

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ

На правах рукопису

КУДРЯВЦЕВ ІРИИ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 535.393:669.255

ОПТИЧНА ТА МАГНІТООПТИЧНА СПЕКТРОСКОПІЯ СТРУКТУРНО- ТА
МАГНІТНО-НЕВПОРЯДКОВАНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ
3d-ПЕРЕХІДНИХ МЕТАЛІВ

Спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ-1994



00756833 (W)

Інституті металофізики Національної академії наук України

Дисертація в рукописом

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор В.Б.МОЛОДКІН/ доктор фізико-математичних наук, професор І.А.ШАЙКЕВИЧ/ доктор фізико-математичних наук, професор А.І.СЕМЕНЕНКО.

Провідна організація: Інститут фізики металів УНЦ РАН, м.Екатеринбург, Росія

Захист дисертації відбудеться "28" 09 1994 р. о 14 годині на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради Д.016.37.01 при Інституті металофізики Національної Академії наук України (252680, Київ-142, пр. Вернадського, 36, конференц-зал Інституту металофізики НАН України).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту металофізики НАН України (252680, Київ-142, пр.Вернадського, 36)

Автореферат розісланий "28" 07 1994 р.

Вчений секретар Спеціалізованої Ради Д.016.37.01 кандидат фізико-математических наук Назар Е.Г.МАДАТОВА

B-30.621

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена розробці за допомогою методів оптичної та магнітооптичної спектроскопії уявлень про вплив різних форм атомного та спінового порядків на енергетичний спектр електронів сплавів на основі перехідних 3d-металів.

Актуальність теми дослідження Одне з провідних місць в сучасній фізиці твердого тіла займають дослідження властивостей неупорядкованих систем. Порядок в цьому випадку розуміється досить широко - як атомний, так і спіновий. Зацікавленість до вивчення таких систем обумовлена як потенційно широкими можливостями їх практичного використання (наприклад, аморфних металевих сплавів, металевих надструктур і т.і.), так і необхідністю розширення теоретичних уявлень про природу явищ в неупорядкованих системах.

Багато електронних властивостей металів та сплавів (магнітних, оптичних, електричних і т.і.) визначається їх енергетичним спектром електронів (ЕСЕ) який, в свою чергу, в значній мірі залежить від атомної структури, а також від характеру магнітного порядку. Таким чином, вивчення будови ЕСЕ упорядкованих систем та закономірностей його змін при структурному та магнітному розупорядкуванні є основою для розуміння багатьох фізичних властивостей структурно- та магнітно-неупорядкованих сплавів. Ця інформація також необхідна для розробки теоретичних уявлень та моделей, що описують різні види атомного та спінового порядків.

Відомо, що серед експериментальних методів дослідження електронної структури твердих тіл оптична та магнітооптична спектроскопії є одними з найбільш чутливих та прецизійних. Завдяки високому енергетичному розділенню, а також чутливості до локального атомного та спінового порядків ці методи знайшли широке застосування для вивчення впливу різних факторів на особливості енергетичного спектру електронів металів та сплавів.

При вивченні атомно-розупорядкованих систем умовно можна виділити наступні ступені структурного безпорядку. Можна вважати, що в сплавах до найменшої зміни симетрії кристалічної ґратки приводить перехід з упорядкованого в розупорядкований стан, при якому змінюється лише порядок заселення атомами вузлів

кристалічної ґратки, тобто змінюється так званий дальній атомний порядок. Різні поліморфні перетворення, наприклад ОЦК \rightarrow ГЦК, ГЦК \rightarrow ГЦУ і т.і., можуть приводити до зміни симетрії ґратки в більшому ступені. І, нарешті, як крайній ступінь структурного (атомного) розупорядкування можна розглядати перехід металів чи сплавів в аморфний стан.

Металеві надструктури або багат шарові металеві плівки є штучними утвореннями із специфічним порядком розташування атомних площин. Найбільш цікаві фізичні властивості таких структур виявляються тоді, коли товщини окремих шарів досягають значень порядку одиниць моношарів. Цікавим є вивчення впливу на результуючі електронні властивості таких металевих надструктур зменшення розмірності в окремих шарах (тобто 3D \rightarrow 2D перехід), взаємодії між шарами металів, а також існування та структури інтерфейсної області між окремими шарами.

Великий інтерес для розробки теорії, яка описує властивості магнетиків при кінцевих температурах, викликає вивчення структури магнітного стану, що виникає в парамагнітній області в особливому класі магнетиків - слабких зонних феромагнетиках. Згідно з сучасними теоретичними уявленнями [1,2] при переході з феромагнітного стану в парамагнітний в таких магнетиках можуть зберігатися області з локальним магнітним порядком, який руйнується при температурах, що значно перевищують температуру Кюрі. Є цікавим за допомогою методів оптичної та магнітооптичної спектроскопії провести експериментальну перевірку цих моделей.

Мета роботи Метою роботи є проведення за допомогою методів оптичної та магнітооптичної спектроскопії дослідження впливу різних видів атомного та спінового розупорядкування, а також специфічного атомного порядку, який створюється в металевих надструктурах або багат шарових плівках, на особливості енергетичного спектру електронів ряду сплавів на основі перехідних 3d-металів.

Для досягнення поставленої мети необхідно були вирішити наступні задачі:

1. Відпрацювати технологію одержання плівок металів та сплавів на основі 3d-перехідних металів в рівноважному та різних

метастабільних станах (розупорядкованому кристалічному, аморфному), а також приготування багатшарових плівкових структур.

2. Провести комплексне (з використанням результатів теоретичних розрахунків спектрів міжзонного оптичного поглинання відповідних сполук) дослідження оптичних властивостей впорядкованих та розупорядкованих сплавів на основі 3d-перехідних металів, спрямоване на встановлення закономірностей зміни енергетичного спектру електронів в таких сплавах при переході в розупорядкований кристалічний стан.

3. Провести вивчення закономірностей зв'язку атомної структури та оптичних властивостей, а також ЕРС аморфних сплавів на основі 3d-перехідних металів, в яких аморфний стан створювався за допомогою різних методів тонкоплівкової технології, а інформацію про структуру аморфного стану одержували як за допомогою традиційних, так і чутливих непрямих методів дослідження.

4. З'ясувати особливості формування оптичних та магнітооптичних властивостей ряду металевих багатшарових плівок на основі перехідних 3d - металів в залежності від товщини окремих шарів (впливу 3D → 2D переходу), взаємодії між шарами, а також існування перехідної інтерфейсної області між ними.

5. В широкій області температур, яка перекриває як феромагнітну, так і парамагнітну ділянки, провести вивчення впливу температури на особливості в спектрах оптичної провідності, що пов'язані з існуванням магнітного впорядкування, а також на магнітооптичні ефекти деяких сплавів, що є слабкими зонними феромагнетиками.

Наукова новітність роботи. В зв'язку з поставленими в роботі задачами вперше були отримані наступні результати.

1. На підставі аналізу результатів дослідження структури, а також оптичних властивостей зразків показано, що завдяки загартуванню із парової фази при вакуумному осадженні на охолоджувані рідкими гелієм або азотом підкладки можливо одержання сплавів на основі перехідних 3d-металів в дійсно аморфному чи розупорядкованому кристалічному станах.

2. Вперше інтерпретація змін енергетичного спектру електронів сплавів $Co_{0.50}Al_{0.50}$ та $Co_{0.50}Ga_{0.50}$ при переході із впорядкованого стану до невпорядкованого проведена на підставі

ідентифікації експериментально спостережуваних смуг міжзонного оптичного поглинання з переходами електронів між певними енергетичними зонами. Останнє стало можливим завдяки використанню результатів теоретичних розрахунків парціальних вкладів в міжзонну оптичну провідність сполук CoAl та CoGa .

3. Вперше показано, що в еквіатомних кристалічних сплавах Fe-Co , Co-Al та Co-Ga в області міжзонного оптичного поглинання перехід в атомно-невпорядкований стан приводить до зменшення інтенсивності, розширення та зміщення (переважно в низькоенергетичній бік спектра) смуг міжзонного поглинання. Ці явища є відображенням розширення енергетичних зон, що приймають участь в формуванні полос міжзонного поглинання, та зміни енергетичного інтервалу між ними. Найбільшою зміни зазнають зони, що розташовані поблизу рівня Фермі. В деяких випадках перехід до розупорядкованої фази може супроводжуватися зникненням окремих смуг міжзонного поглинання, характерних для впорядкованого кристалічного стану сплаву. Такий процес є проявом зникнення надструктурних щілин в енергетичному спектрі електронів при зниженні симетрії кристала.

4. Показано, що для всіх сплавів, що досліджувались в роботі, перехід в розупорядкований кристалічний стан приводить до зменшення провідності, обумовленої вільними електронами, що є наслідком як збільшення процесів їх розсіювання, так і зменшення їх рухливості.

5. На прикладі сплавів на основі кобальта та заліза показано, що в одних і тих же сплавах можуть бути одержані різні структурні стани, що реєструються за допомогою традиційних методів дослідження структури як аморфні, для яких в області міжзонного поглинання характерні суттєво різні оптичні властивості. Причину такої розбіжності ми пов'язуємо з різницею в структурі ближнього порядку. В тих випадках, коли кристалічний та рентгеноаморфний стани мають близькі оптичні властивості в області міжзонного поглинання, останній структурний стан має таку ж структуру ближнього порядку, яка властива кристалічній фазі.

