


**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ**

**На правах рукопису**

**УДК 538.22 : 539.23**

**КУЗЬМАК ОРЕСТ МИРОНОВИЧ**



**ВИВЧЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИЙ -**

**ПЕРЕХІДНИЙ МЕТАЛ В АМОΡФНИХ ТА**

**БАГАТОШАРОВИХ ПЛІВКАХ**

**Спеціальність 01.04.13- Фізика металів**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня**

**кандидата фізико-математичних наук**

**КИЇВ-1997**



Дисертація є ру

Робота виконана в Інституті металофізики НАН України і Інституті магнетизму Міносвіти та НАН України

Науковий керівник: -Доктор фіз.-мат. наук , професор

Погорілий Анатолій Миколайович

Офіційні опоненти: Доктор фіз.-мат. наук

Ніщенко М.М., Інститут металофізики НАН України

Доктор фіз.-мат. наук

Коваленко В.Ф., Київський університет

Провідна організація - Донецький університет.

Захист відбудеться " 18 " червня 1997р. о 14 годині  
на засіданні спеціалізованої вченої Ради Д 01.75.01 при Інституті  
металофізики НАН України за адресою

252142, Київ-142, бульвар акад.Вернадського 36

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Інституту  
металофізики НАН України

Автореферат розіслано " 15 " травня 1997 р.

Вчений секретар Спеціалізованої Вченої Ради

доктор фіз.- мат. наук

В.К.ПЩАК

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми Інтерес до аморфних сплавів рідкісноземельний-перехідний метал (РЗМ-ПМ) викликаний, з однієї сторони можливостями практичного використання таких матеріалів в системах зберігання інформації, з іншої сторони-теоретичними питаннями, що виникають при розгляді магнітного порядку в структурно розупорядкованих системах.

Серед аморфних магнітних систем цікавим з обох позицій постає вивчення властивостей аморфних інтерметалевих сплавів перехідних елементів 3d та 4f груп, причому магнітні властивості аморфних сплавів цього класу різко і в деяких випадках неочікуваним чином відрізняються від властивостей відповідних, добре вивчених на сьогоднішній день, кристалічних сплавів-аналогів.

Для плівок, що можуть бути використані в системах запису інформації, необхідною є реалізація в них певних магнітних параметрів, таких як намагніченість насичення, коерцитивна сила, температура Кюрі, і особливо наявність в них одноосної магнітної анізотропії, перпендикулярної до площини плівки. Проведені раніше дослідження мали на меті вивчення параметрів, важливих для магнітного запису, і обмежувалися, в основному, розробкою умов отримання матеріалів з певними магнітними характеристиками. Перпендикулярна магнітна анізотропія (ПА) та інші магнітні характеристики, згідно із запропонованими моделями, пояснюються наявністю в плівках особливого структурного ближнього порядку та виділенням напрямом обмінної взаємодії. Моделювання анізотропного розподілу атомів у аморфній плівці може бути здійснене шляхом почергового осадження надтонких шарів (1-3 атомних товщин) перехідного та рідкісноземельного металів і створення, таким способом багат шарової структури із взаємодіючими шарами.

Незважаючи на проведені в останні роки дослідження природа параметрів, важливих для практичного застосування таких як: перпендикулярна магнітна анізотропія, намагніченість та ін., залишилася до кінця не з'ясованою.

Магнетизм сполук РЗМ-ПМ обумовлений наявністю незаповнених 3d-шарів електронних оболонок перехідного металу (ПМ) і 4f- шарів у атомах рідкісноземельних металів (РЗМ), а також обмінною взаємодією, яка викликає впорядкування магнітних моментів. Таким чином, дослідження механізмів взаємодії іонів рідкісноземельного та перехідного металів є актуальною задачею.

як для розуміння фундаментальних питань фізики плівок, так і для отримання плівок з параметрами придатними для практичного використання в системах запису інформації.

### Наукові мета та задачі роботи

Метою роботи було вивчити взаємодію іонів рідкісноземельного та перехідного металу в аморфних та багатошарових плівках та вплив цієї взаємодії на магнітні властивості аморфних та багатошарових плівок R3M-Fe. Для досягнення вказаної мети вирішувалися наступні задачі:

- одержання методом електронно-променевого випаровування плівок RFe (R=Tb,Gd) та багатошарових структур Tb/Fe в широкому діапазоні концентрацій та товщин;
- експериментальне вимірювання спектрів ядерного гама-резонансу (ЯГР, ефект Мессбауера) на ядрах Fe<sup>57</sup> та розрахунок функції розподілу локальних полів;
- вимірювання петель гістерезису магнітооптичного ефекту Керра та ефекту Холла;
- дослідження спектральних залежностей магнітооптичного ефекту Керра;

Наукова новизна полягає в тому, що вперше:

- проведено комплексне дослідження аморфних плівок R-Fe (R=Gd,Tb) та багатошарових плівок Tb/Fe методом спектроскопії ядерного гама-резонансу на ядрах Fe<sup>57</sup>;
- розглянуто особливості магнітооптичного ефекту Керра та гальваномагнітного ефекту Холла в таких матеріалах;
- показано, що причиною виникнення перпендикулярної магнітної анізотропії в аморфних плівках R3M-Fe є просторова анізотропія взаємодії несферичного атома тербія з оточуючими його атомами заліза;
- запропоновано механізми зменшення локального поля на ядрах Fe<sup>57</sup> в аморфних плівках R3M-Fe;
- спостерігалась зміна напрямку локального поля на ядрах Fe<sup>57</sup> в багатошарових плівках з товщинами шарів менше 1.0 нм, яка пояснена анізотропною взаємодією Tb-Fe.

