

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Однодворець Лариси Валентинівни  
«Електрофізичні і магніторезистивні властивості багатошарових та  
гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки»  
на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук  
за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

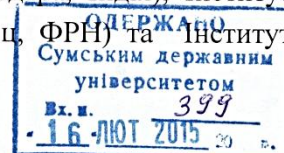
### Актуальність теми дисертації

Увага дослідників до дослідження електрофізичних властивостей багатошарових плівкових матеріалів пов'язана в першу чергу з тим, що в них виникають явища, які практично не проявляються або взагалі не мають місця в масивних однорідних матеріалах. Це становить інтерес як з точки зору вирішення фундаментальних проблем плівкового матеріалознавства, так і для подальшого розвитку електронного приладобудування та сенсорної техніки.

При цьому очевидним є той факт, що для розширення функціональних можливостей сенсорів та покращення стабільності їх робочих характеристик у часі та під дією різних факторів (температури, деформації і магнітного поля), особливу увагу необхідно приділяти вивченню фізичних явищ у тонкоплівкових чутливих елементах (розмірні ефекти, особливості структурно-фазового стану, дифузійні процеси та ін.), механізмів і умов утворення твердих розчинів (т.р.), гранульованого стану та упорядкованих інтерметалідних фаз, формування гетерогенних матеріалів, а також концентраційної, температурної і деформаційної залежностей властивостей таких систем.

Цей комплекс невирішених питань обумовив актуальність тематики дисертаційної роботи та її мету, яка полягала у проведенні комплексних експериментальних і теоретичних досліджень властивостей та фізичних процесів у багатошарових і гетерогенних плівкових матеріалах сенсорної техніки на основі металевих або напівпровідникових компонент та встановленні кореляції між їх фізичними властивостями плівок і структурно-фазовим станом.

Дисертаційна робота Однодворець Л.В. виконувалась за держбюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України (1997– 2014 рр.) і у відповідності до планів міжнародних проектів науково-технічного співробітництва між Сумським державним університетом та Інститутом ядерної фізики ПАН (м. Краків, Польща), Університетом Барода (м. Вадодара, Індія), Інститутом фізики при Університеті ім. Й. Гуттенберга (м. Майнц, ФРН) та Інститутом фізики САН (м. Братислава, Словаччина).



## Загальна характеристика дисертації

У дисертаційній роботі як з теоретичної, так і з експериментальної точки зору вирішена проблема впливу дифузійних процесів, фазоутворення, розмірних, температурних і концентраційних ефектів на фізичні властивості матеріалів чутливих елементів плівкових сенсорів у вигляді багат шарових плівок, гранульованих плівкових стопів, упорядкованих інтерметалідних фаз і гетерогенного складу плівок.

Відповідно до поставленої мети автором були вирішені наступні задачі:

- розроблена методика формування багат шарових плівкових систем на основі Fe і Pd, Pt, Ag, Gd або Ge; гетерогенних матеріалів на основі Ni, Mo, W або Re та їх хімічних сполук і плівкових твердих розчинів;
- вивчений структурно-фазовий стан багат шарових плівкових матеріалів на основі магнітних і немагнітних компонент;
- розроблена теоретична модель для тензорезистивних властивостей багат шарових плівкових матеріалів з урахуванням деформаційної залежності не лише середньої довжини вільного пробігу (СДВП) електронів, а й параметрів, які характеризують електронний транспорт в провіднику;
- проаналізований вплив зовнішнього магнітного поля на термічний коефіцієнт опору (ТКО) гранульованих плівкових сплавів у рамках феноменологічного підходу;
- узагальнені результати досліджень особливостей тензо- і терморезистивного ефектів у багат шарових плівкових системах та досліджено вплив розмірного фактору на високотемпературне електрон-фононне розсіювання в металевих плівках;
- проведені комплексні дослідження електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей чутливих елементів сенсорів в умовах дії розмірного, температурного і концентраційного ефектів з точки зору підвищення їх чутливості, стабільності та отримання оптимальних значень параметрів.