6. Вперше показано, що перехід в аморфний стан також (як і у випадку переходу "порядок-безпорядок") приводить до зменшення рухливості електронів провідності.

7. Вперше показано, що оптичні властивості аморфних сплавів Co-Zr, що мали склад близький до еквіатомного, в яких аморфний стан одержаний за допомогою різних способів, можуть бути суттєво різними. Причина такої розбіжності пов'язується з різною структурою ближнього порядку цих аморфних сплавів.

8. Вперше показана можливість використання методу оптичної спектроскопії для реєстрування тонких змін в структурі аморфних сплавів при їх структурній релаксації, які не завжди можна зафіксувати традиційними методами дослідження.

9. На прикладі багат шарових плівок Tb/Fe та Cu/Fe показано, що проведення експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання їх оптичних властивостей дозволяє вибрати модель, що адекватно описує реальну структуру границі розподілу між шарами, а також зробити оцінку розміру інтерфейсної області.

10. Вперше показано, що зменшення розмірності феромагнітного металу в багат шарових плівках приводить до змін його магнітооптичних параметрів в порівнянні із масивним станом, що пов'язується із зміною величини енергії обмінного розщеплення.

11. В багат шарових плівках Co/Pd виявлено додаткове, в порівнянні з чистим кобальтом, магнітооптичне поглинання, яке проявляє немонотонну залежність від товщини шарів паладію. Це явище пов'язується з поляризацією шарів паладія під впливом (взаємодією) шарів кобальту.

12. Вперше на прикладі сплавів Fe_2P та Ni_3Al експериментально показано, що в слабких зонних феромагнетиках в парамагнітній області зберігаються області з локальним магнітним порядком, який має таку ж структуру, як і в магнітовпорядкованому феромагнітному стані. Руїнування локального магнітного порядку відбувається при температурах, що на 200 - 300 К перевищують T_C для цих сплавів, і супроводжується зміною їх магнітних, магнітооптичних та оптичних властивостей.

Наукова та практична цінність одержаних результатів

Підсумком експериментальних досліджень впливу перетворень порядок-безпорядок в кристалічних сплавах Fe-Co, Co-Al та Co-Ga на їх оптичні властивості є одержані закономірності змін, що відбуваються в енергетичному спектрі електронів таких сплавів. Крім того, завдяки порівнянню результатів теоретичних розрахунків

спектрів міжзонного поглинання впорядкованих фаз цих сплавів з експериментальними даними, створюються умови для перевірки як результатів розрахунків, так і досконалості поверхні зразків.

Встановлені експериментально закономірності формування оптичних властивостей сплавів в аморфному стані як в області міжзонного, так і внутризонного поглинання, дозволяють одержати уявлення про особливості ЕСЕ таких станів.

На підставі одержаних результатів дослідження оптичних властивостей аморфних плівок сплавів на основі перехідних 3d-металів відкриваються нові сфери практичного застосування методу оптичної спектроскопії в області міжзонного поглинання для реєстрації тонких змін в структурі ближнього порядку в металах та сплавах при різних структурних перетвореннях.

В результаті дослідження особливостей оптичних та магнітооптичних властивостей багат шарових металевих плівок одержані відомості про вплив товщини окремих шарів, існування інтерфейсної області, взаємодії між ними на результуючі характеристики таких плівок. Це створює сприятливі умови для розуміння фізики процесів в таких системах та їх практичного використання.

В результаті дослідження залежності від температури оптичних та магнітооптичних властивостей деяких слабких зонних феромагнетиків одержані відомості, що представляють інтерес для розробки моделей, які описують поведінку таких магнетиків в широкій області температур.

На захист виносяться такі положення:

1. Втрата дальнього атомного порядку в кристалічних сплавах на основі перехідних 3d-металів приводить до розширення енергетичних зон, що приймають участь в утворенні смуг міжзонного поглинання, зміні енергетичного інтервалу між ними, що і обумовлює зміну оптичних властивостей сплавів. Зменшення провідності, обумовленої вільними електронами, що спостерігається при цьому, пов'язано як із збільшенням розсіювання електронів провідності, так і з зменшенням їх рухливості.
2. Оптичні властивості та енергетичний спектр електронів аморфних плівок сплавів на основі 3d-перехідних металів можуть суттєво змінюватися в залежності від методу їх одержання, що обумовлено

змінами в структурі ближнього атомного порядку, а також відрізнитися від властивостей та ЕСЕ дрібнокристалічних сплавів.

3. Зменшення розмірності феромагнітного металу в багат шарових металевих плівках приводить до змін його магнітооптичних параметрів і, як наслідок, до змін магнітооптичних властивостей всієї плівки. Крім цього фактора взаємодія між шарами може приводити до змін магнітооптичних параметрів немагнітного металу, що також впливає на результуючі магнітооптичні властивості багат шарових плівок ПМ/ЕМ.

4. Перехід чере температуру Кюрі в слабких зонних феромагнетиках не супроводжується зміною температурної залежності величини екваторіального ефекту Керра та особливостей в спектрі оптичної провідності, які пов'язані з існуванням феромагнітного порядку. Цей факт пояснюється збереженням в парамагнітній області такого ж локального магнітного порядку, який існував і в феромагнітній фазі.

5. Експериментальні спектри оптичної провідності мають достатню чутливість та інформативність для реєстрації тонких структурних змін в сплавах на основі 3d-перехідних металів, викликаних структурною релаксацією аморфних сплавів, при перетвореннях типу "порядок-беспорядок" в кристалічних сплавах, аналізу розміру та структури інтерфейсної області, яка виникає між шарами металів при формуванні багат шарових металевих структур.

Особистий внесок автора Дисертація є узагальненням результатів досліджень, які були виконані особисто автором, безпосередньо під його керівництвом або за участю ряду співробітників. В останньому випадку співавторам не належали ідеї, що знайшли своє відображення в дисертації. Безпосередньо автор особисто приймав участь в постановці задач робіт 2 - 6, 8, 9, 11, 13, 15, 16, 18 - 25 (див. список публікацій в кінці автореферату); готував зразки для досліджень в роботах I-5, 7-9, 21 и 24; проводив експериментальні вимірювання оптичних, магнітооптичних, електричних, гальвано-магнітних властивостей зразків в роботах I-12, I4, I5, I7-I9, 2I, 24-26; проводив вимірювання спектрів ЯМР в роботі I; проводив вимірювання температурних залежностей магнітного моменту зразків в роботах I3 і I6; проводив обробку експериментальних даних та обчислення на їх основі різних фізичних характеристик зразків,

що досліджувалися в роботах I-12, 14, 15, 17, 18, 22-26; автор приймав участь в обговоренні результатів та оформленні всіх робіт.

Апробація роботи Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на наступних конференціях та семінарах:

- II і IV Всесоюзних конференціях "Эллипсометрия - метод исследования поверхности твердых тел", Новосибірськ, 29 червня - 1 липня 1981; Новосибірськ, 19-21- липня 1989р.;
- III Всесоюзному семінарі з аморфного магнетизму, Самарканд, 13-17 травня 1982р.;
- XVI, XVII і XVIII Всесоюзних конференціях з фізики магнітних явищ (Тула 1983 р.; Донецьк, 24-27 червня 1985 р.; Калінін 3-6 жовтня 1988р.;
- VI, VII, VIII і XII Республіканських семінарах "Оптика та спектроскопія в народному господарстві" Луцьк - 1984; Одеса - 1985; Луцьк - 1986, Мелітополь - 1990 р.;
- VI Всесоюзній науково-технічній конференції "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение", Москва, 1986 р.;
- X Всесоюзній школі-семінарі "Новые магнитные материалы для микроэлектроники", Ташкент, 1988 р.
- Міжвузівській конференції з магнітооптики, Московська обл., Лісові поляни, січень 1988 р.;
- V Всеросійській координаційній нараді вузів з фізики магнітних матеріалів, Астрахань, 18-22 вересня 1989 р.;
- Республіканському міжвузівському семінарі "Актуальные проблемы физики твердого тела, радиофизики и теплофизики", Ашхабад, 1991
- Міжнародному симпозиумі з ультратонких та багат шарових плівок та поверхонь, Ліон, Франція, 7-10 вересня 1992;
- Міжнародному семінарі "Многослойные металлические пленки - физические явления и свойства", Київ, 11-17 травня 1992;
- Республіканській нараді з наукового приладобудування, Морське, Крим, 28 вересня - 4 жовтня 1992;
- I Міжнародній конференції з спектроскопічної еліпсометрії, Париж, Франція, 11-14 січня 1993;
- Європейській конференції з фізики магнетизму, Познань, Польща, 21- 24 червня 1993;
- Міжнародній Європейській конференції з фізики магнітних

матеріалів та їх застосуванню, Кошице, Словачія, 24-27 серпня 1993.,

а також на наукових семінарах Інституту металофізики АН України.

Публікації. За результатами дисертації опубліковано 26 друкованих робіт у вітчизняних та зарубіжних виданнях, список яких наведено в кінці автореферату.

Об'єм та структура дисертації Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, надрукована на 323 сторінках машинописного тексту, має 95 малюнків, 9 таблиць та списку літератури, що використовувалася.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується вибір напрямку досліджень, показана актуальність теми, сформульовані мета та задачі роботи, визначені об'єкти досліджень та методи їх проведення, відображена наукова новітність одержаних результатів, наведені положення, що виносяться на захист.

