

ВІДЗИВ

офіційного опонента про дисертацію ОДНОДВОРЕЦЬ Лариси Валентинівни
«Електрофізичні і магнеторезистивні властивості
багатошарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки»,
яку подано на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
зі спеціальності 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

Ця дисертаційна робота стосувалася дослідження важливих для сенсорної техніки рис фазового складу, електрофізичних і магнеторезистивних властивостей нанорозмірних матеріалів функціонального призначення на основі феромагнетних (Co, Fe, Ni, Gd), антиферомагнетних (Cr), немагнетних із проміжною температурою топлення (Cu, Ag, Pd, Pt) та тяжкотопких (Mo, W і Re) або напівпровідникових (Ge) компонентів в умовах утворення твердих розчинів, твердофазних реакцій, формування структур, гетерогенних за розподілом складу.

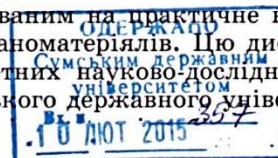
Досліджені в даній роботі об'єкти, — матеріали у вигляді багатошарових металевих плівок і мультишарів, плівкові стопи на основі металів та гетерогенні за складом матеріали на основі металевих компонентів та його хемічних сполук, — вже застосовуються або є перспективними для можливих застосувань у мікроелектронній і сенсорній техніці завдяки унікальним фізичним властивостям, притаманним зазначеним плівковим системам (зокрема корисним розмірним, температурним і концентраційним ефектам в електрофізичних і магнеторезистивних властивостях). Суть метод створення таких плівкових матеріалів полягає в пошаровій з подальшим термообробленням або одночасній конденсації компонентів у різних вакуумних умовах. Це уможливило створювати нового класу наноматеріали зі стабільними робочими характеристиками, наприклад, які мали б високу термічну стабільність, антикорозійну стійкість, малі температурний, концентраційний і польовий дрейфи параметрів, або ж, навпаки, які були б надчутливими до температури тощо. Змінюючи ступінь вакууму, температуру підложжя, швидкість конденсації, товщини окремих шарів і концентрації атомів компонентів, можна регулювати формування багатокомпонентного плівкового матеріалу (зокрема топологію мікросхем з нього) і таким чином розв'язувати складні фізико-технічні й технологічні проблеми, що постають.

Розроблення функціональних матеріалів для електронної техніки із поліпшеними робочими характеристиками і параметрами та вивчення фізичних процесів у них є предметом дослідження для плівкового матеріалознавства. Обсяги робіт з пошуку відповідних технологій є великими; тому важливим стає прогнозування властивостей нових речовин у конденсованому стані. І теоретичний підхід із розробленням і апробацією відповідних моделей уможливило розв'язати багато з таких проблем, зокрема врахувати деформаційні ефекти в параметрах електроперенесення, температурні й розмірні ефекти у фононному і спин-залежному розсіянні електронів у матеріалах чутливих елементів сенсорів.

Незважаючи на численність експериментальних результатів стосовно термо- і п'єзорезистивного ефектів, магнеторезистивних і магнетооптичних властивостей мультишарів і багатокомпонентних плівкових матеріалів елементної бази сенсорики, дослідники наноматеріалів зосередили свою увагу на з'ясуванні концентраційної, температурної та деформаційної залежностей їхніх властивостей з метою створення більш ефективних елементів електронних приладів.

Тому й комплексні дослідження властивостей багатошарових і гетерогенних матеріалів на основі металевих або напівпровідникових плівок та фізичних процесів у них, здійснені у дисертаційній роботі пані Л. В. Однодворець, складено з *актуальних задач* плівкового матеріалознавства і фізики тонких плівок.