Аналітичний огляд публікацій, які присвячені вивченню фазового складу, електрофізичних і магніторезистивних властивостей багат шарових, двокомпонентних плівкових систем та гетерогенного складу матеріалів наведено автором *у першому розділі*. При цьому, відмічено актуальність у таких дослідженнях, оскільки не відомі систематичні дані про умови формування в плівкових матеріалах інтерметалідів, твердих розчинів, у т.ч. гранульованих і упорядкованих; проведено аналіз теоретичних моделей розмірного ефекту в електрофізичних властивостях плівок; розглянута

класифікація плівкових матеріалів електронної і сенсорної техніки з точки зору їх практичного застосування; вказані фундаментальні і прикладного характеру проблеми тензометрії; встановлено, що дослідження магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів, таких як анізотропний (АМО) і гігантський (ГМО) магнітоопір, дозволяють запропоновувати нові варіанти плівкових чутливих елементів термо- і тензорезисторів та багатофункціональних сенсорів із високою температурною стійкістю або високою чутливістю до деформації, температури або магнітного поля.

Враховуючи новизну і складність поставлених задач, дисертантом приділена особлива увага до проведення досліджень при використанні сучасного наукоємного обладнання, експериментальних методик і методів розрахунків, описаних у *другому розділі* дисертаційної роботи.

*Третій розділ* дисертації присвячений узагальненню результатів досліджень тензорезистивного ефекту в області пружної і пластичної деформацій для різних типів металевих чутливих елементів. Автором роботи детально вивчені фізичні процеси і фактори, які обумовлюють розмірну, температурну і концентраційну залежності коефіцієнта тензочутливості (КТ); проаналізовані особливості тензорезистивних властивостей металевих плівок в області пружної і пластичної деформації; наведені нові результати стосовно тензорезистивних властивостей плівок в області пластичної деформації і встановлено, що при певній концентрації магнітної компоненти в плівкових матеріалах фіксуються підвищення значення КТ (від 10 до 20 одиниць); розглянуті вплив дифузійних процесів і фазоутворення на властивості двокомпонентних плівкових матеріалів на основі магнітних і немагнітних металів (у т.ч. тугоплавких і благородних), в яких відбуваються процеси гранулізації або атомного упорядкування. У дисертаційній роботі Одноворець Л. В. запропонована теоретична модель, у якій враховується як безпосередній, так і опосередкований вплив деформації на величину параметрів електроперенесення, проведена її апробація і одержана задовільна відповідність між розрахунковими та експериментальними результатами.

Дисертантом у *четвертому розділі* роботи на основі отриманих результатів досліджень і аналізу літературних даних узагальнені результати стосовно розмірного і концентраційного ефектів в ТКО плівкових матеріалів. Встановлено, що багат шарові плівкові матеріали, в яких відбуваються процеси атомного упорядкування, та плівки гетерогенного складу є перспективними матеріалами для формування чутливих елементів сенсорних систем з високою температурною стабільністю (ТКО  $\sim 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ). У цьому ж розділі проаналізоване питання про кореляцію між концентрацією s+d

електронів і електрофізичними властивостями металевих плівкових конденсатів.

*У п'ятому розділі* дисертаційної роботи наведені результати досліджень магніторезистивних властивостей плівок на основі магнітних і немагнітних металів, а саме Fe/Pd (Pt, Ag) та Co/Ag, при трьох геометріях вимірювання; показана можливість використання таких систем як елементів високочутливих сенсорів температури і магнітного поля та терморезисторів. Автором роботи вивчені процеси фазоутворення (утворення магнітних фаз германідів металу після термовідпалювання) і властивості (ТКО, вольт-амперні характеристики, магнітоопір) плівок типу метал/напівпровідник як матеріалів омичних контактів і сенсорів магнітного поля зі термостабільними характеристиками. Проаналізовано вплив магнітного поля на ТКО гранульованих плівкових сплавів і отримано співвідношення для чутливості ТКО до магнітного поля.

Проведено аналіз температурних залежностей питомого опору одношарових металевих плівок і вказано на вплив деформації фононного спектру на ефективність фононного розсіювання електронів; узагальнені результати стосовно практичного застосування матеріалів як чутливих елементів сенсорних та інформаційних приладів різного функціонального призначення проведено автором у *шостому розділі* дисертаційної роботи.

Аналізуючи роботу в цілому, можна вказати найбільш вагомий фундаментального і прикладного характеру наукові результати, які визначають **наукову новизну** роботи.