### Наукова та практична цінність роботи

Проведені дослідження дозволили виявити причини і механізми формування перпендикулярної магнітної анізотропії в аморфних та багатошарових плівках рідкісноземельний-перехідний метал. Доведено, що гальваномагнітні властивості

таких плівок визначаються магнітним розсіюванням електронів провідності на атомах заліза. Пояснено зміну спектральної залежності МО ефекту Керра в багатошарових плівках при зменшенні товщин складових шарів від 1.0 нм. Отримані результати можуть бути використані при розробці матеріалів для систем магнітооптичного та перпендикулярного запису інформації.

**На захист виносяться такі наукові положення**

1. Просторова анізотропія взаємодії Tb-Fe, яка викликана несферичною формою атомів тербія, відіграє вирішальну роль при формуванні перпендикулярної магнітної анізотропії в аморфних плівках РЗМ-ІІМ, а в багатошарових плівках перпендикулярна анізотропія виникає внаслідок анізотропної взаємодії в тонкому перехідному шарі.
2. Зменшення локального поля на ядрах Fe<sup>57</sup> не може бути викликане тільки переносом заряду від рідкісноземельного металу до заліза, а зв'язане з гібридизацією 3d електронів заліза з 5d та 6s електронами тербія та зміною ступеня поляризації електронів провідності.
3. Ефект Холла в аморфних плівках рідкісноземельний метал- залізо зв'язаний, із магнітним розсіюванням електронів провідності на атомах Fe, а висок рідкісноземельного елемента є незначним

**Апробація роботи**

Основні результати роботи доповідалися та були представлені на

1. 2-nd International Symposium on Magneto-Optics, Kharkow, USSR Sept.10-13 1991
2. Всесоюзной школе семинаре "Новые магнитные материалы микроэлектроники" г.Новгород 1990г.
3. XIX Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений Ташкент 1991
4. European Magnetic Materials and Application Conference (EMMA) Kosice, Slovakia 1993 , Wien, Austria, 1995
5. International Conference on Magnetism (ICM), Warsaw 22-26 Aug. 1994.
6. 14th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Dusseldorf, Germany 1994
7. European Conference "Physics of Magnetism" Poznan', Poland 1996
8. XXV General Assembly of the International Union of Radio Science.(URSI), Lille, France, 1996

Крім того, матеріали дисертації доповідалися на наукових семінарах Інституту металофізики та Інституту магнетизму НАН України

#### Публікації

За матеріалами дисертації опубліковано 16 наукових праць, в тому числі 6 статей та 10 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та об'єм роботи Дисертаційна робота викладена на 105 сторінках і складається із вступу, п'яти глав, висновків та списку використаної літератури, що включає 101 найменування, вміщує 22 рисунки та 2 таблиці.

#### Особистий внесок автора

Дисертантом безпосередньо були отримані аморфні плівки GdFe та TbFe, а також багатшарові плівки Tb/Fe. Ним також проведено їх дослідження методом ядерного гама-резонансу, вимірювання гальваномагнітних та магнітооптичних властивостей. Йому також належить значна роль в інтерпретації отриманих результатів.

Об'єктами досліджень були аморфні плівки  $R_x Fe_{100-x}$ , де  $R = Gd, Tb$ ,  $x = 15, 25, 35, 50$ . отримані співосадження парів РЗМ та заліза у вакуумі на слюдяні та скляні підклади. Об'єктами досліджень також були багатшарові плівки Tb/Fe отримані по черговим осадженням тонких шарів РЗМ та ПМ з товщинами складових шарів 0.5, 1.0, 2.0 та 3.0 нм при загальній товщині плівки 80-100 нм. Для експериментів по ядерному гама-резонансу плівки виготовляли із сировини, збагаченої ізотопом  $Fe^{57}$ .

Основні методи досліджень Ядерний гама-резонанс (ефект Мессбауера), магнітооптичний ефект Керра, ефект Холла, низькокутова рентгенівська дифракція, компютерна обробка результатів експерименту.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обговорюється актуальність дисертаційної роботи, викладено мету і завдання дослідження, відзначено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, сформульовано положення, що виносяться на захист.

В першій главі представлено огляд літературних даних по магнітних властивостях кристалічних та аморфних плівок рідкісноземельний-перехідний метал. Спочатку розглянуто технологічні особливості формування фазового складу тонких металевих плівок рідкісноземельний-перехідний метал. Проведено порівняльний аналіз різних методик отримання тонких плівок і багатшарових структур. Далі