Перший розділ носить методичний характер. Його перший параграф присвячений аналізу інформації про енергетичний спектр електронів в металах, яку можна одержати за допомогою експериментальних методів оптичної та магнітооптичної спектроскопії, а другий - опису методів експериментального визначення оптичних сталей металів та магнітооптичних ефектів, що використовувалися в роботі.

Оптичні сталі зразків вимірювали за допомогою методу Бітті, а магнітооптичні характеристики (частотні залежності величини екваторіального ефекту Керра) - динамічним способом .

В дисертаційній роботі вивчення впливу атомного розупорядкування на фізичні властивості металів та сплавів було проведено на тонкоплівкових зразках. В зв'язку з чим в третьому параграфі першого розділу розглянуті переваги та недоліки (в порівнянні з масивними зразками) тонкоплівкової технології приготування поверхні зразків для дослідження їх оптичних та магнітооптичних властивостей. Відмічається, що для одержання надійних результатів при вивченні оптичних властивостей тонкоплівкових зразків, їх приготування та дослідження необхідно проводити в умовах надвисокого вакууму. Метастабільні структурні

стани в металах та сплавах в роботі одержували переважно за допомогою гартування з парової фази при вакуумному осадженні плівок на охолоджувані рідкими гелієм або азотом підкладки.

Для реалізації поставлених в роботі задач були створені дві установки, в яких обладнані пристроями для осаджування плівок металів та сплавів (в одному випадку це були два електронно-променеві випаровувача з відхиленням променя на 180° , а в іншому - пристрій для одержання плівок за допомогою методу "спалаху") надвисоковакуумні камери, були зчленені з автоматичними спектральними еліпсометром та магнітоеліпсометром. В обох установках на верхньому фланці НВВ камери були змонтовані гелійові кріостати, до гелійової порожнини яких можна було закріплювати підкладку для осадження на неї плівок або готовий зразок. Такий підхід дозволяв проводити одержання плівок металів та сплавів в вакуумі близько $1 \cdot 10^{-7}$ Па на підкладки, температура яких могла змінюватися в інтервалі 10-700 К, та без порушення вакууму після приготування зразків в широких спектральному (0.25 - 2.5 мкм) та температурному інтервалах проводити визначення їх оптичних сталих та магнітооптичних властивостей. Опису цих установок і присвячений четвертий параграф першого розділу.

Вивчення структури плівкових зразків як в початковому стані, так і на різних ступенях структурних перетворень, проводили за допомогою як традиційних методів дослідження (рентгенівська або електронна дифракція), так і в ряді випадків за допомогою методу ЯМР-спектроскопії. Хімічний склад зразків, що досліджувалися, визначали за допомогою методу рентгенівської флуоресценції.

Другий розділ дисертації присвячений викладенню результатів дослідження впливу перетворення "порядок-безпорядок" в плівках упорядкованих екіатомних сплавів Fe-Co, Co-Al та Co-Ga на їх оптичні властивості та ЕСЕ. Відмінною особливістю наших досліджень від існуючих в літературі є те, що інтерпретація спектрів міжзонної оптичної провідності $\sigma_{МЗ}(\hbar\nu)$ впорядкованих фаз всіх сплавів, що досліджувалися, проводилась на підставі порівняння експериментальних даних з результатами теоретичних розрахунків $\sigma_{МЗ}(\hbar\nu)$ відповідних сполук. Завдяки такому підходу з'явилась можливість співставити окремі смуги міжзонної

провідності з переходами електронів між певними енергетичними зонами. Ці обставини дозволили проводити аналіз еволюції ЕСЕ (тобто змін енергетичних інтервалів між певними енергетичними зонами), викликаних переходом сплаву з упорядкованого стану в розупорядкований, шляхом аналізу змін, що відбуваються в спектрах міжзонного поглинання. При цьому вважалося, що природа смуг міжзонного поглинання в обох структурних станах однакова.

В § 4.2 - 4.4 наведені результати експериментального дослідження оптичних властивостей згаданих вище сплавів як в області внутризонного, так і міжзонного поглинання. Слід зауважити, що подати формування впорядкованої фази в сплаві $\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$ вдалося лише завдяки гартуванню при вакуумному осаджуванні на охолодженні рідким гелієм мідні підкладки, реальна температура поверхні яких складала ІОК.

В роботі показано, що спектри оптичної провідності (ОП) всіх досліджених в роботі сплавів мають досить складну структуру, утворену за рахунок суперпозиції досить великої кількості смуг міжзонної провідності, а також, що втрата дальнього атомного порядку η в цих сплавах суттєво відбивається на спектрах ОП (див. напр. рис.1)

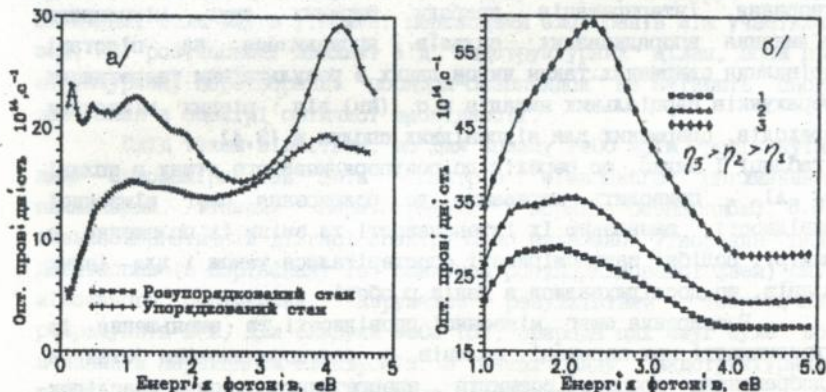


Рис.1. Оптична провідність плівок сплавів $\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$ (а) і $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$ (б), що знаходяться в упорядкованому та розупорядкованому станах.

З метою найкращої ідентифікації експериментальних та отриманих шляхом теоретичних розрахунків із перших принципів смуг міжзонної оптичної провідності, а також для коректного проведення аналізу змін в ЕОЕ, що виникають внаслідок перетворення "порядок-безпорядок", в роботі був проведений розклад експериментальних спектрів на складові частини, тобто були виділені окремі полоси міжзонної провідності та визначений внутризонний вклад.

Суть проведеної процедури складалася в мінімізації функціоналу, який уявляв собою суму квадратів різниць між експериментальними значеннями оптичної провідності та суми вкладів від полос міжзонного поглинання та внутризонного вкладу в кожній точці спектру. При цьому полоси міжзонного поглинання описувалися за допомогою несиметричної гаусіани, а внутризонний вклад - за допомогою формули Друде. Як приклад, в таблиці I наведені значення параметрів, за допомогою яких можна описати експериментальні спектри оптичної провідності для впорядкованої та розупорядкованої фаз сплаву $\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$ ($h\nu$ - положення максимуму в еВ, I - інтенсивність в одиницях $I \cdot 10^{-14}$, с^{-1} , G - параметр, який визначає напівширину полоси), а також механізм їх утворення. Інтерпретація природи окремих смуг міжзонного поглинання впорядкованих сплавів проводилася на підставі порівняння одержаних таким чином даних з результатами теоретичних розрахунків парціальних вкладів в $\sigma_{\text{МЗ}}(h\nu)$ від різних міжзонних переходів, одержаних для відповідних сполук в [3,4].

З таблиці I видно, що перехід до розупорядкованого стану в сплаві $\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$ приводить переважно до розширення смуг міжзонної провідності, зменшенню їх інтенсивності та зміни їх положення в спектрі. Подібні закономірності спостерігалися також і для інших сплавів, що досліджувалися в даній роботі.

Розширення смуг міжзонної провідності та зменшення їх інтенсивності при переході сплавів в розупорядкований стан є відображенням процесу розмиття енергетичних зон внаслідок хаотичного населення атомами вузлів кристалічної ґратки. Зміна положення максимумів смуг міжзонної оптичної провідності в спектрах ОП обумовлена деформацією відповідних енергетичних зон сплаву внаслідок склопущення "надструктурних" щільня. Знання

механізму утворення конкретної смуги дозволяє проаналізувати дисперсійні залежності $E(k)$ для відповідних зон, визначити

Таблиця I

Положення, інтенсивність та напівширина полос міжзонного поглинання в експериментальних спектрах оптичної провідності пл'вок сплаву $\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$, а також механізм їх утворення

Упоряд. стан			Розупоряд. стан			Механізм утворення полос МЗП згідно [3] (цифри показ. № зон, між якими відбуваються переходи електронів
$h\nu_0$	I	G	$h\nu_0$	I	G	
0.16	15.2	0.50	0.30	7.2	0.57	
0.45	3.3	0.44	0.54	5.1	0.46	
0.69	0.9	0.15	0.80	2.1	0.80	5 → 6 + 6 → 7
1.12	22.5	1.21	1.12	12.3	1.43	6 → 7
1.87	1.3	0.55	1.60	0.8	0.54	5 → 7
2.87	5.6	1.10	2.43	4.5	1.66	7 → 8
4.20	28.0	1.90	4.00	19.4	3.35	2 → 7

участок, який дає найбільший вклад в поглинання, і зрозуміти причину зміщення цієї смуги в ту чи іншу сторону спектру. В тих випадках, коли смуги утворені переходами електронів між участками зон, які розташовані вдалині від "надструктурних" щілин, вони при структурному перетворенні "порядок-безпорядок" не змінюють свого положення в спектрі оптичної провідності.

