

## Відгук

### **офіційного опонента на дисертацію Шпетного Ігоря Олександровича «Вплив структурно-фазового стану на магнітні, магніторезистивні, магнітооптичні та електрофізичні властивості гетерогенних наноструктурованих плівкових систем», поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.11 – магнетизм**

Мета дисертаційної роботи полягає у визначенні закономірностей впливу товщини зразків, концентрації компонентів, елементного складу, умов відпалювання на структурно-фазовий стан і магнітні, магнітооптичні, магнітотранспортні та електрофізичні властивості магнітних плівкових сплавів та багатошарових нанорозмірних систем на основі 3d – перехідних металів.

Тема досліджень **актуальна**, має великий науковий та практичний інтерес.

В дисертації вивчаються магнітні, магніторезистивні, магнітооптичні, електрофізичні властивості плівкових магнітних сплавів (товщиною  $d = 20 - 85$  нм) та багатошарових плівок з магнітних та немагнітних металів для з'ясування розмірного ефекту, залежності від концентрації, від товщини, температури та структури. Також вивчається ефект впливу магнітного поля на морфологію поверхні плівкових систем.

В дисертаційному дослідженні серед основних задач є розробка методики отримання зразків плівкових сплавів методом одночасного випаровування з декількох мішеней, методика отримання багатошарових магнітних плівкових систем; розробка методики проведення комплексних досліджень магнітних, магнітооптичних, магнітотранспортних, електрофізичних властивостей магнітних плівкових сплавів та багатошарових плівок в умовах дії розмірного, температурного та концентраційного ефектів. Такі системи є важливими для спінтроніки, наноелектроніки, для створення сенсорів для технічних і біомедичних застосувань.

Перелічені вище фізичні властивості плівок, які досліджувалися в дисертації, залежать не тільки від структурно-фазового складу. Значною є роль методик отримання зразків, які впливають на структурно-фазовий склад і фізичні властивості зразків. Це потребує великої уваги щодо підготовки зразків, контролю в процесі їх вирощування та характеристики зразків після їх вирощування. В дисертації використані сучасні методи отримання зразків, їх контролю та характеристики з використанням сучасного обладнання.

У першому розділі зроблено ґрунтовний огляд по проблемі дисертаційного дослідження. У другому розділі описані використані під час досліджень експериментальні

методики, зокрема просвітлювальна та растрова електронна мікроскопія з можливістю проведення елементного аналізу, вібраційна та надпровідна квантова магнітометрія, рентгеноспектральний аналіз, високоточна резистометрія, атомно-силова мікроскопія, вторинно-іонна мас-спектрометрія. Застосування сучасних приладів, таких як PPMS Model 6000 (фірми Quantum Design) дозволило провести дослідження магніторезистивних властивостей у магнітних полях з високою напруженістю до  $H = 90$  кЕ у температурному інтервалі від 5 до 380 К.

В дисертаційному проведені дослідження і отримані з моєї точки зору нові і нетривіальні результати. В третьому розділі досліджено наногранулярні плівки на основі нерозчинних один в одному металах Co і Ag розчинних металах Cu і Co та пермалою з Cu чи Ag, які при їх малій товщині фактично перетворюються у 2D системи.

- Показано, що поріг перколяції плівок залежить від товщини плівки. Дані намагнічування показують, що анізотропія форми плівки Co - Ag починає проявлятися після концентрацій 0.4, а перпендикулярне поле насичення у плівки з концентрацією 0.8 менше, чим у плівки з концентрацією 0.7. Магнітоопір цих плівок залежить від концентрації і температури.

- Отримано, що у плівок Co-Cu відпал призводить до укрупнення розмірів наночастинок включення та до більшого розкиду розмірів частинок, виникненню гістерезису в магнітопорі. Отримано, що при концентрації 0.37 у плівки з товщиною 20 нм в процесі намагнічування спостерігається позитивний магнітоопір. Для всіх відпалених зразків виявлено прояв анізотропії форми.

- Отримано, що у частинок пермалою в міді чи в сріблі ґратка кубічна. Анізотропія форми для невідпалених зразків товщиною 40 нм проявляється починаючи з концентрацій 0.5 вмісту пермалою в міді та при 0.4 вмісту пермалою в сріблі, а для відпалених починаючи з концентрації 0.2 пермалою в міді та з концентрації 0.3 пермалою в сріблі, причому невідпалена плівка пермалою в сріблі майже магнітом'яка. Магнітоопір тонкої плівки пермалою в міді мало змінюється після відпалу, і величина магнітоопору цих плівок зростає при збільшенні їх товщини плівки. Відпал тонкої плівки пермалою в сріблі призводив до утворення анізотропного магнітоопору, який при високих концентраціях майже не залежить від відпалу.

В четвертому розділі досліджено наногранулярні плівки з наночастинками ферум-платина, які мають оболонку з ферімагнітного оксиду заліза  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (маггеміт), та досліджувалися нанорозмірні плівки з трьома шарами.

- Отримано, що петлі гістерезису магнітооптичного ефекту Кера плівки з наночастинками ферум-платина з оболонкою з  $\gamma$ - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , мають зміщення. Після відпалу петля гістерезису ставала майже прямокутною.

- Показано, що за наявного верхнього шару Cr та Al гістерезис тришарових плівок Cr/Ni80Fe20, Al/Ni80Fe20, Cr/Ge/Ni80Fe20 і Al/Ge/Ni80Fe20 стає чутливим до товщини верхнього шару.

В п'ятому розділі досліджено магнітні властивості тришарових структур Fe/Gd/Fe та Co/Gd/Co зі змінною товщиною шару, коли шар тонкий, то Gd перебуває в аморфному стані, а при збільшенні товщини в полікристалічному.

