадку конденсації металу на чистій підкладці. У результаті плівка на поверхні підшару стає суцільною при товщинах менших, ніж на чистій поверхні підкладки.

Лінійними розмірами кристалітів у плівках металів можна керувати вибором матеріалу поверхневоактивної речовини та зміною масової товщини підшару такої речовини. Абсолютні зміни величини  $D$  при використанні сурфактантних підшарів особливо значні при малих масових товщинах підшару, при більших товщинах підшарів цей вплив послаблюється.

Вплив сурфактантних підшарів на електропровідність плівок металів зводиться до зменшення товщини, при якій фіксується провідність у плівках, в порівнянні з аналогічною товщиною, отриманою для плівок, нанесених на чисту поверхню скла. Значення порогу протікання можна керувати змінювати не лише зміною масової товщини підшару, але і вибором матеріалу, який використовується у якості підкладки.

У **четвертому розділі** проведено аналіз розмірних залежностей питомого опору  $\rho$  (питомої провідності  $\sigma$ ) при різних температурах плівок Au, Cu, Pd та Mn, нанесених на чисте поліроване скло та скло, попередньо покрите підшарами поверхневоактивних речовин (Ge, Sb або Si). Структурні дослідження показали, що середні лінійні розміри кристалітів у плівках різної товщини, одержаних з використанням описаних експериментальних методик, не залежать від товщини плівки металу, що є важливим фактором для можливості використання квазікласичних теоретичних моделей для опису розмірних кінетичних явищ у плівках.

Використання підшару поверхневоактивної речовини дозволяє знизити мінімальну товщину, при якій плівка стає електричносуцільною. Зокрема для плівок відносно легкоплавких металів (мідь, золото) така можлива мінімальна товщина рівна 5-6 нм, а для термостабілізованих плівок марганцю та паладію – 3-4 нм.

Встановлено, що перенесення заряду в плівках, товщина яких перевищує 7-10 нм, надійно описується за допомогою моделей квазікласичного розмірного ефекту. Середні амплітуди макроскопічних неоднорідностей поверхні, визначені з розмірних залежностей провідності плівок за допомогою моделі Намба, добре узгоджуються з відповідними величинами, отриманими при СТМ дослідженні морфології поверхні тонких плівок металів. Показано, що для опису експериментальних розмірних залежностей провідності плівок металів у діапазоні товщин, що відповідають балістичному перенесенню заряду, слід використовувати теоретичні моделі квантового розмірного ефекту. Виявлено, що квантові теоретичні моделі, які нехтують можливістю релаксації носіїв струму в об'ємі ультратонкої плівки, непридатні для кількісного опису експериментальних розмірних залежностей в широкому діапазоні товщин.

В розділі обговорено принципи побудови підходу до створення технологій приготування дрібнокристалічних плівок металів з бажаними, на думку дисертанта, структурою, морфологією поверхні та передбачуваними параметрами перенесення заряду.

До змісту та оформлення дисертації Бучковської М.Д. є наступні **пропозиції та зауваження:**

1. В роботі слід було більш детально проаналізувати морфологію, структуру і електричні властивості сурфактантних підшарів Ge, Si та Sb .

2. Відсутні дослідження впливу швидкості нанесення на характер росту досліджуваних металічних плівок.

3. В плівках металів не виявлено домішкових та нерівноважних фаз. Яким чином можна пояснити появу темних ділянок на мікрофотографіях (рис.3.14 та рис.3.15)?

4. Чи існують підтвердження відсутності формування евтектики (напр. Au-Ge) у досліджуваних плівкових системах?

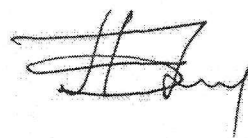
5. У роботі зустрічаються окремі стилістичні та граматичні помилки.

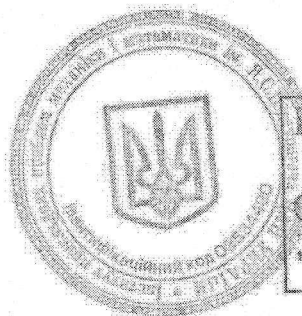
Згадані пропозиції та зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації та не піддають сумніву основні наукові результати, отримані автором, та їх практичне значення.

Тому, враховуючи високий науковий рівень дисертації, актуальність теми, її наукову та практичну цінності, вважаю, що дисертаційна робота Бучковської Марії Дмитрівни “Металічний характер провідності в післяперколяційній ділянці товщин ультратонких плівок металів з кубічною кристалічною ґраткою”, представленої на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.18 – фізика і хімія поверхні, відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України, викладеним в “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, що пред’являються до кандидатських дисертацій, а її автор Бучковська Марія Дмитрівна заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.18 – фізика і хімія поверхні.

#### Офіційний опонент

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
завідувач відділу фізико-математичного  
моделювання низьковимірних систем  
Інституту прикладних проблем механіки  
і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

 Д.І. Попович



Підпис	Поповича Д. І.	
засвідчую	Гур -	
Ст. інсп. ВК	4	10 2015 р.

Дніпропетровський національний університет ім. Василя Стефаника
ПОР № 03.02-11/406
12 10 2015 р.