Мета наукової роботи, що рецензується, й ідеї для її досягнення є своєчасними та відповідають концептуальним напрямкам, орієнтованим на практичне використання результатів фундаментальних досліджень наноматеріалів. Цю дисертаційну роботу виконано в межах планів держбюджетних науково-дослідних робіт (1997–2014 рр.) кафедри прикладної фізики Сумського державного універ-



(2004–2014 рр.) між Сумським держуніверситетом і Інститутом ядерної фізики ПАН (м. Краків, Польща), Інститутом фізики САН (м. Братислава, Словаччина), Університетом Барода (м. Вадодара, Індія) та Інститутом фізики при Університеті ім. Й. Гуттенберга (м. Майнц, Німеччина), в яких авторка дисертації брала участь як відповідальна виконавиця, керівниця або виконавиця.

Треба також зазначити, що у спеціалізованій вченій раді Д 55.051.02 СумДУ під керівництвом пані Л. В. Однодворець було захищено дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла паном І. П. Буриком «Електрофізичні властивості двокомпонентних та гетерогенних плівкових матеріалів на основі перехідних *d*-металів» (на засіданні 17.06.2011 р.) і пані О. П. Ткач «Процеси фазоутворення, електрофізичні та гальваномагнітні властивості багатошарових плівкових систем Pd/Fe» (на засіданні 11.05.2012 р.).

Отже, дисертаційна робота пані Л. В. Однодворець має прийнятний ступінь опрацьованості своїх структурних елементів, повноти, поглибленості та конкретності, а її дисертація містить елементи *новизни*, що відбивається в наявності серед одержаних даних нової наукової інформації щодо особливостей дифузійних процесів і перебігу твердофазних реакцій, властивостей плівкових матеріалів різної морфології та різного фазового складу. Розв'язання задач, поставлених у даній дисертаційній роботі, в тому числі з використанням методичних удосконалень, уможливило одержати наступні *нові* (й цікаві з моєї точки зору) результати з елементами фундаментальності.

1. Для прогнози п'езорезистивного ефекту у багатошарових плівкових матеріалах використано напівфеноменологічний теоретичний модель для оцінювання їхнього коефіцієнта тензочутливості (КТ), що враховує як деформаційну залежність середньої довжини вільного пробігу електронів, так і коефіцієнти дзеркальності зовнішніх поверхонь і проходження меж зерен та інтерфейсів. Для різноманітних плівкових матеріалів продемонстровано важливість урахування типу деформації, структурного стану, дифузійних процесів і фазоутворення при експериментальному вивченні розмірних, температурних і концентраційних ефектів у їхній тензочутливості. Установлено, що для мультишарів і плівкових стопів на основі нікелю і хрому, кобальту і хрому та заліза і паладію або платини за певної концентрації атомів магнетного компонента спостерігаються підвищені значення КТ (у 12–22 одиниць).
2. Проведеними комплексними дослідженнями електрофізичних, магнеторезистивних і магнетооптичних властивостей, процесів твердофазної синтези й упорядкування атомів у матеріалах на основі плівок заліза та паладію або платини встановлено, що в таких системах відбувається часткове за об'ємом упорядкування за типами $L1_0$ - і $L1_2$ -надструктур, причому з пониженням точки перетворення основної ГЦК-гратниці у ГЦТ-гратницю, спричиненого впорядкуванням атомів заміщення, у порівнянні з масивними зразками того ж складу, через конденсаційно-стимульовану дифузію при пошаровому осадженні тонких плівок заліза і паладію або платини. Показано, що формування впорядкованої фази у мультишарах Fe/Pd і Fe/Pt спричиняє підвищення термічних коефіцієнтів електроопору та магнетоопору у порівнянні з неупорядкованими фазами ГЦК-Fe-Pd і ГЦК-Fe-Pt того ж складу, що уможливує застосування таких систем як чутливих елементів терморезисторів, сенсорів температури та магнетного поля, оскільки фазовий склад гранул із структурами типу $L1_0$ і $L1_2$ має широкі температурні й концентраційні інтервали стабільності. Експериментальними дослідженнями властивостей мультишарів типу феромагнетик–шляхетний метал і процесів твердофазної синтезу й упорядкування атомів у таких матеріалах з'ясовано умови формування твердих розчинів і упорядкованих фаз, а також реалізації ефектів анізотропного і гігантського магнетоопору.
3. На феноменологічному рівні проаналізовано чутливість термічного коефіцієнта опору (ТКО) у гранульованих плівкових твердих розчинах до зовнішнього магнетного поля і з'ясовано фізичні чинники, від яких залежить величина