- Отримано, що коерцитивна сила у плівок Fe/Gd/Fe зростає при збільшенні товщини шару гадолінію, чи при збільшенні температури відпалу.

- Показано, що у плівки Co/Gd/Co у невідпаленому стані і після відпалювання в залежності від товщини шару Gd проявляється осциляційний характер залежності коерцитивної сили  $H_c$  та магнітопору, а кутова залежність коерцитивного поля веде себе стандартно.

У шостому розділі досліджено вплив магнітного поля на структуру поверхні наногранульованої плівки Co – Ag з концентрацією кобальта 0.39, товщина якої 35 нм та плівки Ni і Ag з концентрацією нікеля 0.5. Аналізувався вплив магнітного поля на структурні характеристики поверхні плівки, а саме висота найвищого піку  $h_{\text{max}}$ , глибина найглибшої впадини  $h_{\text{min}}$ , середньоарифметична  $R_a$  і середньоквадратична  $R_q$  шорсткості поверхні та структурна ентропія S.

- Показано, що магнітне поле має вплив на поверхню, причому найсуттєвішим є вплив при першому намагнічуванні.

- Отримано, що у плівки Ni - Ag магнітне поле робить анізотропним розподіл поверхневої неоднорідності та під дією поля змінюється площа поверхні.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням під час проведення експериментів сучасного наукового обладнання відомих фірм та з застосуванням сучасних методик обробки експериментальних даних. Обґрунтованість результатів досліджень забезпечується контролем за виготовленням зразків, їх належною характеристикою після вирощування, порівнянням результатів експериментів і їх узгодженістю при застосування різних експериментальних методик, проведенням теоретичних оцінок і розрахунків.

У сукупності отримані в дисертаційному дослідженні наукові результати визначають напрямки створення новітніх наносистем для практичних застосувань, мають новизну та методологічну цінність.

#### Зауваження до дисертаційної роботи

Дисертація виконана на високому науковому рівні, проте має недоліки:

1. Не описано перемагнічування через формування неоднорідного стану в магнітному полі, яке температурозалежне і призводить до зменшення коерцитивного поля.
2. Слід зауважити, що об'єм наночастинок пропорційний кубу діаметра, тому розкид їх розмірів у декілька разів може дати різницю на один, два порядки при порівнянні магнітних моментів частинок, а отже їх роль навіть при незначній кількості великих частинок може стати визначальною, наприклад при визначенні величини коерцитивної сили.
3. В досліджуваних зразках частинки кобальту мають гексагональна структуру. Яка величина поля магнітної анізотропії частинок? Чи робилися оцінки впливу несферичності форми наночастинок на їх коерцитивність?
4. Написано: «Такі плівки зазвичай магнітно-ізотропні, тобто, петлі гістерезису, виміряні у геометріях, коли магнітне поле прикладене у площині плівки та перпендикулярно до площини плівки, співпадають.». Це може виконуватися тільки за умови дуже низьких концентрацій гранул. Завдяки яким чинникам така ізотропність може спостерігатися для плівок з великою концентрацією наночастинок.
5. При вирощуванні наногранулярних плівок промені потоку іонів направлені під кутом до нормалі плівки, чи здійснювався контроль ізотропності магнітних властивостей гранулярних плівок в їх площині?
6. В деяких випадках при аналізі магнітних даних по за увагою залишилися обмінні взаємодії між гранулами.
7. В формулі (1.1) не описано параметр  $M_R$ .
8. На рис. 1.24 підпис на осі позначено як намагніченість?
9. Написано: «Дуже значний вклад у дослідження гранульованого стану плівкових систем вносить методика вимірювання ZFC-FC [91, 119, 125, 187-195]. Дана методика полягає у дослідженні температурних залежностей зразка у слабкому магнітному полі при його нагріванні з двох різних вихідних станів.», що є некоректно. (стор.75).
10. Рис. 1.38 підпис до графіка містить одиниці нм, а цифр на шкалі нема.

11. У формулі Шенонна не позначено, ймовірності чого (якої події, чи стану) позначено літерами I.

Наведені зауваження, однак, не ставлять під сумнів наукову новизну та достовірність основних результатів дисертаційної роботи. Дисертація Шпетного І.О. є завершеною кваліфікаційною науковою роботою, в якій отримані нові науково - обгрунтовані експериментальні результати, що дозволяють вирішити питання, пов'язані з процесами формування магнітонеоднорідних функціональних матеріалів та взаємозв'язком їх структурно-фазового стану з магнітними і магніторезистивними властивостями.

Результати наукових досліджень автора повністю висвітлені у наукових роботах та опубліковані в журналах з високим імпаکت-фактором та пройшли апробацію на конференціях. Автореферат відображає зміст дисертаційної роботи.

Таким чином, за актуальністю тематики, новизною отриманих результатів, їх обсягом, достовірністю та обгрунтованістю, науковим і практичним значенням розглянута дисертаційна робота «Вплив структурно-фазового стану на магнітні, магніторезистивні, магнітооптичні та електрофізичні властивості гетерогенних наноструктурованих плівкових систем» відповідає вимогам, які висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук згідно «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами) та Наказу МОН України «Про опублікування результатів дисертації на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук» від 23.09.2019 р. №1220, а її автор Шпетний Ігор Олександрович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм.

Офіційний опонент, професор кафедри  
загальної та теоретичної фізики  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»,  
доктор фізико-математичних наук, професор

В.М. Калита

Підпис проф. В.М. Калита засвідчую  
декан фізико-математичного факультету,  
КПІ ім. Ігоря Сікорського



Володимир ВАНІН