

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Логвинова Андрія Миколайовича
«Фізичні властивості плівкових приладових структур на основі Ru і Co»
поданої на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

1. Актуальність та практичне значення роботи

Дисертаційна робота А. М. Логвинова присвячена комплексному дослідженню фізичних властивостей приладових структур сформованих на основі тонких плівок Ru(Cu) і Co, а також взаємозв'язку особливостей структурно-фазового стану та розмірних ефектів в електрофізичних та магніторезистивних властивостях як одношарових плівок Ru та Co, так і плівкових систем на їх основі.

Для встановлення відповідностей між структурно-фазовим станом, розмірними ефектами та фізичними процесами в плівкових системах на основі Co і Ru(Cu) дисертантом були проведені комплексні дослідження електрофізичних та магніторезистивних властивостей з урахуванням методів отримання, умов конденсації зразків та режимів їх термообробки.

Особливий науковий інтерес виникає до застосування мультишарів типу $[Ru/Co]_n$ або $[Cu/Co]_n$, оскільки в них спостерігаються відносно великі величини магнітоопору (МО) у порівнянні з іншими металевими наноструктурами. В сучасному приладобудуванні одним із можливих варіантів плівкових структур, які мають стабільні магніторезистивні характеристики, є псевдо-спін-вентилі, які складаються з двох магнітних шарів різної коерцитивності розділених немагнітним прошарком Ru(Cu).

Вище зазначене вказує на доцільність комплексного дослідження особливостей кристалічної структури, фазового складу, розмірної та температурної залежностей електрофізичних, магніторезистивних властивостей



функціональних плівкових приладових систем на основі магнітної складової Co та немагнітних Ru(Cu).

2. Загальна характеристика роботи

За своєю структурою дисертаційна робота складається із п'яти розділів.

У **першому розділі** наведений огляд літературних даних щодо накопичених результатів дослідження електрофізичних властивостей, особливостей формування та структурно-фазового стану тонких плівок Ru, та магніторезистивних властивостей плівкових структур на його основі. Також висвітлене питання стосовно застосування нанорозмірних плівок Ru в різних галузях електроніки.

Враховуючи новизну і складність поставлених задач, особливу увагу дисертант приділив проведенню досліджень з використанням сучасного наукоємного обладнання, висвітленню експериментальних методик і методів розрахунків, описаних у **другому розділі** дисертаційної роботи «Методика і техніка експерименту». Здобувачем досконало описані методи отримання та дослідження електрофізичних і магніторезистивних властивостей тонких плівок, а також їх структурно-фазового стану, морфології поверхні та дифузійних процесів на межі поділу шарів.

У **третьому розділі** «Структурно-фазовий стан та електрофізичні властивості одношарових плівок Ru» дисертантом наведені результати експериментальних досліджень структурно-фазового стану тонких плівок Ru у поєднанні з дослідженнями їх електрофізичних властивостей у діапазоні температур $(3 \div 9) \cdot 10^2$ К.

У **четвертому розділі** «Структурно-фазовий стан, дифузійні процеси та електрофізичні властивості плівкових систем на основі Co і Ru» наведені результати експериментальних досліджень структурно-фазового стану плівкових систем сформованих на основі Co і Ru у поєднанні з дослідженнями їх електрофізичних властивостей у діапазоні температур $(3 \div 9) \cdot 10^2$ К.

П'ятий розділ «Магніторезистивні властивості одно - та багатошарових плівкових систем на основі Co і Ru(Cu)» присвячений дослідженням польових залежностей магнітоопору плівкових систем сформованих на основі Co і Ru(Cu). Дисертантом доведено, що плівкову систему спін-вентильного типу Co(5)/Cu(x)/Co(20)/П доцільно модифікувати використовуючи замість одного з магнітних шарів Co мультишар [Co/Cu]_n. Дана модифікація призводить до підвищення значень величини МО на (0,3 ÷ 0,5)%, та підвищення швидкості перемикання з одного магнітного стану в інший. Структури з найбільшими значеннями магнітної чутливості, можуть бути використані в схемах як аналогового так і цифрового походження для швидкого реагування на відповідну зміну магнітного потоку.

3. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.

У дисертаційній роботі Логвинова А. М. вирішена задача комплексних досліджень фізичних властивостей кристалічної структури, фазового складу, електрофізичних (зокрема, питомого опору і термічного коефіцієнту опору, енергій заліковування дефектів) та магніторезистивних властивостей, а також дифузійних процесів в дво- і багатошарових плівкових систем на основі Ru і Co, мультишарах [Ru/Co]_n/П та приладових плівкових систем спін-вентильного типу на їх основі.