Слід також відмітити, що для сплаву FeCo крім розглянутих вище закономірностей змін спектрів міжзонного поглинання, викликаних атомним перетворенням "порядок-безпорядок", в низькоенергетичній ділянці спектру було виявлено утворення ряду додаткових (в порівнянні із спектром розупорядкованої фази) смуг міжзонного поглинання. Керуючись результатами теоретичних розрахунків $E(k)$ для сполуки FeCo [5], природа цих смуг була пов'язана з переходами електронів в межах ряду "надструктурних" щілин, які з'являються в ЕОЕ біля рівня Фермі.

Перехід з впорядкованого стану в розупорядкований в сплавах, що досліджувалися, приводив до суттєвої зміни оптичної провідності, обумовленої вільними електронами. Завдяки обробці

експериментальних даних, одержаних в інфрачервоній області спектру, стало можливим визначити важливі параметри, які описують поведінку вільних електронів - частоти їх релаксаційних (γ) та плазмових (Ω) коливань, а також розрахувати $\rho_{\text{опт.}} = 1/\sigma(0)$ (див. табл. 2).

Таблиця 2

Значення мікрохарактеристик електронів провідності сплавів $\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$, $\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$, $\text{Co}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$, які знаходяться в упорядкованому та розупорядкованому станах.

Характеристика	$\gamma \cdot 10^{14}, \text{с}^{-1}$		$\Omega_p, \text{эВ}$		$\rho_{\text{опт. розуп}} / \rho_{\text{опт. уп.}}$
	П	БП	П	БП	
$\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}$	0.43	0.90	25.5	16.4	3.25
$\text{Co}_{0.5}\text{Al}_{0.5}$	0.46	0.60	18.7	5.9	4.13
$\text{Co}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}$	0.50	0.52	22.7	16.5	1.43

П - упорядкований стан, БП - розупорядкований стан

Видно, що перехід з упорядкованого стану в розупорядкований приводить до зменшення провідності, обумовленої вільними електронами. Причина такого зменшення пов'язана як із збільшенням процесів їх розсіювання (рост γ), так і з зменшенням їх рухливості. Діясно, відомо, що для вільних електронів можна записати

$$\Omega_p^2 = \frac{8\pi e^2}{3W} \sum_{\alpha k} v_{\alpha k}^2 \delta(E_{\alpha k} - E_F) \quad (1)$$

де підсумування ведеться по всім станам αk в кристалі, що має об'єм W , $v_{\alpha k}$ - швидкість електрона в стані αk . Із співвідношення (1) слідує, що частота плазмових коливань прямо пропорційна модулю швидкості електронів, що приймають участь в оптичному поглинанні, тобто їх рухливості.

В третьому розділі дисертації приведені результати досліджень особливостей оптичних властивостей та ЕОЕ ряду аморфних сплавів на основі перехідних 3d-металів. Аморфний стан в сплавах що досліджувалися, одержували за допомогою різних методів тонкоплівкової технології, а саме: гартуванню з парової

фази при вакуумній конденсації на охолоджуванні рідкими гелієм або азотом підкладки (сплави $\text{Co}_{0.67}\text{Ge}_{0.33}$ та $\text{Fe}_{0.70}\text{Ge}_{0.30}$), електролітичного осаджування (сплави $\text{Co}_{1-x}\text{W}_x$, $\text{Co}_{0.80}\text{P}_{0.20}$ та $\text{Co}_{0.82}\text{B}_{0.18}$), реакції, що проходить в твердій фазі при відпалі багаточарових полікристалічних плівок (системи Co/Zr та Fe/Zr), а також при співосадженні компонентів сплаву (сплави $\text{Co}_{1-x}\text{Zr}_x$ та $\text{Tb}_{0.24}\text{Fe}_{0.76}$).

При проведенні даних досліджень особливу увагу приділяли одержанню додаткової інформації про тонку атомну структуру аморфного стану за допомогою нетрадиційних методів, які базуються на вивченні таких властивостей металів та сплавів, на формування яких вирішальний вплив має хімічний та позиційний порядок атомний порядок в районі перших координаційних сфер, а саме методу ЯМР-спектроскопії.

Метастабільні стани в плівках сплаву $\text{Co}_{0.67}\text{Ge}_{0.33}$, які рееструктуряться за допомогою електронно-мікроскопічних методів дослідження як аморфні, одержували за допомогою гартування з парової фази при вакуумній конденсації на охолоджуванні рідкими азотом (стан А1) та гелієм (стан А2) підкладки. В останньому випадку температура мідних підкладок перед початком конденсації складала 10 К, і ми сподівалися, що при такому способі приготування можливе одержання максимально розупорядкованих структур. Рівноважний кристалічний стан, що відповідає сполуці Co_2Ge , був одержаний при конденсації на скляні підкладки при температурі 520К. З приведених на рис. 2. даних видно, що два аморфних стани (А1 та А2) мають суттєво різні спектри ОП, причому оптичні властивості плівок сплаву $\text{Co}_{0.67}\text{Ge}_{0.33}$ в стані А1 майже не відрізняються від властивостей кристалічної фази. Для цих станів спектри ОП сплаву $\text{Co}_{0.67}\text{Ge}_{0.33}$ мають інтенсивну смугу міжзонного поглинання, розташовану в районі 0.62 еВ, природа якої, як ми вважаємо, близька до природи фундаментальної полоси поглинання чистого Co .

З нашої точки зору, причина суттєвої різниці оптичних властивостей двох аморфних станів (А1 та А2) пов'язана із різницею в структурі ближнього порядку цих фаз - в стані А1 зберігається ближній порядок, властивий кристалічній фазі, тоді як в стані А2 формується якийсь інший від розглянутих вище

Зменшення порядку.

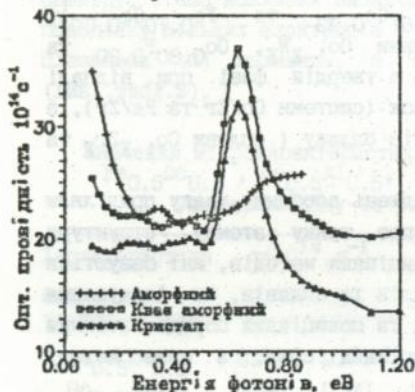


Рис.2 Спектри оптичної провідності аморфної (A2), псевдокристалічної (A1) та кристалічної (K) фаз сплаву $Co_{0.67}Ge_{0.33}$

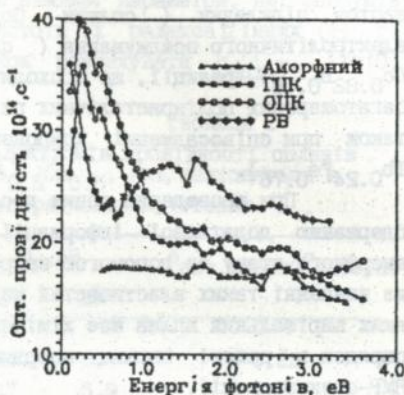


Рис.3. Спектри оптичної провідності аморфної (I), OQC-(2), ГЦК-(3) и PB (4) фаз сплаву $Fe_{0.7}Ge_{0.3}$.

Можливості тонкоплівкової технології для формування різних структурних станів в зразках були проілюстровані на прикладі сплаву $Fe_{0.70}Ge_{0.30}$. Завдяки зміні температури підкладки під час конденсації плівок ($T_{\text{підкл.}} = 70, 130 \text{ и } 520 \text{ K}$), а також температури наступної термообробки плівки цього сплаву могли бути одержані в аморфному, OQC-, ГЦК- та рівноважному (PB) станах. Видно, що атомна структура суттєво впливає на оптичні властивості цього сплаву (див.рис.3). Якщо кубічні OQC- та ГЦК-фази мають практично однакові спектри ОП, то спектр ОП PB-фази істотно відрізняється від них - відсутня смуга міжзонного поглинання в ІЧ-ділянці спектра, а в видимій області проявляється інтенсивна смуга міжзонного поглинання. Зникнення періодичності кристалічної ґратки при переході в аморфний стан приводить до різкого зменшення провідності в ІЧ-області спектра. При цьому слабкі смуги, які розташовані в видимій області спектра, практично не міняються. Останній факт може свідчити про те, що перехід в аморфний стан в сплав $Fe_{0.70}Ge_{0.30}$ сильніше впливає на енергетичні стани, що розташовані біля рівня Фермі, тоді як більш

глибоко розташовані зони змінюються в меншому ступені.

Оптичні властивості зразків, в яких аморфний стан був одержаний за допомогою електролітичного осаджування плівок, вивчали на прикладі сплавів $Co_{1-x}W_x$ ($x=0.15, 0.20$ и 0.23), $Co_{0.82}W_{0.18}$ та $Co_{0.80}W_{0.20}$. При проведенні цих досліджень додаткову інформацію про структуру зразків як в початковому стані, так і після різних стадій відпалу одержували за допомогою методу ЯМР-спектроскопії.

