

ВІДГУК

офіційного опонента про дисертаційну роботу
Бігуна Романа Івановича

«Електронні явища перенесення заряду в нанорозмірних металевих двокомпонентних плівкових системах»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.18 - фізика і хімія поверхні

Актуальність теми.

Робота Бігуна Р.І. спрямована на розв'язання важливої науково-практичної проблеми, пов'язаної з подальшим розвитком мікро- та наноелектроніки. Справа в тому, що плівки металів товщиною в декілька нанометрів розглядають як перспективні омичні провідники з високим ступенем прозорості для електромагнітного випромінювання у видимій та інфрачервоній ділянках спектру в пристроях мікро- та наноелектроніки. В той же час для сучасних тонкоплівкових технологій основним завданням стає розробка методів приготування ультратонких шарів матеріалів з прогнозованою структурою та передбачуваними фізичними властивостями. Здобувач ставив за мету саме розробку методик контрольованого приготування плівок простих та перехідних металів із заданою структурою та з керованими середніми лінійними розмірами кристалітів, з керованою морфологією поверхні, передбачуваними електричними та оптичними властивостями. Для цього використовує методику “замороженої конденсації” поверхневоактивних слабопровідних шарів (Ge, Sb, Si), які послаблюють вплив явища коалесценції зародків кристалізації металевої фази, та створюють можливість для термостабілізації в межах першої температурної зони моделі температурних зон Мовчана-Демчишина. Цей сучасний підхід продиктований як природним ходом розвитку фізики твердого тіла, фізики поверхні, так і потребами інженерної практики. Слід зазначити, що методика препарування плівок у надвисокому вакуумі шляхом осадження пари термічно випарованого металу на охолоджену підкладку забезпечує високу контрольованість процесу формування плівок на поверхні діелектричних та слабопровідних підкладок та найвищу чистоту отриманих плівкових зразків. Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки методів керованого формування шарів важкоплавких металів (зокрема, Ta, Re, Hf та інших), перспективних для використання в сучасних галузях мікро- та наноелектронній техніці. В роботі має місце тісне поєднання розв'язання чисто

наукових задач із дійсно прикладними проблемами. В такому плані сама робота та розроблені в ній методики, а також результати є дійсно проявленням однієї з актуальних проблем прикладної фізики твердого тіла та фізики і хімії поверхні.

Актуальність теми роботи підтверджується ще й тим, що вона пов'язана з виконанням наукових досліджень, виконаних у Львівському національному університеті імені Івана Франка за планом наукових держбюджетних тем: СБ-75Ф "Електронні явища в тонких шарах нанометрової та субмікронної товщини" (2007-2009, держреєстрація №0107U002049), СБ-27Ф "Квантові розмірні ефекти в електронних властивостях тонких металевих плівок та адсорбційні явища на поверхні оксидних напівпровідників" (2010-2012, держреєстрація №0109U002080), СБ-125Ф "Квантові і класичні розмірні ефекти в явищах перенесення заряду в нанорозмірних одно- та двошарових системах" (2013-2014, держреєстрація №0112U001290), СБ-18ФК "Структура та електронні явища перенесення заряду у двокомпонентних плівкових системах в режимі квантового та квазікласичного розмірного ефекту" (2015-2017, держреєстрація №0112U001290), "Формування заданої структури нанометрових металевих конденсатів та електронні кінетичні явища в них" (2018-2020, держреєстрація №0118U000600).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в роботі Бігуна Р.І., є високою та базується на ґрунтовному аналізі літературних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних методів дослідження, зіставленні та критичному аналізі отриманих результатів при порівнянні з результатами інших дослідників, і якісному формулюванні висновків. Теоретичні дослідження проведені з використанням сучасного математичного апарату та поєднані з новітніми поглядами теорій класичного та квантового розмірних ефектів при описі явищ перенесення заряду в нанорозмірних електричносуцільних плівках металів.