– автором запропонована теоретична модель для коефіцієнта тензочутливості багатшарових плівкових матеріалів, в якій коректно враховується деформаційна залежність не лише СДВП електронів, а й параметрів електроперенесення, зміна яких впливає на величину коефіцієнта тензочутливості і опосередковано на величину СДВП;

– на основі проведених комплексних досліджень електрофізичних і магніторезистивних властивостей, процесів твердофазного синтезу і впорядкування атомів в плівкових матеріалах на основі Fe і Pd або Pt, встановлено умови формування твердих розчинів і упорядкованих фаз та реалізації ефектів АМО і ГМО;

– вперше на прикладі плівок Pd, Pt, Ag, Cr і Mo розрахований ефективний параметр високотемпературної електрон-фононної взаємодії, збільшення якого при зменшенні товщини плівки є результатом прояву розмірного ефекту і деформації фононного спектру;

– вперше на феноменологічному рівні проаналізовано питання про чутливість ТКО до зовнішнього магнітного поля в гранульованих плівкових

твердих розчинах і встановлено, що в розбавлених т.р. ТКО визначається величиною їх питомого опору, а в пересичених т.р. реалізується сукупність високоомного і низькоомного спінових каналів і внесок т.р. у загальну величину ТКО є незначним; чутливість ТКО до магнітного поля має сталу величину (область проміжних концентрацій магнітної компоненти).

### **Практичне значення результатів і рекомендації щодо їх використання**

Одержані в роботі результати стосовно тензоефекту (деформаційні залежності, величина деформації переходу від пружної до пластичної, чутливість питомого опору до деформації), терморезистивні (температурні залежності питомого опору і ТКО) і магніторезистивні (польові залежності опору і магнітоопору) двокомпонентних і гетерогенного складу плівкових матеріалів можуть бути використані у групах і лабораторіях плівкового матеріалознавства ряду вищих навчальних закладів та дослідницьких установ. Зокрема, проведені комплексні дослідження властивостей плівкових матеріалів, які дозволили розробити фізико-технологічні основи формування плівкових матеріалів тензо- і терморезисторів, сенсорів деформації, температури і магнітного поля, мають важливе практичне значення при створенні функціональних елементів з покращеними характеристиками, стабільними в області пластичної деформації та підвищених температур. Запропоновані у роботі теоретична модель для КТ багат шарових плівок і співвідношення для чутливості ТКО до магнітного поля гранульованих т. р. можуть бути використані для якісного прогнозування електрофізичних властивостей та аналізу кінетичних явищ, пов'язаних із розсіюванням носіїв електричного заряду на поверхні плівки, зовнішніх і внутрішніх межах поділу та фононах.

Установлена можливість практичного застосування двокомпонентних і гетерогенного складу плівок різних типів як матеріалів сенсорних елементів та встановлено, що двошарові плівки на основі Fe, Ni, Cr і Mo, плівки гетерогенного складу на основі Fe або Re, плівкові матеріали на основі Co і Ag та германідів Fe можуть бути використані як термостійкі елементи сенсорів різного функціонального призначення. У свою чергу мультишари на основі Fe і Pd або Pt, двошарові плівки на основі Ni і Cr та гетерогенні матеріали на основі Mo або W – як терморезистори та високочутливі елементи сенсорів температури і магнітного поля.

Результати досліджень фазового складу і термо- та магніторезистивних властивостей плівок метал напівпровідник дозволили встановити умови

формування в них стабільних магнітних фаз германідів металів з точки зору їх застосування як термостабільних елементів сенсорів і омичних контактів.

### **Достовірність результатів та ступінь обґрунтування наукових положень**

Достовірність отриманих у дисертаційній роботі результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків забезпечується, в першу чергу, широким спектром застосованих при виконанні роботи сучасних методів досліджень, зокрема використанням автоматизованих комплексів, у т.ч. у варіанті віддалено-контрольованої лабораторної установки з комп'ютерною обробкою результатів (для дослідження розмірних і температурних залежностей ТКО, КТ і магнітоопору), методів електроннографії, рентгенографії, електронної мікроскопії (для дифракційних і структурних досліджень), методів вторинно-іонної мас-спектрометрії і енергодисперсійного аналізу (для вивчення дифузійних процесів і концентраційних ефектів), методу магнітооптичного ефекту Керра (для дослідження магнітооптичних властивостей).