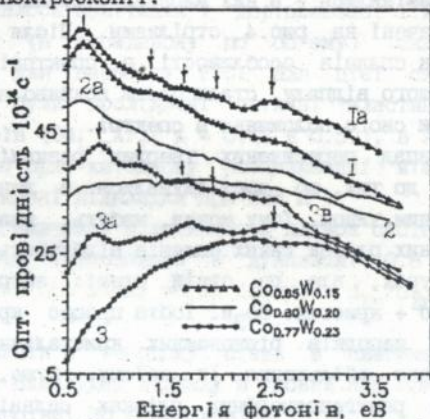


Рис. 4 Спектри оптичної провідності плівок сплавів $Co_{1-x}W_x$ в початковому стані (I - $Co_{0.85}W_{0.15}$, 2 - $Co_{0.80}W_{0.20}$, 3 - $Co_{0.77}W_{0.23}$) а також після відпалу при 573 К (Ia, 2a и 3a) и 773 К (3b). Для зручності відображення криві дещо зсунуті по осі σ .

Після приготування плівки всіх вивчених в роботі сплавів $Co_{1-x}W_x$ знаходилися в рентгеноаморфному стані, але мали суттєво різні спектри ЯМР та оптичної провідності. Спектри ЯМР та ОП плівок сплаву $Co_{0.85}W_{0.15}$ мали багато спільного з відповідними спектрами кристалічного кобальту (особливо для спектрів ЯМР), а кристалізація сплаву незначним чином проявилась на них - в спектрах ОП більш виразливо проявились особливості, розташовані у видимій ділянці спектру (порівн. криві I та Ia на рис.4). Цей факт можна пояснити тим, що в початковому стані плівки цього сплаву не є однорідними - в них існують області, збагачені Co, а також області із структурою ближнього порядку, що характерна до

вакристиалізованого стану сплаву.

Принципово різними від розглянутих вище є спектри ОП та ЯМР для плівок сплавів $Co_{1-x}W_x$ ($x=0.20$ і 0.23), що знаходяться в початковому стані. В спектрах ОП (та ЯМР) спостерігається лише один безструктурний максимум без помітних особливостей на ньому. Відпал при температурі 573 К згідно рентгеноструктурним даним не приводив до кристалізації плівок. Але внаслідок такого відпалу спектри ОП помітно змінилися – в них виразливо стали проявлятися особливості, що означені на рис.4 стрілками. Після остаточної кристалізації плівок сплавів особливості в спектрах ОП, що з'явилися після першого відпалу, стали більш яскраво вираженими і практично не змінили свого положення в спектрі.

Відомо, що розпад пересичених твердих розчинів $Co_{1-x}W_x$, склади яких близькі до тих, що досліджувалися в даній роботі, проходить евтектоїдним чином. Тому можна, мабуть, вважати, що і кристалізація аморфних плівок таких сплавів відбувається хоча і при різних температурах, але по одній схемі: аморфний сплав $Co_{1-x}W_x \rightarrow$ кристал. Co + кристал. Co_3W . Тобто процес кристалізації складається з появи зародків рівноважних кристалічних фаз Co і Co_3W та поступового збільшення їх об'єму. Отже, внаслідок відпалу при 573 К в рентгеноаморфних плівках сплавів $Co_{1-x}W_x$ ($x=0.20$ і 0.23) відбулася структурна релаксація до більш рівноважного стану, і в плівках з'явилися області з такою ж структурою близького порядку, яка характерна для Co та Co_3W , розмір яких не дозволив їх зареєструвати традиційними методами дослідження структури. Процес кристалізації плівок сплавів, що вже реєструється рентгеноструктурними методами, пов'язаний із збільшенням розмірів областей, які мають структуру ГЦК- Co та Co_3W .

Грунтуючись на властивості адитивності вкладів в ОП багатофазної системи від різних фаз, був виділений спектр ОП кристалічної фази Co_3W та проведено його порівняння з спектром ОП сплаву $Co_{0.77}W_{0.23}$. Показано, що спектр ОП аморфної фази найбільш близького по складу до стехіометричного аморфного сплаву $Co_{0.77}W_{0.23}$ може бути промодельований шляхом "розмиття" спектра ОП кристалічної фази Co_3W . Отже, і ЕСЕ аморфної фази цього сплаву може бути промодельований шляхом "розмиття" ЕСЕ фази Co_3W .

При вивченні аморфних сплавів $\text{Co}_{0.82}\text{Zr}_{0.18}$ та $\text{Co}_{0.80}\text{Zr}_{0.20}$ в роботі були виявлені подібні закономірності впливу структурної релаксації та кристалізації на оптичні властивості та спектри ЯМР, що і для сплавів $\text{Co}_{1-x}\text{W}_x$.

Особливості оптичних властивостей та ЕОЕ аморфного стану, який був одержаний шляхом реакції в твердому стані (РТС), вивчали на прикладі систем Co/Zr і Fe/Zr . В плівках Co/Zr в широких межах змінювалися товщини шарів, однак при цьому їх співвідношення завжди залишалося постійним і дорівнювало 1:2, що відповідало еквіатомному (в середньому по об'єму) складу - найбільш сприятливому для перебігу РТС. Для цієї системи, як зразки порівняння, були досліджені оптичні властивості близьких по складу сплавів ($\text{Co}_{1-x}\text{Zr}_x$, $x = 0.42$ і 0.59), в яких аморфний стан був одержаний при катодному розпилюванні мішеней відповідного складу на скляні підкладки при 293 К.

При вивченні властивостей плівок системи Fe/Zr товщини окремих шарів змінювались в діапазоні 0.6 - 20 нм, а їх співвідношення при цьому могло складати $d_{\text{Fe}}/d_{\text{Zr}} = 2:1, 1:1, 1:2$ і $1:4$.

Реакція в твердому стані в системах Co/Zr і Fe/Zr активувалася внаслідок відпаду в умовах НВВ при температурах 573 - 620 К на протязі 30 - 240 хвилин.

На рис. 5 наведені спектри ОП багат шарових плівок Co/Zr в початковому стані та після РТС, а також спектри ОП аморфних плівок сплавів $\text{Co}_{1-x}\text{Zr}_x$ ($x=0.42$ і 0.59). Видно, що форма спектрів ОП сплавів близького складу, в яких аморфний стан був одержаний за допомогою різних методів, суттєво відрізняється. З метою з'ясування природи спектрів оптичної провідності сплавів $\text{Co}-\text{Zr}$ в роботі з перших принципів був проведений розрахунок спектру $\sigma_{\text{МЗ}}(\text{лн})$ кристалічної сполуки CoZr , яка мала структуру CsCl . На підставі подібності спектрів ОП кристалічної сполуки CoZr та аморфних плівок сплавів $\text{Co}_{0.50}\text{Zr}_{0.50}$, в яких аморфний стан був отриманий шляхом РТС, випливає висновок про те, що структура ближнього порядку в таких аморфних плівках близька до типу CsCl . Суттєва розбіжність оптичних властивостей аморфних плівок сплавів $\text{Co}_{1-x}\text{Zr}_x$ ($x = 0.42$ і 0.59) від розглянутих вище свідчить про те, що під час приготування аморфних плівок шляхом катодного

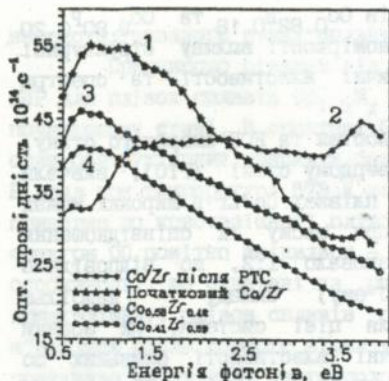


Рис.5

Спектри ОП плівок Co/Zr в початковому стані (1), після PTC (2), а також плівок сплавів $\text{Co}_{0.58}\text{Zr}_{0.42}$ (3) та $\text{Co}_{0.58}\text{Zr}_{0.42}$ (4)

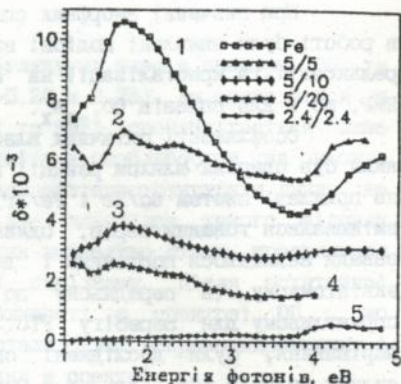


Рис.6

Спектри ЕКР плівок Fe/Zr в початковому стані: 1-Fe; 2- 5nmFe/5nmZr; 3-5/10; 4-2/20; 5-2.4/2.4

розпилювання мішеней в них формується інший від CsCl ближній порядок.

При дослідженні процесів, що протікають під час PTC в багат шарових плівках, одним з елементів яких є феромагнітний метал, слід відзначити інформативність методу магнітооптичної спектроскопії. Так, наприклад, в результаті дифузії компонентів може змінитися як концентрація чистого феромагнітного металу, так і хімічний та позиційний порядок в феромагнітних фазах, які утворюються на початкових стадіях PTC. Всі ці процеси можуть взяти своє відображення в зміні спектрів магнітооптичних ефектів.