Опонована робота є закінченою, цілісною, фундаментальною працею, що являє добротний всеохоплюючий огляд літератури (від синтезу до впровадження)

поєднаний з оригінальними розробками, та таку, яку за бажанням можна було би представити як корисну монографію цінну як в фундаментальному, так і прикладному аспекті. Згідно з викладеним вище обґрунтованість наукових положень, висновки результатів дослідження та рекомендації, що сформульовані в дисертації, не підлягають сумніву.

Достовірність результатів досліджень.

При виконанні поставленої мети досліджень було коректно використано комплекс сучасних експериментальних методів дослідження структури, електрофізичних та оптичних властивостей нанорозмірних плівок металів. Результати структурних досліджень плівок доповнюються та підтверджуються даними розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів досліджуваних плівок металів. Дані просвітлюючої електронної мікроскопії співпадають з результатами прогнозу розмірних залежностей опору плівки металу з допомогою перколяційної моделі. Застосування комплексу незалежних експериментальних та аналітичних методів, які взаємно доповнюють одне одного, забезпечило достовірність отриманих результатів.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

- Вперше здійснено керований процес приготування плівок металів із заданими середніми лінійними розмірами зерен, завдяки використанню методики замороженої конденсації та поверхневоактивних підшарів слабопровідних речовин, які перешкоджають коалесценції зародків кристалізації металу, зроблено розумний вибір режиму температурної стабілізації при температурах, близьких до верхньої межі першої температурної зони Мовчана-Демчишина.

- Вперше створено методику формування металевих конденсатів із заданими середніми лінійними розмірами кристалітів D , величина яких не залежить від товщини плівки металу d .

- Вперше здійснено комплексне низькотемпературне дослідження (діапазон температур 78-90 К) розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів (питомий електричний опір ρ , температурний коефіцієнт опору β та абсолютна диференціальна

термо-е.р.с. S) для ультратонких електричносуцільних плівок Cu і Au при масовій товщині плівок від 5-6 нм та для плівок Ni і Pd масової товщини від 3-4 нм.

- При аналізі розмірних залежностей питомого опору $\rho(d)$ та абсолютної диференціальної термо-е.р.с. $S(d)$ плівок показано, що в ультратонких електричносуцільних плівках Cu і Au формування електронної структури, яка аналогічна електронній будові масивного металу, завершується при товщині плівки біля 5 нм.

- У результаті проведеного вперше дослідження розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів σ і S електричносуцільних ультратонких плівок Ni і Pd встановлено, що при товщині плівок, більше за 4-5 нм, електронна будова шарів ідентична електронній структурі масивних зразків цих металів, що відповідає завершенню формування $s - i d$ - зон у плівках цих металів.

- Вперше розмірні залежності динамічного питомого опору тонких плівок металів описано на основі моделі внутрішнього розмірного ефекту з допомогою теорії Тельє-Тоссе-Пішара. З аналізу спектральних залежностей коефіцієнтів міжзеренного тунелювання та розсіювання носіїв струму, показано, що для спектрального діапазону довжин хвиль 1000-2500 нм дані параметри проявляють слабку спектральну залежність, а їхні значення задаються лише фізичною природою матеріалу та середніми лінійними розмірами кристалітів плівки металу.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в створенні фізичних основ цілеспрямованого формування структури, електрофізичних та оптичних властивостей електричносуцільних нанорозмірних плівок благородних та перехідних металів. Отримані критерії, експериментальні та теоретичні підходи можуть бути використані:

- для розробки технології формування електричносуцільних важкоплавких металевих конденсатів (Ta, Re, Hf, W та інших);

- розроблена модель балістичного перенесення заряду в однорідному металевому шарі з випадково шорсткими поверхнями, спільно з теорією

полікристалічного шару неоднорідної товщини при використанні дозволяє реалізувати надійний кількісний опис розмірних залежностей питомої провідності плівок металів в широкому діапазоні товщин ($2d_c \leq d \leq 100$ нм).

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 71 науковій праці, у тому числі у 38 публікаціях у наукових фахових виданнях України та інших країн. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробація матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам ДАК МОН України.