ТКО слабких і пересичених твердих розчинів, — власне питомий опір і співвідношення (та й взаємочин) внесків високо- і низькоомного спінових каналів провідності відповідно.

4. Проведено класифікацію плівкових матеріалів різних типів (мультишари на основі магнетних і немагнетних металів або напівпровідників, плівкові стопи, гетерогенні матеріали на основі тяжкотопких металів) за експериментально вивченими розмірними, температурними й концентраційними ефектами у тензочутливості в широкому інтервалі товщин, температур і концентрацій атомів, причому з огляду на їх практичне застосування в сенсорній техніці як термостійких елементів сенсорів різноманітного функціонального призначення, терморезисторів, високочутливих елементів сенсорів температури і магнетного поля та контактних структур мікросхем.

Структура дисертації та логіка подання матеріалу відображають послідовність розв'язання завдань дослідження. Дисертація складається із Вступу, шістьох розділів, Висновків і Списку використаних джерел.

У *Вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження, показано зв'язок роботи з науковими темами, визначено об'єкт, мету, завдання та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення результатів роботи, особистий внесок авторки в працях, опублікованих у співавторстві, охарактеризовано вірогідність, зазначено апробацію і впровадження результатів дисертації.

У оглядовому *першому розділі* на підґрунті використаної літератури систематизовано та проаналізовано дані про формування й властивості наномасштабних багат шарових структур і матеріалів (в тому числі на основі багатокомпонентних систем). Таким матеріалам і структурам присвячено широкий ряд експериментальних і теоретичних досліджень, проте залишається низка питань, відповіді на які мають додати розуміння електронної структури, механізмів твердотільних реакцій, дифузійних процесів, фізичних і механічних явищ у них, уможливити створення нових сенсорних пристроїв тощо. Зроблено висновок про те, що нині розвиток тензометрії стикається з актуальними проблемами як із фундаментальної точки зору (розроблення більш досконалої теоретичної моделі), так і прикладного характеру (установлення температурних, деформаційних і польових характеристик чутливих елементів плівкових сенсорів різних типів). І аналіз літературних даних з дослідження магнеторезистивних властивостей та його розвивання уможливають запропоновувати нові варіанти приладових плівкових структур як чутливих елементів багатофункціональних сенсорів із характеристиками, які мали б високу термічну стабільність або чутливість та малі температурний, концентраційний і польовий дрейфи параметрів.

Стосовно першого розділу зауважень немає. Втім, зазначу, деякі недогляди здебільш науково-редагувального характеру; в деяких місцях цього розділу (та й Вступу і наступних розділів) застосовано не найкращу українськомовну фізичну термінологію й жаргонові словосполучення, наприклад, чомусь «тугоплавка компонента» (а не «тяжкотопкий компонент»), «температура плавлення» (замість «температура топлення»), «сплав» (а не «стоп»), «тліючий розряд» (замість «жеврійний розряд»), «розпилення матеріалу» (а не «розпорошення матеріалу»), «вісь легкої намагніченості (або намагнічування)» (замість «вісь легкого намагнетування»), «вектор намагніченості» (а не «вектор намагнетованості»), «гранули, впроваджені у матрицю» (замість «гранулі, втілені у матрицю»), «інтерметалідне з'єднання» (а не «інтерметалічна сполука» чи то «інтерметалід»), «кінцева розчинність» (замість «скінченна розчинність»), «блокування процесів окислення» (а не «блокування процесів окиснення»), «приймати значення» (замість «набувати значення»), «граничні умови» (а не «межові (або крайові) умови»), «коефіцієнт Пуассона» (замість «Пуассонів коефіцієнт»), «міст Вітсона» (а не «Вітстонів міст»), «ефект Холла» (замість «Голлів ефект»), «ефект Керра» (а не «Керрів ефект»), «благородний метал» (замість «шляхетний метал»), «кристалічна решітка» (а не термін «кристалічна ґратниця» за фізичним лексиконом, що дотримується питомого українського назовництва і так званого «харківського», практично останнього правдивого, українського правопису). А іще деін-