На відміну від системи Co/Zr, в багат шарових плівках Fe/Zr PTC протікає при кімнатній температурі в процесі приготування багат шарових структур. Аморфна фаза утворюється в інтерфейсній області і її об'ємний зміст тим більше, чим менше номінальна товщина окремих шарів, яка задається при осаджуванні. Цей факт можна зареєструвати як за допомогою структурних методів дослідження, так і по різкій зміні залежності від товщини шарів оптичних, магнітооптичних та магнітних властивостей плівок (див.

напр.рис.8). Крім цього результати комп'ютерного моделювання спектрів екваторіального ефекту Керра (ЕЕК) для багатшарових структур (БШС) Fe/Zr, проведених для моделі з різкими границями розподілу шарів, задовільно корелюють з експериментальними даними тільки для БШС з "товстими" шарами (більш ніж 2 нм) і суттєво відрізняються для БШС з "тонкими" шарами.

Таким чином, на підставі результатів проведених досліджень властивостей аморфних плівок на основі перехідних 3d-металів можна зробити наступні висновки:

1. Метод одержання аморфного стану може суттєво впливати на структуру ближнього порядку і, відповідно, на властивості сплавів.

2. Оптичні властивості та ЕСЕ дійсно аморфного стану якісно відрізняються від аналогічних характеристик дрібнокристалічного стану.

3. В тих випадках, коли склад аморфного сплаву відповідає стехіометрії кристалічної фази сплаву, ЕСЕ аморфного стану може бути змодельований шляхом "розмиття" відповідного ЕСЕ кристалічної фази.

4. Оптична та магнітооптична спектроскопія є чутливими методами дослідження, що дозволяють реєструвати ранні стадії структурної релаксації аморфних сплавів, які ще не можуть бути зафіксовані традиційними методами дослідження структури. Треба відзначити, що метод оптичної та магнітооптичної спектроскопії хоча трохи і програє в чутливості методу ЯМР-спектроскопії, але його використання для розв'язання такого роду задач не накладає ніяких обмежень на магнітний стан зразків.

Четвертий розділ дисертації присвячений вивченню на прикладі найбільш перспективних для практичного використання багатшарових плівок Tb/Fe, Cu/Fe и Co/Pd впливу особливостей специфічної атомної будови таких структур на їх оптичні та магнітооптичні властивості а також ЕСЕ.

В § 4.2 наведені результати дослідження оптичних властивостей багатшарових плівок (БШП) Tb/Fe сумарної товщини порядку 100-120 нм, які були одержані шляхом послідовного осаджування шарів Tb і Fe з двох електронно-променевих випаровувачів. Товщини шарів Tb та Fe були рівними і складали -

10, 6, 3 і 0,5 нм. З метою захисту зразків від окислення вільна поверхня плівок покривалася товстим шаром Al_2O_3 ; вимірювання оптичних сталей при цьому проводилося з боку підкладки.

Експериментально показано, що спектри ОП всіх досліджених БШП Tb/Fe характеризуються існуванням одного максимуму, розташованого (для БШП Tb/Fe IO/IO) в районі 2.5 еВ, який при зменшенні товщини шарів зміщується в УФ-область спектра. Для в'ясування причин такої залежності спектрів ОП від товщини шарів в роботі шляхом розв'язання зворотної еліпсометричної задачі було проведено комп'ютерне моделювання спектрів ОП БШП Tb/Fe. При цьому використовувалися оптичні сталі Tb та Fe, які були одержані нами для товстих (150 нм) плівок Tb та Fe, з також вважалось, що границя розподілу шарів - ідеальна площина. Порівнюючи експериментальні та модельні дані, можна відмітити їх добру відповідність для БШП Tb/Fe з товщинами шарів по 10 нм, яка суттєво гіршується при зменшенні товщини. Причина такої розбіжності може бути пов'язана як з невідповідністю дійсності моделі границі розподілу шарів, так і з тим фактом, що оптичні сталі тонких шарів відрізняються від значень, характерних для масивних Tb та Fe.

Для перевірки останньої з причин в роботі досліджувалися оптичні властивості дуже тонких (до 1.4 нм) шарів Fe, які мали різну товщину. З цією метою розв'язувалась пряма еліпсометрична задача для системи "однорідна ізотропна непоглинаюча підкладка (плавлення кварц) - тонка ізотропна поглинаюча плівка (Fe)". При цьому за оптичні сталі шарів Fe використовували оптичні сталі "товстих" (150 нм) плівок, які були визначені нами раніше. Для такої системи розраховувалися еліпсометричні кути і шляхом варіації товщини Fe d досягали пристайності експериментальних та модельних даних. Показано, що значення параметра d було постійним у всьому спектрі для товщин шарів заліза порядку 1.4 нм. Отже ясно, що причина розбіжності модельних та експериментальних даних пов'язана з неадекватністю уявлень про границю розподілу шарів.

В результаті заміни моделі розподілу елементів в БШП Tb/Fe на трьохшарову "Tb - Tb/Fe - Fe", (де Tb/Fe означає дяку перехідну область), товщина і властивості якої моделювалися за допомогою БШП Tb/Fe з меншими звязаннями товщин шарів, було

досягнуто задовільну узгодженість з експериментальними даними. Показано, що товщина перехідної області знаходиться в межах 1.5-3 нм.

В роботі також досліджувалися оптичні та магнітооптичні властивості БШП Cu/Fe ($d_{Cu}=4.5, 4.0$ і 2.0 нм; $d_{Fe}=4.0, 2.0$ і 1.5 нм) та МШП Co/Pd ($0.16 < d_{Co} < 1.7$ нм; $0.17 < d_{Pd} < 1.7$ нм).

Проведення аналогічної процедури для БШП Cu/Fe (тобто порівняння експериментальних та модельних спектрів ОП) дозволило встановити, що в цій системі, яка утворена з елементів що не розчинюються один в одному до 520°C , на границі розподілу шарів також утворюються області з перемішаними компонентами, товщина яких складає близько 0.5 нм. Оскільки оптичні властивості інтерфейсної області помітно відрізняються від оптичних властивостей чистих компонентів, то при малих товщинах шарів ефективні оптичні властивості БШП можуть помітно відрізнятися від очікуваних. Цей факт є одним із чинників змін спектральних залежностей ЕЕК від товщини шарів.

Для з'ясування природи виявлених експериментально залежностей від товщини шарів заліза в БШП Cu/Fe спектрів ЕЕК в роботі були розраховані частотні залежності ефективних значень дійсних частин недіагональних компонентів тензора діелектричної проникності $\epsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ - величини, яка пропорційна магнітооптичному поглинанню. Встановлено, що для "товстих" (4 нм) шарів заліза форма спектру $\epsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ добре погоджується з аналогічною залежністю для масивного Fe. Помітна різниця між ними починає з'являтися при зменшенні товщини заліза в БШП Cu/Fe до 2 нм, і, нарешті, при номінальній товщині $d_{Fe} = 1.5$ нм (реально трохи менше за рахунок утворення інтерфейсної області) спектр $\epsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ вже принципово відрізняється від такого для Fe (див. рис.7). Причину такої поведінки магнітооптичного поглинання від товщини ми пов'язуємо із зміною величини обмінного розщеплення в дуже тонких феромагнітних шарах в БШП.

З метою з'ясування природи впливу параметрів модуляції складу БШП та енергії фотонів на величини ЕЕК БШП Co/Pd в роботі були проведені розрахунки частотних залежностей $\epsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ і показано, що УФ-області спектру при певних товщинах шарів величина $\epsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ перевищує значення цієї функції для чистого Co.

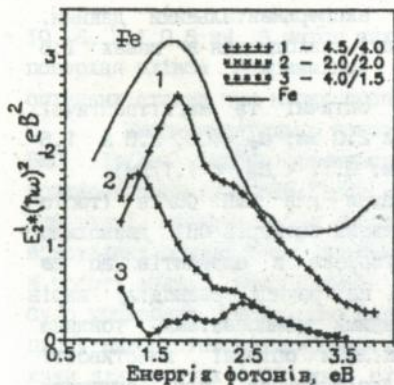


Рис.7 Спектри $\varepsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ для БШП Cu/Fe

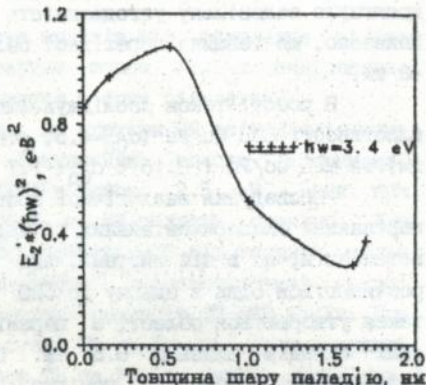


Рис.8 Залежності від товщини Pd величини $\varepsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ для БШП Co/Pd

Причина такого явища пов'язується з включенням додаткового механізму поглинання, обумовленого поляризацією шарів паладію. Залежність $\varepsilon_2^*(\hbar\nu)^2$ від товщини шарів паладію (рис.8) має яскраво вираження максимум при $d_{Pd} \approx 0.5$ нм, яка свідчить про те, що поляризація Pd під дією сусідніх шарів Co простягається на порівняно невелику відстань. Тому зрозуміло, що вклад від Pd в результуюче магнітооптичне поглинання БШП Co/Pd зменшується із збільшенням d_{Pd} . Отже взаємодія між шарами феромагнітного та немагнітного металів приводить до суттєвих змін спектрів магнітооптичних ефектів.