Проведене комплексне дослідження особливостей структурно-фазового стану, електрофізичних та магніторезистивних властивостей в діапазоні температур відпалювання $(3 \div 6) \cdot 10^2$ К дозволило встановити, що використання проміжного шару Ru для розділення магнітних шарів Co є ефективним для формування непрямой антиферомагнітної взаємодії між феромагнітними шарами.

Показано, що перехід від анізотропного до ізотропного магніторезистивного ефектів, який обумовлений реалізацією спін-залежного розсіювання електронів провідності, для структур типу Co/Ru/Co/П та приладових структур спін-

вентильного типу з використанням мультишару $[\text{Ru}/\text{Co}]_n/\text{Ru}/\text{Co}/\text{П}$ є можливим лише за умови термічної обробки до 600 К.

Виходячи із відомих даних стосовно «класичної» системи Cu/Co , за результатами комплексних експериментальних досліджень структурно-фазового стану, електрофізичних (аналіз даних результатів проводився з урахуванням апробації відомих теоретичних моделей розмірного ефекту для багат шарових систем) та магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Co та Ru , була запропонована методика модифікації простих псевдо-спін-вентильних приладових систем $\text{Co}/\text{Cu}(\text{Ru})/\text{Co}/\text{П}$ шляхом заміни верхнього феромагнітного шару на мультишар $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ або $[\text{Ru}/\text{Co}]_n$. Показано, що така модифікація є ефективною, оскільки при відносно не змінному значенні величини МО призводить до підвищення швидкості перемикання з одного магнітного стану в інший всієї системи.

4. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні результати дисертації відображені у 14 працях (6 у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus), серед яких 2 статті у фахових виданнях України, одному розділі колективної монографії, 3 статті у матеріалах конференцій, 1 патент України на корисну модель і 7 тез доповідей.

У публікаціях відсутні матеріали, що дублюються, а автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

5. Достовірність та наукова новизна одержаних результатів

Достовірність результатів, отриманих в дисертаційній роботі А. М. Логвинова, обумовлена застосуванням сучасних і апробованих технологічних методик формування плівкових матеріалів, експериментальних методів дослідження їх структури, фазового складу, електрофізичних та магніторезистивних властивостей.

Коректність результатів підтверджується їх систематичністю та комплексністю, повторюваністю, узгодженням із результатами інших авторів, а

запропоновані у роботі моделі якісно обґрунтовують експериментальні результати.

Знайомство з оригінальними результатами дисертаційної роботи дозволяє сформулювати положення, які визначають її **наукову новизну**.

1. Вперше для одношарових плівок Ru з товщиною до 100 нм, у поєднанні з розрахунком параметрів електроперенесення з використанням лінеаризованої моделі ізотропного розсіювання, на основі експериментальних даних отримані розмірні залежності для питомого опору $\rho(d)$ та термічного коефіцієнта опору $\beta(d)$.

2. За результатами експериментальних досліджень електрофізичних властивостей тонких плівок Ru в інтервалі товщин $(10 \div 100)$ нм і температур $(3 \div 7) \cdot 10^2$ К та проведених розрахунків енергій активації заліковування дефектів E згідно методики Венда показано, що на графіках залежностей спектрів дефектів кристалічної ґратки спостерігаються характерні максимуми, які відповідають енергіям заліковування дефектів вакансійного типу, зі значеннями величини E_v межах від 0,4 до 0,9 еВ.

3. Вперше встановлені особливості структурно-фазового стану і протікання дифузійних процесів на межі поділу окремих шарів у двошарових плівкових системах на основі металів Ru і Co та розглянуто питання стосовно термічної стабільності інтерфейсів у них. Показано, що процеси дифузії атомів на інтерфейсі Ru/Co за температур до 700 К є незначними навіть під дією іонної стимуляції при дослідженні методом ВІМС. Розраховані значення коефіцієнтів дифузії вказують на те, що більш інтенсивною є термічна дифузія атомів Co в шар Ru $(0,8 \div 1,1) \cdot 10^{19}$ м²/с ніж атомів Ru в шар Co $(0,1 \cdot 10^{19}$ м²/с).

4. Показана доцільність застосування тонких шарів Ru у якості немагнітного прошарку при розділенні магнітних шарів Co для досягнення більш чітко вираженого магніторезистивного ефекту при кімнатній температурі вимірювання на прикладі тришарової системи Co(20)/Ru/Co(20)/Пі при зміні товщини прошарку з Ru від 0 до 20 нм.

