

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Петрушенка Сергія Івановича

«Фазові перетворення та температурна еволюція морфологічної будови багатошарових плівок, які складаються з шарів легкоплавких металів (Pb, Bi, Sn або In) та більш тугоплавких речовин (С, Мо або Cu)», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

1 Актуальність та практичне значення роботи

Перспективи подальшого розвитку різноманітних електронних пристроїв значним чином базуються на продовженні мініатюризації функціональних елементів. Проте прогрес у цій сфері неможливий без досконалого розуміння процесів і явищ, що відбуваються в диспергованих зразках. Зокрема важливу роль у технологічних застосуваннях мають питання термічної стабільності шарів, взаємної розчинності компонентів та температурних меж існування метастабільних фаз, які спостерігаються у тонкоплівкових системах. Проведення досліджень у цій сфері виглядає досить важливим для прогнозування та збільшення терміну служби електронних приладів, розробки новітніх систем, дія яких базується на колективній взаємодії у нанорозмірних масивах, а також для створення різноманітних ключів, елементів пам'яті, датчиків та перемикачів, робота яких ґрунтується на гістерезисних явищах, обумовлених формуванням у системах метастабільних фаз.

Проте, незважаючи на актуальність, зазначені питання недостатньо висвітлені в літературних джерелах. Зокрема слабовивченими залишаються питання впливу попереднього відпалу та наявності сторонньої рідкої фази на температурну стабільність полікристалічних металевих шарів. Також недостатньо дослідженим, особливо у випадку багатошарових плівок, виглядає проблема переохолодження при кристалізації розплаву. Зазначимо, що шаруваті структури, у яких шари легкоплавких речовин розміщені між більш тугоплавкими шарами, розглядаються як ефективна модель композитної системи «частинка в матриці». Дослідження переохолодження у таких системах дозволяє отримати важливу наукову інформацію про явища, які відбуваються на інтерфейсі тверде тіло переохолоджений розплав. Зважаючи на вищевикладене, тема дисертаційної роботи, яка присвячена дослідженню морфологічних змін, що відбуваються у плівкових системах під

дією температури, а також визначенню температурних інтервалів стабілізації переохолодженої рідкої фази у шаруватих структурах є актуальною.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій

У дисертації було визначено температурні границі стабілізації переохолодженої рідкої фази легкоплавкого компонента у шаруватих плівкових системах. Встановлені важливі закономірності термічного диспергування одно- і двокомпонентних плівок та впливу на ці процеси попереднього відпалу або наявності другого компоненту. Дослідження проведені з використанням як класичних, так і оригінальних методів, які доповнюють один одного. Вибір експериментальних методик та підходів (вакуумна конденсація зразків, *in situ* резистометрія, просвітлювальна та растрова електронна мікроскопія, *in situ* електронографія,) виглядає вдалим, коректним та необхідним для виконання запланованих досліджень. Мета дисертаційної роботи повністю досягнута.

3. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати роботи повно викладені в 10-ти статтях та 14 тезах доповідей на Міжнародних та вітчизняних конференціях. 8 наукових праць проіндексовано міжнародною наукометричною базою Scopus.

4. Достовірність та новизна отриманих результатів

Достовірність наведених в дисертації результатів обумовлена використанням взаємодоповнюючих підходів, серед яких є як оригінальні, так і класичні методики. Робота має логічну побудову, поставлені комплексні задачі розв'язуються сучасними експериментальними методами досліджень. Це дало можливість автору отримати ряд наукових результатів із високим ступенем новизни та функціонального характеру. Безсумнівно цьому сприяв високий рівень експериментальної підготовки дисертанта, що типове для наукової школи проф. Гладких М.Т.

У роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Вперше з використанням незалежних *in situ* методик визначено температури максимального переохолодження при кристалізації шарів рідкої фази легкоплавких металів Pb, Bi, Sn і In, що знаходиться між шарами тугоплавких матеріалів С, Мо або Cu. Підтверджено зв'язок стрибків

електричного опору багат шарових плівок із фазовими переходами, які відбуваються у вказаних системах.

2. Вперше показано, що морфологія включень Ві у багат шарових плівках Cu/Vi/Cu і Mo/Vi/Mo впливає на температуру і характер його кристалізації. Так, у тому випадку, коли вісмут у зразку міститься у вигляді єдиної системи включень, його кристалізація носить лавиноподібний характер і відбувається при температурі, близькій до 200°C. У той же час кристалізація вісмуту, який міститься у зразку у вигляді окремих розрізнених частинок, відбувається в деякому інтервалі температур і завершується при 150°C та 90°C для плівок Cu/Vi/Cu і Mo/Vi/Mo відповідно.

3. Зміна електричного опору багат шарових плівок при фазовому переході легкоплавкого компонента пов'язана зі стрибком питомого електричного опору (Cu/Pb/Cu, Cu/In/Cu, Cu/Sn/Cu, Mo/In/Mo, Mo/Sn, Mo/Pb/Mo), механічними напруженнями в зразках (Cu/Vi/Cu, Mo/Vi/Mo) і контактними ефектами (C/Vi/C, C/Sn/C, C/Pb/C) на межі поділу розплав шар аморфного вуглецю.