В п'ятому розділі дисертації наведені результати дослідження оптичних та магнітооптичних властивостей слабких зонних феромагнетиків Fe_2P та Ni_3Al широкій області температур. Практично всі сучасні уявлення, за допомогою яких можна описати магнітні властивості такого класу магнетиків при кінцевих температурах, зводяться до виходу за межі моделі самоузгодженого (середнього) поля в теорії Стонера шляхом врахування колективних збуджень в системі електронів. Такими збудженнями є флуктуації спінової густини або спінові флуктуації (СФ). Вважається, що в парамагнітній області в деякому інтервалі температур існує динамічний ближній магнітний порядок, обумовлений просторовими кореляціями спінової густини, які

існують на протязі досить короткого часу порядку $t_1 \approx \hbar/T_C \approx 10^{-13}$ с. Слід зауважити, що час формування локальної енергетичної структури, який оцінюється як $t_2 \approx \hbar/W_d \approx 10^{-15}$ с (W_d - ширина зони), суттєво менше, ніж t_1 , тому електронні одночасткові стани формуються в полі потенціалів, утворених флуктуаціями спінової густини [6]. Можна сподіватися, що особливості енергетичного спектру електронів, обумовлені існуванням СФ в слабких зонних феромагнетиках, знайдуть своє відображення в спектрах ОП та магнітооптичних ефектів.

В роботі в широкій області температур були вивчені оптичні, магнітооптичні та магнітні властивості полікристалічних та монокристалічних масивних сплавів $Ni_{1-x}Al_x$ ($x = 0.248$ и 0.23), а також плівкові зразки сплаву Fe_2P . Температури Кюрі (T_C) для них склали відповідно 50 К (сплав $Ni_{0.752}Al_{0.248}$), 78 К ($Ni_{0.77}Al_{0.23}$) і 290 К (Fe_2P).

Для всіх сплавів, які вивчалися в даній роботі, встановлено, що залежності намагніченості від температури мають подібні риси, які проявляються в тому, що в парамагнітній області температур прямолінійний участок зворотної магнітної сприйнятливості $\chi^{-1}(T)$ починається при температурах T_B , що на декілька сот градусів перевищували значення відповідних T_C (див., наприклад, рис.9). Іншими словами, феромагнітний та дійсно парамагнітний стани рознесені між собою на декілька сот градусів. Одержані нами експериментальні дані узгоджуються з літературними даними [7], де за допомогою вивчення розсіювання нейтронів в сплаві Fe_2P показано, що в температурному інтервалі $T_C > T > T_B$ існують області з локальним магнітним порядком.

В спектрах оптичної провідності сплавів $Ni_{1-x}Al_x$ в низькоенергетичній області спектру ($\approx 1,3$ еВ) виявлена смуга міжзонного поглинання, яка має тонку структуру. Перехід цих сплавів через температуру Кюрі практично не впливав на тонку структуру цієї полоси, і лише при досягненні температур, близьких до T_B , тонка структура зникла (див.рис.10).

Для пояснення природи низькоенергетичної полоси в спектрах ОП цих сплавів були використані літературні дані, в яких був виконаний теоретичний розрахунок спектру міжзонної оптичної провідності сполуки Ni_3Al в парамагнітному стані, а також

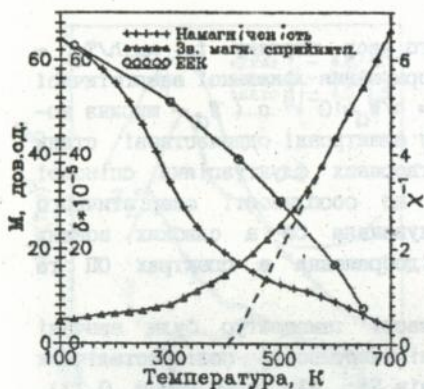


Рис.9 Намагніченість, χ^{-1} та δ для сплаву Fe_2P як функція температури

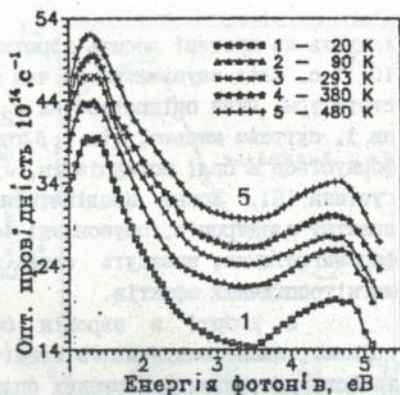
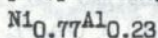


Рис.10 Залежність від температури спектра ОП сплаву



проведено спін-поляризоване обчислення ЕСЕ для Ni_3Al . Базуючись на цих роботах, нами був запропонований механізм формування тонкої структури низькоенергетичної полоси поглинання, згідно з яким вона формується за рахунок переходів електронів між d -подібними зонами в спінсвих підсистемах за- та проти намагніченості поблизу точок високої симетрії Γ та X зони Бріллюена, розщеплених на величину енергії обмінного розщеплення ΔE_{ex} . Внаслідок того, що величини ΔE_{ex} для заповнених та вільних зон рівні, складові підсмуги трохи рознесені по спектру і низькоенергетична смуга поглинання має тонку структуру.

Той факт, що тонка структура низькоенергетичної смуги поглинання в спектрах ОП сплавів $\text{Ni}_{1-x}\text{Al}_x$ зберігається при переході через температуру Кюрі свідчить про те, що локальний магнітний порядок в цих сплавах зберігається при $T > T_C$, причому він такий же, як і в феромагнітному стані.

При підвищенні температури перехід через T_C не тільки не приводив до зникнення як самого екваторіального ефекту Керра (або до різкої зміни величини цього ефекту), так і не суттєво впливав на форму спектра $\delta(h\nu)$. Підвищення температури (в області $T > T_C$) приводило до монотонного зменшення величини ЕЕК, і, нарешті, до його зникнення (в межах чутливості апаратури) при температурах, близьких до T_B - 320 К для сплавів $\text{Ni}_{1-x}\text{Al}_x$ та 650

К для сплаву Fe_2P (див. наприклад рис.9).

Сукупність одержаних експериментальних даних можна пояснити, якщо базуватися на факті існування спінових кореляцій та їх просторових кореляцій. Перехід через температуру Кюрі в слабких зонних феромагнетиках супроводжується зникненням макроскопічної намагніченості, однак при цьому зберігаються області з локальним магнітним порядком - СФ. У флюктууючому полі спінових флуктуацій створюється локальна зонна структура, основна різниця якої від початкової (при $T=0$) складається в тому, що осі квантування розупорядковані в просторі. Це розупорядкування збільшується з ростом температури, і при переході через T_C середня по зразку намагніченість стає рівною нулюві, тоді як локальна спінова поляризація залишається кінцевою. В працях Т.Морія [1] показано, що при малих значеннях хвильових векторів просторові кореляції спінових флуктуацій з температурою зпадають подібно тому, як ведуть себе одержані нами для сплавів $Ni_{1-x}Al_x$ і Fe_2P залежності величини ЕЕК δ від температури. Таким чином, можна вважати, що хід залежності $\delta(T)$ є відбиттям зміни розміру динамічних областей скорельованих спінових флуктуацій з температурою, а оптична та магнітооптична спектроскопія можуть бути використані для дослідження в слабких зонних феромагнетиках поведінки спінових флуктуацій від температури.

Основні результати та висновки

1. Створені установки, які дозволяють в умовах надвисокого вакууму одержувати плівки металів та сплавів заданого складу і без порушення вакууму в широких спектральних та температурних областях вивчати їх оптичні та магнітооптичні властивості.

2. Завдяки використанню методів тонкоплівкової технології приготування зразків для досліджень стало можливим одержати деякі сплави на основі перехідних Зд-металів в метастабільних станах (фактично аморфному або неупорядкованому кристалічному), що не завжди можна зробити іншими способами.

3. Перехід сплавів на основі перехідних Зд-металів в розупорядкований стан приводить до змін в спектрах оптичної провідності як в області переважно міжзонного так і внутрізонного поглинання: смуги міжзонного поглинання зменшуються за інтенсивністю, розширюються та можуть змінявати своє положення в

спектрі. Причина зміщення, а також зникнення ряду смуг при перетворенні "порядок-безпорядок" пов'язується з зхлопуванням "надструктурних" щілин в ЕСЕ.

4. Перехід до кристалічного розупорядкованого стану в сплавах приводить також до зменшення провідності, обумовленої вільними електронами, що пов'язано як із збільшенням процесів розсіювання, так із зменшенням рухливості електронів провідності в розупорядкованій фазі сплаву.

5. Перехід в аморфний стан приводить до більших (в порівнянні з перетворенням "порядок-безпорядок" зміна спектрів міжзонної оптичної провідності і відповідно ЕСЕ. В тих випадках, коли можна проводити порівняння властивостей аморфних та кристалічних фаз сплавів, перехід в аморфний стан приводить до втрати особливостей (структур) в спектрах міжзонної оптичної провідності (і отже і відповідних частків ЕСЕ) внаслідок їх широкого розмиття.

6. Спосіб одержання аморфного стану в зразках може суттєво вплинути на оптичні та магнітооптичні властивості аморфних плівок, що пов'язано з формуванням різної структури ближнього порядку.