проаналізовано механізми магнітного впорядкування у феримагнітних тонких плівках РЗМ-ПМ. Магнетизм сполук РЗМ-ПМ обумовлений наявністю незаповнених 3d- шарів електронних оболонок перехідного металу і 4f- шарів у атомах рідкісноземельних металів, а також обмінною взаємодією, яка викликає магнітне впорядкування магнітних моментів. В більшості сполук необхідно розглядати три типи зв'язків: РЗМ-РЗМ, РЗМ-ПМ, ПМ-ПМ. В кожній із цих взаємодій будуть проявлятися особливості будови електронних оболонок атомів компонентів. Особливість взаємодії РЗМ-РЗМ в тому, що відповідальні за магнетизм 4f-електрони рідкісноземельного металу глибоко занурені в іонний остов атома і сильно екрановані зовнішніми замкнутими електронними оболонками. Внаслідок цього виключається пряме перекриття хвильових функцій 4f електронів, через їх малу просторову протяжність, і обмінна взаємодія РЗМ-РЗМ здійснюється шляхом посередкової взаємодії через електрони провідності. Така взаємодія здійснюється шляхом поляризації електронів провідності рідкісноземельними іонами, має осцилюючий характер, і в залежності від відстані може мати як додатній так і від'ємний знак. Розглядаючи вплив РЗМ треба враховувати форму їх 4f- електронної хмари. Крім Gd, решта РЗМ (Tb, Dy, Ho) характеризуються неферичною сплющеною формою іона, що може вносити додатковий вклад в магнітну анізотропію сплавів. Найбільший від'ємний фактор Стевенса має тербій. Магнітоактивні 3d- електрони перехідного металу знаходяться порівняно близько до поверхні електронної оболонки атома, і тому незаскрановані від кристалічного поля. Через це відбувається пряме перекриття 3d- хвильових функцій, тобто відбувається прямий обмін. Пряма обмінна взаємодія ПМ-ПМ є найбільш сильною в системі РЗМ-ПМ і більш ніж на порядок перевищує обмін РЗМ-ПМ. Вважається, що температура магнітного впорядкування визначається якраз обмінною взаємодією між атомами перехідного металу. В результаті прямого перекриття 3d- хвильових функцій ПМ можна говорити про утворення 3d- електронної зони і магнітні властивості в багатьох випадках розглядають на основі зонної теорії.

Однак, зонна модель, підкреслюючи делокалізацію d електронів, ускладнює трактовку магнітних властивостей, обумовлених збереженням локалізованого розподілу густини електронного заряду і в особливості густини магнітних моментів колишніх d електронів в кристалі. Крім того слід зауважити,

що магнітний момент Fe вважається в більшій мірі локалізованим порівняно з моментом Co і Ni. Враховуючи останнє, розгляд обмінної взаємодії між іонами ПМ, очевидно слід проводити на основі поєднання моделі Хабарда, яка враховує електрон-електронні кореляції, моделі динамічного перемішування та моделі "жорсткої зони".

Через сильне екранування 4f-електронів рідкісноземельного металу не може бути значного змішування 4f-електронних рівнів РЗМ та 3d електронних рівнів ПМ. Тому, як і у випадку РЗМ-РЗМ обміну слід чекати, що впорядкування магнітних моментів РЗМ та ПМ буде здійснюватися посереднім чином через поляризацію s і, частково, d електронів провідності. Згідно моделі Рудемана-Кітеля обмінна взаємодія є далекодіючою і осцилюючою, тобто може мати як додатний так і від'ємний знак. Оскільки взаємодія електронів провідності з 3d електронами перехідного металу вважається додатною, а з моментом рідкісноземельного металу залежить від міжатомних відстаней, то впорядкування магнітних моментів РЗМ і ПМ може бути як паралельним (для легких РЗМ Nd,La), так і антипаралельним (для важких РЗМ Tb,Dy,Ho,Gd). Сумарна намагніченість сплава чи сполуки РЗМ-ПМ є сумою магнітних моментів атомів РЗМ та ПМ. Оскільки 4f електрони рідкісноземельних елементів екрановані зовнішніми електронними оболонками, то навряд чи зміна найближчого оточення, або зміна густини електронів провідності викликає значну зміну магнітного моменту РЗМ. Таким чином викликає інтерес поведінка магнітного моменту перехідного металу. Зміна магнітного моменту ПМ в багатьох випадках може бути пояснена в моделі "жорсткої зони" для 3d-електронів перехідного металу. 3d-смуга є розщеплена в результаті обмінної взаємодії на дві підсмуги з протилежними напрямками спінів. Різниця між спінами в одному і другому напрямку і приводить до утворення магнітного моменту, який спостерігається в залізі, кобальті та нікелі. Перенос заряду від рідкісноземельного елемента в підзону перехідного металу приводить до зміни співвідношення спінів у двох підзонах і до зміни, таким чином, магнітного моменту. Приведена модель використовувалась для пояснення поведінки магнітного моменту ПМ у багатьох системах РЗМ-ПМ. Однак зміни магнітного моменту, які спостерігали у випадку сполук заліза із торієм чи ітрієм не можна пояснити моделлю "жорсткої зони". Очевидно механізм формування магнітного моменту є складнішим. Слід відмітити, що все сказане вище дійсно для

кристалічних сполук РЗМ-ПМ. Роботи по аморфних плівкових матеріалах носять, в основному, прикладний характер. Аморфний стан сполук РЗМ-ПМ має ряд особливостей. На відміну від сполук РЗМ-ПМ в кристалічному стані, аморфні плівки не володіють просторово-періодичною атомною структурою. Сильна відмінність атомних радіусів РЗМ та ПМ робить можливим існування аморфного стану в широкому діапазоні концентрацій.

Ще одна особливість аморфного стану проявляється в поведінці магнітного моменту ПМ. Сильна відмінність в електровід'ємності РЗМ та ПМ (наприклад заліза) може приводити до переносу електронів від РЗМ до заліза і поступового заповнення 3d-зони. Однак, дослідження на аморфних сплавах, які на відміну від кристалічних можуть бути отримані в широкому інтервалі складу, показали, що більші міжатомні відстані в аморфних плівках порівняно із структурно впорядкованими сплавами можуть приводити до більшої локалізації d-електронів. Вивчення ролі окремих механізмів, що впливають на величину магнітного моменту потребує дальшої роботи, тим більше, що експериментальні дані сильно розходяться.