де вже в цьому розділі згадується Фукова функція, але, на жаль, вираз для неї тут не наведено і відповідних відомих бібліографічних посилань не зазначено.

В *другому розділі* проаналізовано експериментальні методи і методики одержання плівкових матеріалів, дослідження їх електрофізичних, магнеторезистивних і магнетооптичних властивостей, кристалічної структури, фазового складу і дифузійних процесів. У цьому ж розділі для ілюстрації можливостей метод подано вірцеві приклади найбільш характерних деформаційних, температурних і концентраційних залежностей, мікроснімків, електронogram, рентгенogram, принципових схем і блок-схем установок тощо.

Щодо другого розділу принципових зауважень також немає. Зазначу лише, що, хоча електронogram на рис. 2.10 а, б (стор. 76) і 2.11 а, б (стор. 77) є малоінформативними через аморфну мікроструктуру невідпалених плівкових зразків молібдену, леґованого Карбоном або Нітроґеном, та нелеґованого молібдену відповідно, саме тільки вони (із рис. 3.15 а, б на стор. 126) серед наведених авторкою у цьому (та й наступному) розділі дисертації рисунків мікроструктур і електронogram є свідченням того, що низька швидкість конденсації може сприяти формуванню аморфної фази немагнетних плівок за решти фіксованих умов (щодо температури підложжя, товщини плівки тощо). Цікаво, чому? Крім того, неогляди науково-редагувального характеру також виявлено і в цьому розділі: в деяких місцях цього розділу застосовано жарґонову стилістику, наприклад, «випромінює рентгенівське випромінювання», а не «випромінює Х-промені (чи то Рентґенові промені)». Ще зазначу, що ліпше застосовувати українськомовне слово «щавлення» (замість «травлення») та словосполучення «пришвидшувальна напруга» (замість «прискорююча напруга»), «просвітлювальна мікроскопія» (а не «просвічуюча мікроскопія»), «Голлів коефіцієнт» (а не «стала Холла»), «шерсткість поверхні» (замість «шорсткість поверхні») та ін.

Третій розділ присвячено узагальненню експериментальних і теоретичних результатів досліджень п'езорезистивного ефекту в плівкових матеріалах в областях пружної та пластичної деформації. Воно уможливило авторці з'ясувати практично всі фізичні процеси, які спричиняють розмірну, температурну і концентраційну залежності коефіцієнта тензочутливості, та визначити вплив структури, фазового складу плівкових зразків, типу й інтервалу деформації, товщини системи в цілому і товщин окремих шарів, концентрації атомів окремих компонентів на величину коефіцієнта тензочутливості, а це обумовило завершеність вивчення п'езорезистивного ефекту в тонких плівках. Дисертанткою запропоновано використовувати ряд моделей для інтерпретації експериментальних результатів, на основі яких в рамках напівфеноменологічного підходу враховано вплив деформаційних ефектів у параметрах електроперенесення для плівкових матеріалів сенсорики на величину коефіцієнта тензочутливості та проаналізовано причину реалізації аномально малих значень коефіцієнта тензочутливості для тонких плівок.