Окрім зазначеного, достовірність і обґрунтованість наукових результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується систематичністю і повторюваністю отриманих результатів, задовільною відповідністю розрахункових, в рамках запропонованих моделей, і експериментальних даних та узгодженням їх з результатами інших авторів.

### **Зауваження до роботи**

1. У запропонованій теоретичній моделі тензоефекту (підрозділ 3.3) вузловим моментом є допущення про деформаційну залежність не лише середньої довжини вільного пробігу електронів, а й коефіцієнтів, що визначають характер взаємодії носіїв заряду зі зовнішніми поверхнями, інтерфейсами та межами зерен плівок, хоча в роботах Тел'є, Тоссе і Пішар постійно підкреслювалось про відсутність такої залежності. Виникає питання, наскільки продуктивною, в площині збігання розрахункових та експериментальних результатів, виявилась зазначена гіпотеза.

2. У дисертаційній роботі не наведені дані стосовно граничних значень пружної деформації багаточарових плівок.

3. На рис. 4.17 представлена залежність коефіцієнта тензочутливості масивних конденсатів від концентрації (s+d) електронів, згідно з якою,

експериментально отримані величини КТ потрапляють в «коридор» значень  $\Delta\gamma=1$ . З тексту дисертаційної роботи незрозуміло з чим це пов'язано – з точністю вимірювання КТ (як це стверджується на с.192), чи електронними властивостями плівкових матеріалів.

4. При дослідженні електрофізичних властивостей плівок Ge/Cr/підкладка автор спостерігала деяке зменшення опору двошарової системи у порівнянні з одношаровими плівками Cr (до 8%), що узгоджується із результатами Шодера і Волша. Ці результати дисертант пояснила виходячи лише із однієї гіпотези – утворення екситонів Ван'є – Мотта. Оскільки у цьому процесі, за оцінкою автора, задіяне біля 2% електронів плівки Cr, то можливо, що в даному випадку спрацьовує інший механізм цього ефекту, наприклад, покриття плівки хрому германієм може призводити до збільшення коефіцієнта дзеркальності і, відповідно, до зменшення опору в двошарових системах у порівнянні із одношаровими зразками.

5. Аналіз залежності термічного коефіцієнта опору твердого розчину від магнітного поля (співвідношення (5.5), (5.6) і рис.5.27) здійснений в термінах питомого опору, а не ТКО. Переваги такого підходу не знайшли свого пояснення в роботі.

6. Зауваження, які не стосуються безпосередньо змісту роботи:

- на рис.4.4 не позначений початок координат, що затрудняє порівняння температурних залежностей питомого опору для плівок гетерогенного складу на основі різних металів;
- стилістично краще використовувати словосполучення «хімічні сполуки», а не «хімічні з'єднання» (стор. 19, 21, 29, 118).

### **Загальний висновок**

Дисертаційна робота Однодворець Л.В. є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена проблема сучасного плівкового матеріалознавства, пов'язана із дослідженням розмірних, температурних і концентраційних ефектів у електрофізичних і магніторезистивних властивостях плівкових матеріалів сенсорної техніки в умовах дифузійних процесів, фазоутворення, гранулізації і атомного впорядкування.

Результати дисертації відображені у 60 публікаціях, у т.ч. 26 статтях у фахових виданнях (із них 4 огляди і 14 праць у виданнях, що індексуються наукометричною базою «Scopus»), колективній монографії, 3 навчальних посібниках і 25 тезах доповідей на вітчизняних та міжнародних конференціях. Текст автореферату повністю відповідає змісту дисертації.

За актуальністю теми, змістом і об'ємом, науковим рівнем, новизною та практичною цінністю дисертаційна робота Одноворець Лариси Валентинівни «Електрофізичні і магніторезистивні властивості багат шарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки» задовольняє встановленим вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а її автор, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора 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.ф.-м.н., професор

Л. В. Дехтярук

Підпис Дехтярука Л. В. засвідчую:

Вчений секретар  
Харківського національного університету  
будівництва та архітектури,  
к.т.н., доцент



О. П. Крот