В другій главі описані особливості технології одержання зразків, експериментальні методики, які використовувалися при проведенні досліджень. Плівки отримували на підкладках із скла та слюди методом електронно-променевого випаровування. Аморфні плівки отримували одночасним осаджуванням парів рідкісноземельного металу та заліза. Багатошарові плівки отримували почерговим осаджуванням парів рідкісноземельного металу та заліза. Установка безмасляної відкачки забезпечувала в робочій камері тиск залишкових газів не вище  $10^{-5}$  Па протягом всього процесу одержання зразків. Після осаджування плівки покривали захисним шаром  $Al_2O_3$  товщиною до 30 нм. Товщини зразків становили 80-100 нм. Пошаровий Оже аналіз аморфних плівок підтвердив їх високу однорідність із незначним збільшенням вмісту кисню та вуглецю в припідкладковому та приповерхневому шарах. В результаті були виготовлені зразки однорідних плівок GdFe та TbFe із вмістом рідкісноземельного металу від 15 до 50 %. Такі плівки за даними просвічуючої електронної мікроскопії були аморфними. Були також виготовлені багатошарові плівки із товщинами складових шарів 3.0, 2.0, 1.0 та 0.5 нм. Дифракція рентгенівських

променів при низьких кутах підтвердила наявність шаруватої структури багатшарових плівок аж до товщин складових шарів 0.5 нм.

Спектри поглинання ядерного гама -резонансу (ефект Мессбауера) на ядрах  $Fe^{57}$  в діапазоні температур 300-500 К записували на спектрометрі в режимі постійних прискорень з використанням резонансного детектора та джерела випромінювання  $Co^{57}$  в матриці Cr. Потік  $\gamma$ - випромінювання був перпендикулярним до площини плівки. Для підвищення чутливості методу ЯГР проводили збагачування зразків ізотопом  $Fe^{57}$ . Реставрацію функції розподілу локальних полів проводили обчисленням вагового внеску кожного із 30 елементарних земанівських секстетів з величиною локального поля в діапазоні 0-350 кЕ. Польову залежність електрорушійної сили ефекту Холла записували при постійному струмі в полі до 10 кЕ, перпендикулярному до площини плівки в температурному діапазоні 200-400 К. Магнітооптичні петлі гістерезиса та спектральні залежності кута обертання ефекту Керра записували по стандартній методиці із використанням модулятора світла та синхронного детектора.

В третій главі приведені результати експериментальних досліджень однорідних плівок та багатшарових структур методом ядерного гама -резонансу на ядрах  $Fe^{57}$ . Вивчення механізмів взаємодії іонів РЗМ та ПМ в аморфних та багатшарових плівках потребує залучення локальних методів аналізу, наприклад спектроскопії ядерного гама резонансу (ЯГР, ефект Мессбауера) Серед параметрів спектру ядерного гама- резонансу найбільш структурночутливим - є ефективне магнітне поле на ядрі атома, безпосередньо зв'язане із електронно-ядерними взаємодіями в магнітовпорядкованих матеріалах. У випадку резонансу на ядрах  $Fe^{57}$ , оскільки орбітальний момент атомів заліза заморожений кристалічним полем, поле на ядрах  $Fe^{57}$  може бути викликане причинами, зв'язаними з оточенням атома заліза і з перерозподілом зарядів при утворенні аморфного сплаву. Інше важливе використання ефекту Мессбауера пов'язане із відносною інтенсивністю ліній в елементарному спектрі ЯГР. Це обумовлене тим, що інтенсивність переходів між станами зі спінами  $3/2$  та  $1/2$  для  $Fe^{57}$  залежить від кута між напрямом поширення  $\gamma$ - випромінювання та напрямом локального поля  $H_{лок}$  на ядрі. При цьому відносна інтенсивність 2 та 5 ліній набуває значення 4 при напрямі  $H_{лок}$  в площині зразка та значення 0 - при перпендикулярному до площини зразка напрямі  $H_{лок}$ . Таким чином ядро  $Fe^{57}$  можна розглядати як мікрорознд,

поміщений в досліджуваний зразок, а розподіл локального поля несе інформацію про розподіл імовірності знаходження того чи іншого атома в найближчому оточенні заліза. Другим важливим параметром спектра ЯГР є ізомерний зсув резонансної лінії. Зсув лінії гама-резонансу викликаний зміною енергії поглинання гама випромінювання внаслідок зміни електростатичної взаємодії ядра із хмарою s-електронів. Зміна густини s-електронів може бути результатом валентності або у випадку утворення хімічної сполуки чи аморфного сплаву - результатом переносу заряду між компонентами сплаву. Ефект Мессбауера є дуже чутливим до структурних та хімічних флуктуацій, що проявляється в розподілі надтонких взаємодій. Головну роль тут грає локальне поле на ядрах, яке на порядок чутливіше до зміни хімічного оточення порівняно з ізомерним зсувом та квадрупольною взаємодією.

Кристалічні сплави та сполуки РЗМ-Fe досліджувалися методом спектроскопії ЯГР досить інтенсивно як на ядрах перехідних металів, так і рідкісноземельних. Локальні поля на ядрах РЗМ визначаються в основному 4f-електронами, тому вони мало залежать від локального оточення атома. Основний внесок в магнітний момент перехідного металу зумовлений делокалізованими 3d електронами, тому  $H_{\text{лок}}$  в цьому випадку є чутливим до оточення атома. Як відомо в першому наближенні має місце залежність

$$H_{\text{лок}} = k M_{\text{Fe}}$$

де  $H_{\text{лок}}$ -локальне поле на ядрі заліза,  $M_{\text{Fe}}$ -магнітний момент на атом заліза,  $k=155 \text{ кЕ/}\mu\text{В}$  - незалежний від температури коефіцієнт. Останнє обумовило широке застосування ефекту Мессбауера до вивчення поведінки магнітного моменту Fe в сполуках РЗМ-Fe.