Стосовно третього розділу є чотири неprincipових зауваження. По-перше, у даному мені екземплярі дисертації на стор. 130, 137 та стор. 132, 137 наведено різні формули під однаковими номерами (3.5) та (3.6) відповідно. По-друге, на основі співвідношень (3.5)–(3.7) в рамках термодинамічної теорії Бублика–Пінеса дисертантка робила спробу оцінити критичну товщину, за якої, навіть при сталому хемічному складі, у тонкій монокристалічній металевій плівці стається рівноважне поліморфне фазове перетворення, і дійшла висновку, що у плівкових зразках «аномальні» фази, наприклад, на основі ГЦК-ґратниці (тобто ті, які відсутні у масивних зразках) можуть представляти собою лише кристалохемічні сполуки з атомів конденсованого основного металу та неметалевих атомів залишкової атмосфери. Але у зв'язку з цим виникає запитання, чи спостерігала сама пані Л. В. Однодворець утворення відразу кристалохемічних фаз втілення, а не явище поліморфізму у плівкових зразках малих розмірів із малою концентрацією втіленої домішки (можливо, щось на кшталт індукованого домішкою поліморфного перетворення)? Адже за такою інтерпретацією одержуваних даних мала б бути проаналізованою можливість (чи неможливість) фазо-

вої рівноваги не різних алотропних модифікацій чистого металевго компоненту, а розведених твердих розчинів або ж фаз втілення на його основі. По-третє, у підрозділі 3.2 на стор. 119, 121, 122, 124–126, 136, 138 наведено дані електронографічних досліджень кристалічної структури і фазового складу, але, на відміну від результатів дифракційних досліджень (наведених в тому ж підрозділі на стор. 139–143), їх не було сповна опрацьовано, тобто вони не були проінтерпретовані в кількісних термінах параметрів порядку і тому мають ілюстративний характер, що унеможливило вичерпно з'ясувати фазово-структурний стан (зокрема надструктурний лад) в результаті тої чи іншої термообробки. До речі, з наведеного в тексті опису зразків, коли йдеться про дані, яких представлено (в цьому розділі та й інших) на електронограмах і рентгенограмах, не завжди ясно, чи відповідають вони однаковим умовам утримання зразків? Тут я маю на увазі те, що електронографічні дослідження виконувалися зі зразками, осадженими, зокрема, на аморфне підложжя, а дифракційні (наприклад, Рентгенові) — напевно, зі зразками на монокристалічному підложжі, і саме тому такі зразки могли мати, наприклад, різні ступені дисперсності і, відповідно, різні ширини дифракційних ліній; тоді мікроструктури таких зразків, чутливі до устрою підложжя, порівнювати між собою може бути складно. Нарешті, стосовно цього (та й першого) розділу залишається відкритим питання про регуляризувальний алгоритм (а практично про перелік необхідних припущень) для відокремлення в добутках «статистичних ваг» $\{A_i\}$ шарів і (багатьох!) відповідних логаритмічних похідних, що фігурують, принаймні, у формулах типу (3.11), (3.11'), (3.13) (та й (1.5)) і визначаються, зокрема, через Фуксові функції $\{F_i\}$ (як вказано на стор. 149, 155 та й 44) одними й тими самими параметрами геометрії шарів (і кристалітів), дзеркальності, проходження й розсіяння електронів щодо тих чи інших поверхонь і роздільних меж у (багато)шарових (полі)кристалічних плівках на основі обмеженої чисельної експериментальної (апріорної) інформації. Відповідний коментар був би вельми корисним у подальшому «практичному» застосуванні зазначених громіздких виразів для КТ і ТКО іншими спеціалістами задля оцінювання параметрів напівфеноменологічної моделі з даних експерименту. Крім того, подекуди в цьому розділі також згадується Фуксів модель розсіяння електронів на зовнішніх поверхнях плівки, але відповідних відомих бібліографічних посилань тут не наведено. А ще зазначу, що краще застосовувати українськомовні словосполучення «роздільча здатність» (замість «розрізнявальна здатність»), «фаза втілення» (а не «фаза впровадження»), «перебіг реакції» (замість «протікання реакції»), «Дебайова температура» (а не «температура Дебая»), «Грюнайзенів параметер» (замість «стала Грюнайзена»).