7. Оптична та магнітооптична спектроскопія є чутливими методами для реєстрації процесів структурної релаксації, яка може відбуватися при відпалі аморфних сплавів.

8. Зменшення розмірності феромагнітного металу в БШП приводить до змін його магнітооптичних параметрів, що в свою чергу обумовлено зміною величини обмінного розщеплення.

9. На прикладі сплавів Ni_3Al та Fe_2P експериментально показано, що в слабких зонних феромагнетиках в парамагнітній області зберігаються області з локальним магнітним порядком, який руйнується при температурах, значно вищих, ніж T_C .

Публікації Матеріали дисертаційної роботи знайшли своє відображення в наступних публікаціях:

1. Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В., Лесник А.Г. Влияние превращения порядок-беспорядок на оптические свойства пленок сплавов Fe-Co эквивалентного состава // ФММ. - 1979. - 47, вып.4.- с.747-753.
2. Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В. Оптические свойства пленок ГПУ-и ГЦК-кобальта в энергетической области 0.095 - 1.2 эВ // ФТТ.

- 1981. - 23, №2. - с. 440 - 448.
3. Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В., Лесник А.Г. Влияние фазового превращения порядок-беспорядок на оптические свойства и электронную энергетическую структуру пленок сплава Fe-Co в низкоэнергетической области спектра // ФММ. - 1982. - 53, вып.3. - с.481 - 486.
 4. Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В., Лесник А.Г. Оптические и электрические свойства аморфных и кристаллических пленок сплава $Co_{67}Ge_{33}$ // Металлофизика. - 1984. - 6, №2. - с.88-91.
 5. Корсунская Т.С., Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В. Влияние структурных превращений в пленках сплава $Fe_{70}Ge_{30}$ на его оптические, гальваномагнитные и электрические свойства // Металлофизика. - 1984. - 6, № 5. - с.117-123.
 6. Гонтаж Р., Котов В.В., Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В., Лесник Н.А., Харитонский С.Я. Влияние отжига на ЯМР- и оптические спектры аморфных пленок сплава $Co_{80}P_{20}$ // Металлофизика. - 1985. - 7, № 3. - с.59-62.
 7. Немоложенко В.В., Красовський Е.Е., Антонов В.Н., Кудрявцев Д.В., Мищенко М.М. Міжзонна оптична провідність CoGa // Доповіді АН УРСР, серія "А". - 1986. - №7. - с.50-53.
 8. Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В., Мищенко И.Н. Оптические свойства и электронная энергетическая структура пленок упорядоченного и рвузупорядоченного сплава $Co_{50}Al_{50}$ // ФММ. - 1987. - 63, вып.2. - с. 288 - 295.
 9. Кудрявцев Д.В., Лежненко И.В., Мищенко И.Н. Взаимосвязь оптических свойств и структуры пленок сплава $Co_{50}Ga_{50}$ // Металлофизика. - 1987. - 9, № 4. - с. 68 - 74.
 10. Stobtecki F., Stobtecki T., Hoffmann H., Dubowik J., Kudryavtsev Yu.V. Solid State Reaction in Crystalline and Amorphous Co/Zr Multilayers // Thin Solid Films. - 1989. - 174. - p.1-5.
 11. Dubowik J., Kudryavtsev Yu.V., Gontarz R. Magnetic and optical properties of amorphous and crystalline Co-W films // Acta Physica Polon. - 1989. - A76, N2. - p.331-335.
 12. Dubowik J., Kudryavtsev Yu.V., Stobtecki F. Ellipsometric evidence of Zr/Co amorphization by solid state reaction // Acta Physica Polon. - 1989. - A76, N2. - p.321-324.
 13. Кудрявцев Д.В., Лесник А.Г., Мищенко И.Н., Дубовик Я. Спиновые

- флуктуации в сплаве Ni_3Al // *Металлофизика*. - 1990. - 12, № 6. - с. 88-90.
14. *Dubowik J., Kudryavtsev Yu.V., Krasovskii E.E.* Spectroscopic Ellipsometric Investigation of Multilayered and Solid State Amorphized Co/Zr Films // *Phys.Stat.Sol (a)*. - 1990. - 121. - p.173 - 179.
 15. *Вознюк В.П., Гончак Р., Дубовик Я., Кудрявцев Д.В., Лесник Н.А.* Изучение изменения электронной структуры, оптических и магнитных свойств аморфных пленок сплавов $Co_{1-x}W_x$ при их структурной релаксации и кристаллизации методами эллипсометрии и ЯМР-спектроскопии // *ФТТ*. - 1990. - 32, №3. - с. 694 - 699.
 16. *Кудрявцев Д.В., Мищенко И.Н., Дубовик Я., Ганьшина В.А.* Спиновые флуктуации в слабоферромагнитных Ni-Al сплавах // *ФММ*. - 1991. - №5. - с.48-52.
 17. *Дубовик Я., Красовский Е.Е., Кудрявцев Д.В.* Оптические свойства аморфных и аморфизированных путем твердофазной реакции пленок сплавов кобальт-цирконий // *ФММ*. - 1991. - №1. - с.147-151.
 18. *Лесник Н.А., Кудрявцев Д.В., Гончак Р., Котов В.В., Подъяловский Д.И., Вознюк В.П.* Исследование процессов структурной релаксации и кристаллизации аморфных пленок сплава $Co_{82}B_{18}$ методами оптической, ЯМР- и ФМР-спектроскопии // *УФЖ*. - 1991. - 36, № 9. - с.1434-1439.
 19. *Kudryavtsev Yu.V., Mischenko I.N., Dubowik J.* Application of magneto-optical spectroscopy for investigation of spin fluctuations in Fe_2P above its Curie temperature // *J.Magn.Magn.Mater.* - 1992. - 111. - p. 1 - 4.
 20. *Бжестовский О.Д., Кудрявцев Д.В., Харитонский С.Я.* Оптические свойства многослойных пленочных структур Tb/Fe // *Металлофизика*. - 1992. - 14, № 2. - с.26-31.
 21. *Дубовик Я., Кудрявцев Д.В., Лесник А.Г., Мищенко И.Н.* Применение магнитооптической спектроскопии для исследования спиновых флуктуаций в слабоферромагнитном сплаве Fe_2P в парамагнитной области // *Металлофизика*. - 1992. - 14, № 2. - с.32 - 37.
 22. *Kudryavtsev Yu.V., Bzhestowski O.Yu., Smardz L.* Spectroscopic ellipsometric and magneto-optical study of Cu/Fe multilayers // *Thin Solid Films*. - 1993. - 234. - p.536-537.
 23. *Кудрявцев Д.В., Бжестовский О.Д., Смардз Л.* Магнитооптические

и оптические свойства многослойных пленок Co/Fe // ФММ. - 1993. - 76, вып. I. - с.65-71.

24. Дубовик Я., Кудрявцев Д.В., Мищенко И.Н. Применение магнито-оптической и оптической спектроскопии для исследования спиновых флуктуаций в слабоферромагнитном сплаве Fe₂P в парамагнитной области // ФТТ. - 1992. - 34, №6. - с.1807-1814.
25. Кудрявцев Д.В., Гонтар Р. Магнитооптические и оптические свойства многослойных пленок Co/Pd // ФММ. - 1994. - 77, вып.6. Gontarz R., Kudryavtsev Yu.V., Leontik N.A. FMR, magnetooptical and optical spectroscopy of Co/Pd multilayered films. - In digest of European Conference on Magnetic Materials and Application, Kosice Slovakia, August 24-27, 1993
26. Kudryavtsev Yu.V., Dubovik J., Stobiecki P. Magneto-optical and optical spectroscopy in Fe/Zr multilayered films // Thin Solid Films. - 1994.

Литература

1. Мория Т. Спиновые флуктуации в магнетиках с коллективизированными электронами. - М.: Наука. - 1988. - С.288.
2. Лесник А.Г. Магнитная восприимчивость кластерной модели слабого ферромагнетика в области критической температуры // Металлофизика. - 1987. - 9, №5. - с.83 - 86.
3. Красовский Е.Е., Антонов В.Н., Немощкаленко В.В. Теоретическое исследование оптических интерметаллических соединений с кристаллической решеткой типа CsCl // Препринт Института металлофизики АН УССР, ИМФ I7.87, Киев, 1987.
4. Анолина И.Н., Егорушан В.Е., Кулькова С.Е., Фадин В.П. Изменение электронной энергетической структуры и оптических свойств в сплаве FeCo при переходе порядок-беспорядок // ФТТ. - 1981. - 23, вып.10. - с.2971-2976.
5. Yamashita J., Wakoh S., Asano S. Band theory of super-lattice CoFe // J.Phys.Soc.Japan. - 1966. - 21, N1. - p.53-61.
6. Динамические и кинетические свойства магнетиков: сб. научн. тр. С.В.Вонсовский (отв.ред.). - М.: Наука, 1986. - 248с.
7. Fujii H., Uwatoko Y., Motoya K. et al. Neutron Scattering Investigation of itinerant Electron System Fe₂P // J.Phys. Soc.Japan. - 1988. - 57, N6. - p. 2143-2153.

Підписано до друку 04.07.94р Формат 60x84/16
Папір друк. Умов. друк. л. 2,0. Тираж 100 примірик. Заказ №1098
Надруковано ЦУОН ДНПІ "Плодвинконсерв" м. Київ , Саксаганського , 1

AB 30.624