На Рис 1 та Рис 2 приведені спектри ЯГР аморфних плівок виміряні при кімнатній температурі та розподіл локальних полів на ядрах Fe для плівок GdFe та TbFe відповідно. Спектри склалися із широких ліній, що свідчить про сильну структурну розупорядкованість сплавів. Практично всі спектри містили лінії, зв'язані із немагнітним залізом, які на розподіл локальних полів виражені у вигляді області із низькими значеннями локального поля. Збільшення вмісту заліза в плівці як для GdFe так і для TbFe приводило до збільшення співвідношення магнітної та немагнітної фази в спектрі.

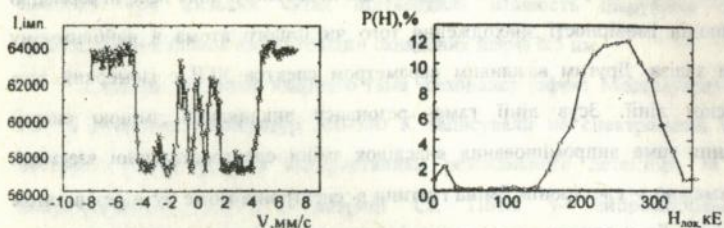


Рис. 1 Спектр ядерного гама-резонансу та функція розподілу локальних полів на ядрах  $Fe^{57}$  для плівки складу  $Gd_{25}Fe_{75}$

Для всіх плівок як системи  $GdFe$ , так і  $TbFe$  спостерігали досить великий внесок від немагнітного заліза. Разом з тим розподіл локальних полів являв собою несиметричну дуже широку лінію. Це дозволяє стверджувати, що плівки РЗМ-ПМ отримані електронно-променевим випаровуванням характеризуються цілим набором оточень атома  $Fe$ , кожне з яких має своє значення локального поля. Суперпозиція всіх елементарних зееманівських секстетів і утворює реальний експериментальний спектр. В той же час в плівці можливе існування областей настільки збагачених РЗМ, що в них мікрвоклучення  $Fe$  знаходяться в суперпарамагнітному стані. Максимум на розподілі  $P(H)$  відповідає такому значенню локального поля  $H_{лок}$  для якого, найближче оточення  $Fe$  є найімовірнішим для зразка певного складу. Як для  $TbFe$ , так і для  $GdFe$  спостерігалася сильна залежність  $H_{лок}$  від концентрації. При цьому значення  $H_{лок}$  змінювалися від 260кЕ до 150кЕ для  $Gd_xFe_{100-x}$  та від 200кЕ до 110кЕ для  $Tb_xFe_{100-x}$ . Такі сильні зміни локального поля на ядрі  $Fe^{57}$  не можуть бути пояснені переносом заряду від РЗМ до заліза. В той же час в роботі спостерігали досит незначні зміни ізомерного зсуву спектра. Крім того спостерігалась відмінна від лінійної залежність локального поля від вмісту РЗМ в плівці. Враховуючи наведені експериментальні дані та аналізуючи літературні джерела в роботі зроблено висновок, що перенос заряду не є основною причиною, що приводить до зменшення локального поля на ядрах  $Fe^{57}$  в аморфних плівках РЗМ- $Fe$ . Зміна локального поля і магнітного моменту  $Fe$  пояснюється гібридизацією  $5d$  та  $6s$  електронних рівнів РЗМ з  $3d$  рівнями  $Fe$ , можливість чого підтверджується літературними джерелами. Певний вклад в зміну локальних полів може також вносити і зміна ступеня поляризації електронів провідності.

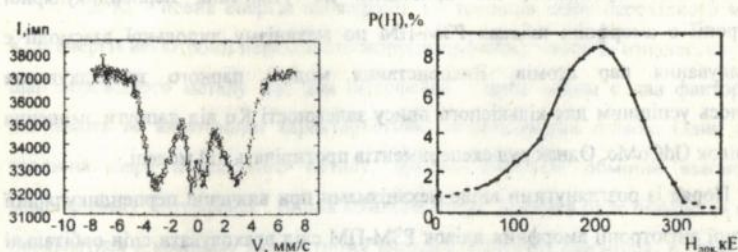


Рис.2 Спектр ядерного гама-резонансу та функція розподілу локальних полів на ядрах  $Fe^{57}$  для плівки складу  $Tb_{25}Fe_{75}$

Далі в роботі приведені результати досліджень методом ядерного гама-резонансу багатошарових плівок Tb/Fe. На Рис. 4. приведено спектри ЯГР багатошарових плівок з товщинами складових шарів 3.0 та 1.0 нм. Спектр плівки з товщиною складових шарів 3.0 нм Tb та 3.0 Fe мав вигляд типовий для оцк-заліза із локальним полем на ядрах  $Fe^{57}$  біля 333 кЕв. Зменшення товщини складових шарів приводило до появи в спектрі внеску від немагнітного заліза і несиметричного уширення ліній спектру. Такі ефекти пояснюються міжшаровою взаємодією та взаємною дифузією Tb та Fe

Чверта глава присвячена вивченню причин, що приводять до виникнення в амрфних та багатошарових плівках перпендикулярної магнітної анізотропії. Існує декілька можливих причин анізотропії в аморфних плівках на основі сплавів рідкісноземельний металів та перехідних металів. Основні із них: 1) парне впорядкування атомів компонентів сплаву, 2) анізотропія форми, зв'язана із стовпчатою структурою плівки; 3) магнітострикційні явища як в самій плівці, так і на межі розділення підкладка-плівка.