У четвертому розділі представлено результати досліджень температурної залежності опору і термічного коефіцієнта опору плівкових матеріалів, а також узагальнено результати стосовно розмірного і концентраційного ефектів у терморезистивних властивостях. Авторкою роботи вказується на високу температурну стійкість гетерогенних плівкових матеріалів на основі тяжкотопких металів, що уможливило використовувати їх для створення функціональних елементів сенсорної техніки з прогнозою робочих параметрів і характеристик. У розділі також проаналізовано терморезистивні властивості плівкових стопів і мультишарів на основі металів та деякі питання, пов'язані із температурними і концентраційними ефектами у підсистемі електронного газу. Зокрема, розглянуто питання про температурну залежність коефіцієнта зерномежового розсіяння електронів. Уточнено кореляцію між густиною $s+d$ -електронів і електрофізичними властивостями магнетних (Fe, Co, Ni) і немагнетних (Sc, Ti, Mo, Re, Cr, Cu, Ag, Pd, Pt) металевих плівок, що уможливило робити прогнози їх робочих параметрів: термічного коефіцієнта опору — для сенсорів температури і терморезисторів та коефіцієнта тензочутливості — для сенсорів деформації.

Щодо четвертого розділу принципів зауважень немає. Зазначу лише, що у цьому та й третьому (і п'ятому) розділах авторка дисертації підбила підсумки вивчення фазового складу так званих гетерогенних плівкових матеріалів, але, хоча в таких матеріалах має бути й низькоомна фаза, так і не роз'яснила пи-

тання про те, що ж у них ця фаза являє собою: чи то її просто не зазначено, або її взагалі не виявлено. Тут, вже в цьому розділі, на мою думку, цікавим було б висвітлення (в рамках бачення здобувачки як висококваліфікованої професіоналки) тих експериментальних умов, за яких може реалізуватися балістичний механізм перенесення заряду, зокрема, в гранулях у плівкових матеріалах гетерогенного типу, про що йдеться, наприклад, на стор. 187. Нарешті зазначу, що за українським правописом ліпше писати про «модель Фукса–Зондгеймера» (а не «модель Фукса–Зондгеймера»).

П'ятий розділ присвячено вивченню магнеторезистивних властивостей наномасштабних плівкових матеріалів на основі феромагнетних і шляхетних металів, аналізі впливу магнетного поля на величину термічного коефіцієнта опору гранульованих плівкових стопів. Наведено результати досліджень магнеторезистивних властивостей плівок Fe/Pd (Pt, Ag) та Co/Ag, які проводилися за трьома геометріями мірювання. Розглянуто питання стосовно Голлового ефекту в мультишарах і з'ясовано, що величина Голлового коефіцієнта залежить від загальної товщини і фазового складу матеріалу, товщини немагнетного шару та температурного інтервалу відпалювання плівкових зразків. Зроблено висновок про можливість застосування матеріалів феромагнетик–шляхетний метал і феромагнетик–напівпровідник як чутливих елементів сенсорів для мірювання локальних магнетних полів і величини електричного струму й омичних контактів. Особливу увагу приділено вивченню процесів упорядкування атомів і формування магнетних фаз германідів заліза, які є термічно стабільними в температурному інтервалі 300–1000 К, оскільки розшарування компонентів таких фаз відбувається за порівняно високих температур.