4. Показано, що максимальна температура збереження електричної суцільності полікристалічних плівок міді збільшується в разі їх попереднього відпалювання. Так, відпал плівок міді товщиною 50 нм протягом 2 годин при температурі 150°C збільшує температуру їх переходу в кристалічний стан на 120 К.

5. Вперше встановлено, що плівки Pb/Cu, товщина яких становить близько 50 нм, на аморфній підкладці незалежно від кінетики нагрівання розпадаються на окремі острівці при температурі плавлення свинцю вже тоді, коли його вміст перевищує 3 мас. %.

6. Визначено енергію активації термічного диспергування плівок Cu і Pb/Cu і показано, що утворення в плівках рідкого свинцю приводить до зниження її значення.

7. Виявлено істотне збільшення розчинності міді в кристалічних свинцю та вісмуті у високодисперсних плівках Pb/Cu і Vi/Cu порівняно з масивними зразками. Для конденсованих плівок Pb/Cu вперше отримана температурна залежність розчинності атомів міді у решітці свинцю.

5. Наукове та практичне значення результатів дисертації

Результати дисертаційної роботи С.І. Петрушенка можуть сприяти подальшому розумінню процесів кристалізації переохолоджених розплавів та

для вивчення особливостей перебігу фізичних явищ, що обумовленні взаємодією на інтерфейсі кристал метастабільний розплав. З прикладної точки зору отримані наукові дані та розширення інтервалів виглядають перспективними для розробки нових методів формування наномасивів та збільшення термічної стабільності різноманітних плівкових структур.

6. Зауваження до роботи

При ознайомленні із дисертаційною роботою Петрушенка С.І. практично не виникло зауважень щодо її основних наукових та практичних результатів. Зауваження пов'язані із термінологічною неясністю позначень; оформленням роботи; деякі зауваження носять рекомендаційний характер.

1. Електричний струм, що використовується для вимірювання електричного опору шаруватих систем, здатний викликати нагрівання зразка. Це може змінювати умови плавлення та кристалізації у шаруватих плівках. Проте зазначене питання ніяк не обговорюється.

2. У підпису до Рис. 3.4. неправильно вказаний порядок компонентів двошарових плівок: замість Cu/Vi треба Vi/Cu, (тобто необхідно вказувати який шар знаходиться на підкладці (наприклад, Vi/Cu/p)). На сторінці 62 третій рядок знизу замість Cu-Sn, що позначає сплав, треба писати Sn/Cu, що використовується для позначення шаруватих систем.

3. У тексті дисертації стверджується, що перше нагрівання як одношарових плівок міді або молибдену, так і шаруватих структур супроводжується незворотнім зниженням їх електричного опору. Це твердження було б доцільно проілюструвати відповідними експериментальними графіками.

4. Результати, що стосуються впливу рідкої фази свинцю на термічну стабільність шарів міді є досить цікавими. Було б доцільним їх доповнення дослідженнями, виконаними з використанням *in situ* електронно-мікроскопічних методик.

5. Міркування, запропоновані автором для пояснення лавиноподібної кристалізації вісмуту, базуються на домішках, проте не обговорюється можлива роль полікристалічної матриці у цьому процесі.

6. Очевидно, що результат функціонального характеру стосовно температурної залежності розчинності атомів Cu в решітці свинцю, необхідно було б підтвердити прямими методами дослідження (енерго-дисперсійна спектроскопія, оже-електрона спектроскопія і т.н.)

7. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Результати наукових досліджень, що склали основний зміст дисертації Петрушенка Сергія Івановича представлені в роботі зрозуміло і чітко. Дисертація викладена з використанням академічного стилю і якісно оформлена. Це свідчить про професіоналізм автора. Основні результати опубліковані у 10 статтях, та представлені у вигляді 14 тез доповідей на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. Вісім наукових праць проіндексовані науково-метричною базою Scopus. Загальна кількість наукових праць, в яких викладено основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи, відповідає вимогам, що висуваються до робіт, які подаються на захист наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук. У авторефераті дисертації у повній мірі відображено основний зміст дисертації, її актуальність і мету, новизну одержаних результатів та особистий внесок здобувача.

Вважаю, що дисертаційна робота Петрушенка С.І. виконана на високому науковому рівні. Вона є закінченим науковим дослідженням у якому розв'язане важливе наукове завдання, яке полягає у визначенні границь стабільності рідкої фази в багатошарових плівкових системах а також встановлення фізичної суті впливу наявності рідкої фази і кінетики нагрівання на температурну стабільність тонкоплівкових покриттів Cu та Pb/Cu і на розвиток дифузійних процесів у шаруватих плівкових системах.

Дисертаційна робота «Фазові перетворення та температурна еволюція морфологічної будови багатошарових плівок, які складаються з шарів легкоплавких металів (Pb, Bi, Sn або In) та більш тугоплавких речовин (C, Mo або Cu)» повністю задовольняє всім вимогам, що встановлені «Порядком присудження наукових ступенів» (Постанова Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року) до кандидатських дисертацій, а її автор Петрушенко Сергій Іванович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Офіційний опонент
Декан факультету ЕЛІТ
Сумського державного університету,
д.ф.-м.н., професор
24.09.2018р.

С.І. Проценко