Модель стовпчатої структури запропонована на основі експериментів по отриманні плівок Gd-Co діодним розпиленням із ненульовою напругою зміщення. При цьому допускалось що в плівці можуть виникати мікрровклучення Co, зорієнтовані в напрямі, перпендикулярному до площини плівки

Інша причина виникнення осі легкого намагнічування може бути в анізотропії форми, яка проявляється в результаті анізотропного розподілу матеріалу зразка. Однак, така модель може забезпечити тільки  $K_u = \pi M_s^2$ , що значно менше значень, які спостерігали експериментально.

Третьою причиною, що приводить до утворення перпендикулярної анізотропії в аморфних плівках РЗМ-ПМ по механізму дипольної взаємодії є впорядкування пар атомів. Використання моделі парного впорядкування виявилось успішним для кількісного опису залежності  $K_u$  від напруги зміщення для плівок GdCoMo. Однак ряд експериментів протирічає цій моделі.

Поряд із розглянутими вище механізмами при вивченні перпендикулярної магнітної анізотропії аморфних плівок РЗМ-ПМ слід враховувати спін-орбітальні взаємодії, які проявляються через магнітострикцію, одноіонну анізотропію, анізотропний обмін. Магнітострикційна анізотропія може бути викликана як механічними напруженнями в плівці, що виникають, наприклад, в результаті впровадження в плівку атомів інертного газу в процесі наплення, так і напруженнями на межі плівка-підкладка.

Одноіонна анізотропія є результатом обмінної взаємодії іона рідкісноземельного металу (наприклад Tb), для якого є характерним анізотропний розподіл електронного заряду, із оточуючими його атомами перехідного металу. Для свого прояву такий механізм вимагає наявності орбітального моменту атома РЗМ. Формування магнітної анізотропії, в цьому випадку - у взаємодії 4f електронів анізотропного іона РЗМ з іонами найближчого оточення і орієнтацією таким чином іона РЗМ в напрямі нормалі до поверхні плівки. Максимальне значення одноіонної анізотропії для ряду важких РЗМ досягається у випадку елементів з максимальним фактором Стівенса, таких як Tb та Dy.

Таким чином наявні на даний час уявлення про джерела перпендикулярної анізотропії в аморфних плівках РЗМ-ПМ не дають кінцевого розв'язання цієї проблеми. Внесок кожного із розглянутих механізмів визначається складом, умовами отримання плівки і наступною обробкою. Особливу увагу слід звернути на метод отримання плівки.

Цілком очевидно, що для формування анізотропних властивостей в багатошаровій плівці основне значення має товщина шару перехідного металу і відносна кількість цього шару яка бере участь обмінній міжшаровій взаємодії. Для обчислення ефективної анізотропії  $K_{ef}$  експериментально встановлена проста залежність

$$K_{ef} = K_n + 2K_{int}/t$$

де  $K_n$  - повна енергія анізотропії,  $l$  - товщина шару перехідного металу.  $K_{int}$  - енергія анізотропії перехідного шару(інтерфейса), число 2- означає, що кожен шар перехідного металу має два інтерфейси. Таким чином є два фактори, що впливають на анізотропні характеристики багатшарових плівок. Один з них- товщина шару перехідного металу, другий- РЗМ-ПМ обмінна взаємодія в міжшаровому "інтерфейсі". Вплив кожного із цих факторів буде більше чи менше проявлятися в кожному конкретному випадку. РЗМ-ПМ взаємодія, в свою чергу, залежить від типу рідкісноземельного та перехідного металів.

Як відомо імовірність переходів між станами із спінами  $3/2$  і  $1/2$  при ядерному гама резонансі для Fe залежить від кута між напрямом поширення  $\gamma$ -квантів та напрямом локального поля на ядрі. Спектри ЯГР для GdFe та TbFe плівок відрізнялися співвідношенням інтенсивностей ліній. Плівки TbFe в порівнянні із GdFe характеризувалися значним зниженням інтенсивності 2 та 5 лінії в елементарному зезманівському секстеті(Рис.1,Рис.2). Найкраще співпадіння експериментального та розрахункового спектрів для Tb<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> отримували при співвідношенні інтенсивностей ліній 3:0,2:1:1:0,2:3, що відповідає куту між напрямом локального поля та нормаллю до плівки близько 10 градусів. Для Gd<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> співвідношення інтенсивностей ліній 3:3,5:1:1:3,5:3 свідчить, що напрям локального поля на ядрах Fe є близьким до площини плівки.

Петлі гістерезису ефекту Холла для Gd<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> та Tb<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> проведена на Рис.3

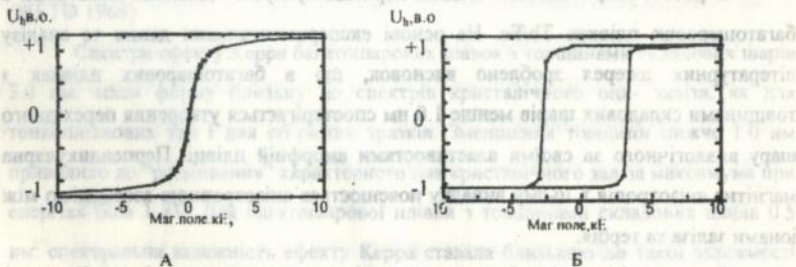


Рис. 3 Польова залежність електро-рушійної сили ефекту Холла для аморфних плівок складу Gd<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> (А) та Tb<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub> (Б)

Співвідношення інтенсивностей ліній в спектрах ЯГР для системи TbFe разом із формою петлі гістерезиса свідчить про наявність в цих плівках, на відміну від GdFe, сильної перпендикулярної магнітної анізотропії. Причину

виникнення ПА слід шукати в наявному орбітальному моменті атома Tb на відміну від нульового для Gd. Очевидно, обмінна взаємодія іона Tb із оточуючими його іонами Fe і відповідним локальним порядком приводить до перпендикулярної площині півки орієнтації локального поля на ядрах Fe<sup>57</sup>. Для зразків системи GdFe площинна орієнтація локальних моментів викликана розмагнічуючим фактором тонкої магнітної півки. В багатошарових півках (Рис.4) зменшення товщини складових шарів приводили до зменшення інтенсивності 2 та 5 лінії елементарного спектра, що вказує на близький до перпендикулярного до півки напрям локального поля на ядрах Fe<sup>57</sup> та спонтанної намагніченості півки.