Стосовно п'ятого розділу маю звернути увагу на наступне. 1) В усіх досліджених плівкових системах утворюються тверді розчини, а у плівках на основі Fe і Pd (або Pt) вони можуть бути неупорядкованими (тип A1) або упорядкованими. Але у основному тексті розділу не проаналізовано кількісно ролі конденсаційно-стимульованої дифузії у процесах упорядкування багатшарових систем за надструктурним типом еквіатомової фази $L1_0$ (стор. 197, 198, 206–208). 2) Цікаво, чи спостерігалися ефекти впорядкування атомів у плівкових системах на основі Fe (або Co) і Ag, про яких також йдеться у цьому розділі? 3) Маю зазначити, що корисним було б порівняння одержаних результатів стосовно Голлового ефекту у мультишарах (рис. 5.20–5.22, стор. 224) на основі паладію та заліза з відповідними даними для одношарових плівок, як це зроблено авторкою для систем на основі заліза і германію (рис. 2.20, стор. 89), та й з відомими даними для двошарових систем. І це: за українським правописом краще писати «щойносконденсований (або свіжосконденсований) зразок» (замість «свіжесконденсований зразок») та «екситон Ваньє–Мотта» (а не «екситон Ваньє–Мотта»).

У цікавому *шостому розділі* проаналізовано температурні залежності питомого опору одношарових металевих плівок залежно від їхньої товщини. Авторкою дисертації здійснено спробу оцінити внески розсіяння електронів різних спінових орієнтацій у питомий опір на основі експериментальних залежностей питомого опору від концентрації атомів немагнетного компонента для плівок феромагнетик–шляхетний метал. На основі даних власних досліджень та інших авторів дисертанткою узагальнено рекомендації щодо практичного застосування матеріалів із спин-залежним розсіянням електронів (мультишарів, гранульованих плівкових стопів, спінових вентилів і плівок, що містять наночастинки) як чутливих елементів сенсорних та інформаційних електронних приладів з високою щільністю запису інформації та поліпшеними робочими характеристиками.

Щодо шостого розділу є одне зауваження. Практично лінійні залежності питомого електроопору від температури для різних товщин металевих плівок збільшують кут нахилу відповідно до зменшення товщини (рис. 6.3). Авторка пояснила такий характер залежності підсиленням електрон-фононної взаємодії при зменшенні товщини плівки в результаті прояву клясичного розмірного ефекту та спотворення фононного спектру для зразків малих розмірів, стверджуючи, що перший фактор (головним чином через поверхнєве розсіяння електронів) за

Фуксовою теорією обернено пропорційній товщині і дає більший внесок у температурну залежність питомого опору, але при цьому не навела кількісні оцінки внеску спотворення фононного спектру в зміну електроопору в порівнянні з розмірним ефектом, що було б переконливо.

І, нарешті, *останнє зауваження до чотирьох розділів дисертації — з третього до шостого (та й автореферату)*. Одержані експериментально результати стосовно електротранспортних властивостей в основному проінтерпретовано з огляду на Фуксів і Маядасів (відповідно, поверхневий і зерномежовий) механізми розсіювання електронів, хоча в здійснених дослідженнях товщини окремих шарів, розміри кристалітів і гранул у плівкових матеріалах мали нанометровий порядок величини, що могло стати передумовою діяння балістичного механізму електроперенесення. Цікаво, якими ж аргументами з цього приводу керувалася пані Л. В. Однодворець?

Але зазначу, що всі зауваження, яких наведено вище, мають, певніше, характер побажань стосовно оформлення вмісту дисертації та щодо врахування їх при майбутньому розвиванні обраного наукового напрямку і не можуть знизити загальної оцінки дисертаційної роботи.

Її авторка одержала *оригінальні і трудомісткі* наукові результати. Теоретичні моделі для п'єзорезистивного ефекту багатошарових металевих плівок і магнетного ТКО, яких застосовано в дисертаційній роботі пані Л. В. Однодворець, здаються мені цілком фізичними і забезпечують обґрунтованість сформульованих наукових висновків.

Вірогідність одержаних наукових результатів забезпечується: аналізом експериментальних даних для різного типу плівкових матеріалів; застосуванням сучасних метод формування і оброблення тонких плівок, експериментальних метод дослідження їхніх структури, фазового складу, дифузійних процесів і властивостей; комплексністю і повторюваністю результатів; кореляцією експериментальних даних і розрахункових оцінок.