Автореферат є ідентичним за змістом з основними положеннями дисертації і достатньо повно відображає основні її наукові результати, що отримані здобувачем.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. В літературному огляді автор аналізує можливі режими росту кристалітів при формуванні суцільної плівки металу, зокрема Фольмера-Вебера, Странського-Крастанова та Франка-ван дер Мерве, а також вплив режиму формування плівки на її провідність стосовно товщини переходу від діелектрика до металу в рамках теорії перколяції (2D та 3D режими росту). Питання, а чи можна на основі аналізу величин критичного показника перколяції γ та товщини перколяції d_c пояснити закономірності впливу сурфактантних підшарів на режим формування та росту плівки металу?

2. В методиці експерименту коротко описана технологія формування плівок з вуглецю в якості аморфних підшарів товщиною 15-20 нм для дослідження структури нанорозмірних плівок металів в присутності платини, яка дозволила понизити температуру напилення вуглецю до температури топлення платини та покращити якість отриманих зразків. Не зовсім зрозуміло на підставі яких експериментальних міркувань автор робить наступні висновки?

3. В роботі на основі узагальнення сукупності експериментальних даних дослідження структури та морфології поверхні плівок металів та значень

розрахованих за моделями Намба та Віссмана стверджується, що середня амплітуда поверхневих неоднорідностей h на поверхні плівки не залежить від товщини плівки, а її величина близька до половини середніх лінійних розмірів кристалітів у площині підкладки $h \approx D/2$. Яка модель росту може пояснити спостережувану кореляцію?

4. При аналізі розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів досліджуваних плівок металів в наближенні плоскопаралельного шару з допомогою моделей внутрішнього розмірного ефектів (Маядаса-Шацкеса та Тельє-Тосе-Пішар) робиться висновок, що масова товщина поверхневоактивних підшарів (Ge, Si чи Sb) не впливає на коефіцієнти міжзеренного тунелювання t . На фоні зміни середніх лінійних розмірів кристалітів в плівках металів при зміні масової товщини підшару поверхневоактивних речовин, отриманий висновок не є очевидним.

5. У п'ятому розділі при аналізі впливу розмірного ефекту на енергетичну структуру плоскопаралельної плівки металу з допомогою моделі частинки в одновірній потенціальній ямі зроблено припущення, що значення хвильового вектора електрона $k_F^2 = k_x^2 + k_y^2$ в площині XOY є незалежним від товщини плівки металу і чисельно рівним значенню величині хвильового вектора електрона масивного зразка ("адиабатне наближення"). Наскільки використання цього підходу коректне при описі нанорозмірних плівок металів?

6. У шостому розділі роботи обговорюється використання наближення ефективного середовища, запропонованого Ландауером при описі оптичних властивостей диспергованих плівок металів в рамках перколяційної моделі. Оскільки даний підхід припускає, що диспергована плівка металу проявляє властивості системи плоскопаралельного шару металу. Вважаю, що використання цього наближення є достатньо грубим при описі властивостей нанорозмірних диспергованих систем.

Загальне зауваження щодо оформлення: у роботі зустрічаються складним чином побудовані речення, через що після однократного прочитання їх сенс важко зрозуміти, крім того іноді зустрічаються окремі граматичні описки та русизми.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Робота Бігуна Романа Івановича «Електронні явища перенесення заряду в нанорозмірних металевих двокомпонентних плівкових системах» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 01.04.18 – фізика і хімія поверхні. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову проблему, суть якої полягає у створенні фізичних засад цілеспрямованого формування нанорозмірних плівок металів з контрольованими електрофізичними та оптичними властивостями. Дисертаційна робота відповідає вимогам п. п. 9, 10, 12 “Порядку присудження наукових ступенів”, щодо докторських дисертацій, а здобувач Бігун Роман Іванович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико - математичних наук за спеціальністю 01.04.18 – фізика і хімія поверхні.

Офіційний опонент

завідувач кафедри фізики металів та напівпровідників

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

доктор фізико-математичних наук, професор

Малихін С.В.

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

ЗАСВІДЧУЮ

вчений секретар Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

Заковоротний О.Ю.



22.02.18