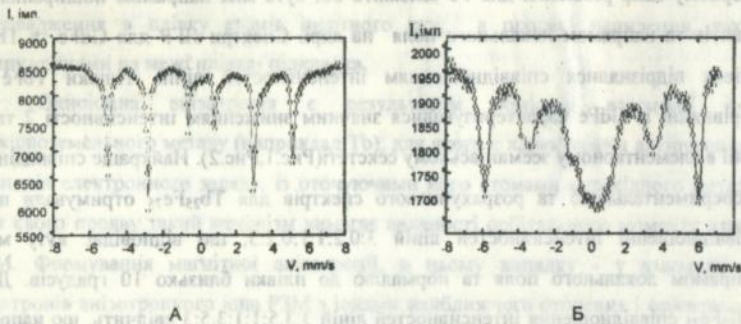


Рис 4. Спектри ЯГР на ядрах Fe<sup>57</sup> для багатошарових півок Tb/Fe з товщинами складових шарів 3.0 нм (А) та 1.0 нм (Б)

В роботі запропоновано модель перпендикулярної магнітної анізотропії в багатошарових півках Tb/Fe. На основі експериментальних даних та аналізу літературних джерел зроблено висновок, що в багатошарових півках з товщинами складових шарів менше 1.0 нм спостерігається утворення перехідного шару аналогічного за своїми властивостями аморфній півці. Перпендикулярна магнітна анізотропія в цьому випадку пояснюється анізотропною взаємодією між іонами заліза та тербія.

Далі в п'ятій главі роботи увагу приділено дослідженню ефекту Холла та магнітооптичних характеристик аморфних півок GdFe та TbFe. Згідно теорії Лютінжера, в сильно розупорядкованих Fe містких магнетиках електронами провідності можуть частково ставати 3d- електрони заліза. Орбіти цих 3d електронів завдяки сильному спин- орбітальному зв'язку відчують вплив s- електронів заліза. Таким чином, в такій системі можливе ефективне розсіювання

електронів провідності на магнітних моментах заліза. При виконанні роботи була виявлена добра кореляція між концентраційною залежністю локального поля на ядрі  $Fe^{57}$  та такою ж залежністю для холловського питомого опору. Вимірювання константи аномального ефекту Холла для аморфних та багат шарових плівок показало їх зростання на чотири порядки в порівнянні із кристалічним залізом. На основі аналізу результатів у роботі стверджується, що ефект Холла в аморфних плівках РЗМ-залізо зв'язаний із магнітним розсіюванням електронів провідності на атомах заліза. Внесок рідкісноземельного елемента є незначним.

В кінці п'ятої глави приведено результати досліджень полярного ефекту Керра в аморфних плівках TbFe та багат шарових плівках Tb/Fe. Спектральна залежність кута повороту магнітооптичного ефекту Керра визначається структурою енергетичного спектру електронів поблизу рівня Фермі. Вважається, що магнітооптичні властивості системи РЗМ-ПМ у видимій ділянці спектра визначаються 3d рівнями перехідного металу, а внесок від електронних рівнів РЗМ є незначним. Таким чином магнітооптична спектроскопія є чутливим методом для спостереження змін електронної структури заліза поблизу рівня Фермі. В дисертації приведені спектральні залежності полярного ефекту Керра для багат шарових та аморфних плівок TbFe, а також для тонкопліткових та об'ємних зразків оцк-Fe, виміряні в діапазоні енергій 1- 5 eV. Для порівняння приведені спектри обертання ефекту Керра, отримані на масивних зразках Крінчіком Г.С. (ЖЕТФ 1968)

Спектри ефекту Керра багат шарових плівок з товщинами складових шарів 3.0 нм. мали форму близьку до спектрів кристалічного оцк- заліза, як для тонкопліткових так і для об'ємних зразків. Зменшення товщини нижче 1.0 нм приводило до "розмивання" характерного для кристалічного заліза максимуму при енергіях біля 1 eV. Для багат шарової плівки з товщинами складових шарів 0.5 нм. спектральна залежність ефекту Керра ставала близькою до такої залежності отриманої для аморфної плівки складу Tb<sub>25</sub>Fe<sub>75</sub>. Подібні трансформації спектру свідчать про зміну електронної структури заліза і особливо 3d електронного рівня. Очевидно товщини складових шарів біля 1.0 нм є критичними для багат шарових плівок Tb/Fe. При таких товщинах, що складають 3-4 атомні розміри, міжшарова обмінна взаємодія Tb-Fe охоплює вже всю плівку і основні магнітні

характеристики такої плівки визначаються обмінної взаємодією між залізом та тербієм. В той же час плівка зберігає шарувату структуру.