Одержані дані уможливають сформулювати уявлення про механізми розсіювання електронів на поверхні, межах зерен, інтерфейсах плівок і фононах, процеси фазоутворення та дифузії, поглиблюють розуміння фізичних процесів і явищ у багатошарових та гетерогенних матеріалах мікроелектроніки і сенсорної техніки для практично актуальних наномасштабних функціональних матеріалів. Результати дисертаційної роботи можна використати для завбачення електрофізичних і магнеторезистивних властивостей наноматеріалів, адекватного трактування вже наявних експериментальних даних.

Практична цінність одержаних результатів також полягає у з'ясуванні фізичних процесів у реальних плівкових матеріалах в умовах фазоутворення, впливу нагрівання, деформації та магнетного поля на їхні функціональні властивості, а також у впровадженні відповідних знань у навчальний процес при викладанні дисциплін «Основи мікроелектроніки», «Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні», «Прилади та методи дослідження плівкових матеріалів» (зокрема, у Сумському державному університеті) при підготовці магістрів-спеціалістів з розроблення й експлуатації електронних приладів і пристроїв.

Використана у роботі метода пошарової конденсації з наступною термообробкою і застосовані авторкою дисертації в рамках напівфеноменологічного підходу моделі можуть бути відправними для подальшого розвитку фізики тонких плівок в таких установах МОН України як ХНУ ім. В. Н. Каразіна, НТУ «ХПІ», НТУ України «КПІ», а в НАН України — ІМФ ім. Г. В. Курдюмова, ІІМ ім. І. М. Францевича, ІФ, ННЦ «ХФТІ» при одержанні плівкових стопів з невпорядкованою або впорядкованою структурами в системах феромагнетик-шляхетний метал та феромагнетик-напівпровідник і задля прогнози властивостей плівкових матеріалів.

Дисертацію побудовано логічно, в основному написано науковою українською мовою і структуровано відповідно до вимог ДАК МОН України щодо оформлення дисертацій.

Результати дисертаційної роботи викладено в опублікованих працях, при-

наймі, в 26 статтях у фахових наукових журналах і збірниках наукових праць та колективній монографії, оприлюднено на багатьох міжнародних і вітчизняних конференціях.

Вміст і основні положення дисертації цілком і вірно відображено в авторефераті дисертації. (Хоча маю зазначити, що тут також часто-густо застосовано не найкращу українськомовну фізичну термінологію та жаргонові словосполучення, наприклад, «протікання процесів» замість «перебіг процесів» чи то «спливання процесів»).

ВИСНОВОК

Отже, дисертаційна робота пані Л. В. Однодворець є, певна річ, корисним кроком у з'ясуванні впливу дифузійних процесів, фазоутворення, розмірних і температурно-концентраційних ефектів на властивості чутливих елементів плівкових сенсорів на основі магнетних і немагнетних (у тому числі тяжкотопких) матеріалів, являє собою самостійне, завершене в цілому (у межах поставлених задач) дослідження.

За актуальністю обраної теми, кількістю, новизною та значущістю одержаних результатів, ступенем обґрунтованості й вірогідністю сформульованих висновків і рекомендацій, повнотою їх викладення в опублікованих працях дисертація «Електрофізичні і магніторезистивні властивості багатошарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки» задовольняє встановленим критеріям ДАК МОН України 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», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 із змінами (окрім п. 3), що внесені до постанов Кабміну України, затвердженими постановою Кабміну України від 12.09.2011 р. № 955). Тому я вважаю, що авторка дисертації, пані Лариса Валентинівна Однодворець, заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук із спеціальності 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем.

Заступник директора з наукової роботи
Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова
НАН України,
д-р фіз.-мат. н., проф.



В. А. Татаренко