5. У роботі набула подальшого розвитку концепція розширення принципів формування приладових наносистем на основі тонких металевих плівок. За результатами комплексних досліджень магніторезистивних властивостей структур спін-класанного типу та їх фрагментів на основі Co і Ru та Cu дисертантом було запропоновано методикку формування чутливих елементів датчиків магнітного поля у вигляді плівкової багатосарової системи з використанням мультишару типу $[\text{Ru}/\text{Co}]_n$ та $[\text{Cu}/\text{Co}]_n$. Доведено, що запропоновані моделі можуть працювати в інтервалі магнітних полів до 500 мТл та фіксувати зміну величини магнітоопору в діапазоні $(0,02 \div 1)\%$ і є термічно стабільними за температур до 700 К.

6. Наукове та практичне значення результатів дисертації

Отримані у ході виконання дисертаційної роботи наукові результати, можуть застосовуватися при розробці нової та вдосконалення існуючої елементної бази функціональних елементів сенсорної електроніки, робота яких базується на зміні опору металевих наноструктур під впливом зовнішнього магнітного поля за рахунок наявності спін-залежного розсіювання електронів. Розроблена багатифункціональна структура може бути використана для потреб гнучкої електроніки при створенні спінових діодів та транзисторів, спінових ізоляторів, комірок оперативної магніторезистивної пам'яті, чутливих елементів сенсорів магнітного поля тощо.

7. Зауваження до роботи

1. У літературному огляді та третьому розділі роботи зазначалося, що перехід від аморфної до кристалічної структури для плівок Ru відбувається лише за умови відпалювання до 900 К. У зв'язку з цим не зрозумілим є вибір температурного діапазону для досліджень терморезистивних властивостей як одношарових плівок Ru, так і тришарових плівкових системах Co/Ru/Co (рис. 4.11а-в, стор. 114).

2. При дослідженні дифузійних процесів автор обмежився температурою обробки зразків 700 К. Тому залишилися без відповіді питання чи зберігається

індивідуальність шарів в системах на основі Ru і Co після термообробки за температури 900 К.

3. У роботі не наведені результати досліджень електрофізичних властивостей для запропонованої приладової структури на основі мультишару типу $[Ru/Co]_n$.

4. Залишилося не з'ясованим до кінця питання щодо ресурсу роботи чутливих елементів датчиків магнітного поля у вигляді плівкової багатошарової системи з використанням мультишару типу $[Ru/Co]_n$ та $[Cu/Co]_n$, про можливу їх деградацію у зв'язку із еволюцією кристалічної структури або із процесами дифузії.

5. Автор повинен був більш детально обґрунтувати вибір товщин немагнітних прошарків у тришарових та багатошарових плівкових структурах.

6. Польові залежності магнітоопору наведені в відносно широкому діапазоні зовнішнього магнітного поля $(-4 \div +4) \cdot 10^2$ мТл, що ускладнює виявлення магніторезистивного гістерезису.

7. Порівняно малі значення чутливості МО до магнітного поля автор пояснює великою швидкістю перемикання магнітних шарів. Також, при обговоренні цього питання потрібно було б розглянути вплив обмінної взаємодії на поле насичення польових залежностей магнітоопору і як наслідок на чутливість магнітоопору.

8. Певні зауваження можна сформулювати і до оформлення роботи, пов'язаних з граматичними, стилістичними та методологічними помилками.

8. Відповідність дисертації встановленим вимогам

Однак, усі вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Логвинова А. М. Без сумніву, робота представляє собою завершену кваліфікаційну працю, яка базується на значному обсязі експериментального матеріалу, надійності та коректності отриманих результатів. У роботі одержані нові та науково обґрунтовані результати, які розширюють і поглиблюють розуміння фізичних процесів у багатошарових магнітних структурах.

Вважаю, що дисертаційна робота «Фізичні властивості плівкових приладових

структур на основі Ru і Co» за актуальністю теми, змістом і об'ємом, науковим рівнем, новизною та практичною цінністю повністю відповідає встановленим вимогам щодо кандидатських дисертацій, зокрема, пунктам 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Логвинов Андрій Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем.

Офіційний опонент,

професор кафедри фізики Харківського
національного університету будівництва та архітектури,
д-р фіз.-мат. наук, проф.



Л. ДЕХТЯРУК



УЧЕНИЙ СЕКРЕТАР ХНУБА