### Основні результати та висновки

1. Встановлено, що перпендикулярна магнітна анізотропія в аморфних плівках TbFe, пов'язана, з впливом орбітального магнітного моменту тербія і виникає в результаті анізотропної обмінної взаємодії несферичної електронної хмари тербія із оточуючими його атомами заліза. Для системи GdFe, напрям локальних полів задається анізотропією форми тонкої плівки.
2. Показано, перенос заряду від рідкісноземельного елемента до заліза не може бути основною причиною зміни локального поля на ядрах Fe<sup>57</sup> в аморфних плівках РЗМ- Fe. Зменшення локального поля на ядрі заліза відбувається внаслідок гібридизації 3d електронного рівня заліза з 5d та 6s електронними рівнями тербія. Деякий внесок може робити зміна ступеня поляризації електронів провідності.
3. Для системи GdFe спостерігалися значно вищі значення локальних полів на ядрах Fe ( до 260 кЕ) в порівнянні із TbFe (до 205 кЕ), що може бути пов'язане із вищими значеннями температури магнітного впорядкування.
4. Гальваномангнітні властивості аморфних плівок РЗМ-ПМ (ефект Холла) визначаються магнітним розсіюванням електронів провідності на атомах заліза, а внесок рідкісноземельного елемента є незначним.
5. В багатошарових плівках Tb/Fe при товщинах складових шарів від 1.0 нм спостерігається утворення перехідного шару (інтерфейса) аналогічного за своїми властивостями аморфній плівці. Перпендикулярна магнітна анізотропія в багатошарових плівках виникає внаслідок анізотропної міжшарової взаємодії.

### Основний зміст роботи викладено в публікаціях

1. Кузьмак О.М., Шипиль Е.В. Шевченко В.И. Харитонский С.Я. / Магнитные свойства пленок Fe/Tb с различным периодом модуляции //Украинский физический журнал.- 1991, т.36 N5.- с.765-769
2. Uba L. Uba S. Shipil E. Kuzmak O., Kharitonsky S /Magneto-optical and magnetic properties of TbFe thin films.//Fizika Nizkikh Temperatur, -1992, -v.18 N S1, -p.345-

3. Shipil E. Simsa Z. Kuzmak O./Magneto-optical spectroscopy of Tb-Fe amorphous films// Fizika Nizkikh Temperatur.- 1992, -v.18 N S1, -p.255-258
4. Кузьмак О.М.,Шевченко В.І. Погорілий А.М. /Магнітна структура плівок Tb-Fe одержаних електронно-променевим випаровуванням//Український фізичний журнал 1994.-, т.39, N 1.- с.81-85.
5. Kuzmak O.,Pogorily A Shevchenko V. Fe<sup>57</sup> Hyperfine field distribution for Tb-Fe thin films and multilayers //Journal of Magnetism and Magnetic Material. -1995.- v.148.- p.36-37
6. Кузьмак О.М.Шевченко В.І. Погорілий А.М. Магнітні властивості аморфних плівок R<sub>x</sub>Fe<sub>1-x</sub> (R=Gd,Fe)/Український фізичний журнал // 1996.- т.41, N 1.- с.77-
7. Kuzmak O.M, Shevchenko V.I., Pogorily A.N./Transport properties of Tb/Fe Multilayers//. International Conference on Magnetism (ICM), Warsaw 1994, Digest Booklet

### Summary

Orest M.Kuzmak. Study of rare earth -transition metal interaction in amorphous films and multilayers.

Thesis to the competition of the formation of candidate's degree on physics and mathematics with speciality 01.04.13- Physics of metals. Institute of Metal Physics NAS of Ukraine. Kyiv, 1996.

The complex investigation of the RE-Fe (RE=Gd, Tb) amorphous films and Tb/Fe multilayers was performed by Mossbauer spectroscopy, magneto-optical Kerr effect and Hall effect methods. Interaction of nonspherical Tb ion with neighbouring Fe ions resulted in a small angle between the film normal and direction Fe magnetic moment. The change of the Fe magnetic moment was not connect with the charge transfer from Tb to Fe . It was due to the hybridization Tb 5d and Fe 3d electrons. The Fe sublattice provides the dominant contribution to the Hall effect in amorphous RE-Fe films.

### Анотация

Кузьмак Орест Миронович. Изучение взаимодействия редкоземельный-переходной металл в аморфных и многослойных пленках.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13- физика металлов. Институт металлофизики НАН Украины, Киев, 1997.

В работе проведено комплексное исследование аморфных пленок  $R_xFe_{100-x}$  ( $R=Gd, Tb, x=15, 25, 35, 50$ ) и многослойных пленок  $Tb/Fe$  методами Мессбауэровской спектроскопии, а также при помощи гальваномагнитного эффекта Холла и магнитооптического эффекта Керра. Показано, что основной причиной близкого к нормали к пленке направления локального поля на ядре железа есть анизотропное взаимодействие несферической  $f$  электронной оболочки  $Tb$  с окружающими его атомами  $Fe$ . Доказано, что изменение магнитного момента  $Fe$  не может быть вызвано только переносом заряда от РЗМ к  $Fe$ , а происходит в результате гибридизации  $3d$  электронного уровня  $Fe$  с  $5d$  и  $6s$  электронными уровнями РЗМ. Доказано, что эффект Холла в аморфных пленках РЗМ-ПМ связан с магнитным рассеиванием электронов проводимости на атомах железа, а вклад РЗМ - незначителен.

**Ключові слова:** тонка магнітна плівка, багатощарова плівка, перпендикулярна анізотропія, ядерний гама-резонанс, аномальний ефект Холла.





Підп. до друку 1605 1997р. Формат 60x81 1-16. Об'єм 2.2 друк. арк. Тираж 100 е

Надруковано в ІМФ НАН України ім. Г.В.Курдюмова, 252680, Київ 142,  
бульв. ак. Вернадського 36

435010

AB 37.858