

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ

На правах рукопису
УДК 538.22 : 539.23

КАКАЗЕЙ ГЛІВ МИКОЛАЙОВИЧ

НЕПЛАНАРНА ОДНООСНА АНІЗОТРОПІЯ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ТА
ШАРОВИХ ПЛІВОК НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ ТА КОВАЛЬТУ

01.04.13 - фізика металів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Жак

КИЇВ-1996



00754139 (Т)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті металофізики НАН України

Наукові керівники: - доктор фіз.-мат. наук, професор

Погорілий Анатолія Миколайович

- кандидат фіз.-мат. наук

Лісник Наталія Андріївна

Офіційні опоненти: - доктор фіз.-мат. наук

Кудрявцев Ю.В. (ІМФ НАН України)

- кандидат фіз.-мат. наук, доцент

Завісяк І.В. (Національний Університет)

Провідна організація: - Харківський політехнічний інститут

Захист відбудеться " 3 " липень 1996 р. о 14
 годині на засіданні Спеціалізованої Вченої Ради Д 01.75.01
 при Інституті Металофізики НАН України за адресою: 252680,
 Київ-142, бульв. акад. Вернадського, 36.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці
 Інституту металофізики НАН України.

Автореферат розіслано " 31 " травня 1996 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої Вченої Ради

доктор фіз.-мат. наук

Піщак В.К.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Однією з найбільш важливих проблем фізики магнітних явищ в металах є вивчення природи магнітної анізотропії, оскільки саме анізотропія визначає такі магнітні властивості, як доменна структура, процеси перемагнічування, гістерезисні явища і т.д. Магнітна анізотропія в полікристалічних плівках є структурно-чутливою властивістю, оскільки сильно залежить від їх реальної структури: близького порядку, форми кристалитів, структури та складу меж кристалитів, напружень у плівці і т.д. В цій роботі були досліджені плівки з непланарною анізотропією, тобто з одноосною анізотропією, яка характеризується сталом K і вісю легкого намагнічування, що виходить з площини плівки. Окремим випадком одноосної анізотропії є перпендикулярна анізотропія.

В останні роки значна увага приділялась дослідженню перпендикулярної анізотропії в багаточарових плівках, які складаються з послідовності шарів перехідний метал - немагнітний метал, що чергуються між собою. Такі плівки вважаються перспективним матеріалом для систем запису інформації. Незважаючи на зусилля, затрачені як в експериментальній, так і в теоретичній галузі, природа поверхневої анізотропії залишилась не до кінця з'ясованою, оскільки для номінально еквівалентних систем в різних роботах були отримані суттєві розкиди величин поверхневої та об'ємної анізотропії.

В той же час відомо, що ще в середині 60-х років велика перпендикулярна анізотропія спостерігалась в дрібнокристалічних плівках 3d-металів, зокрема в нікелі. У цілому всі висновки цих робіт носили якісний характер, в кожному випадку розглядався лише один механізм перпендикулярної анізотропії, теоретичні та експериментальні результати не співпадали. Для з'ясування ролі кожного механізму та оцінки максимальної величини перпендикулярної анізотропії, яку можна отримати в таких плівках потрібно було провести більш докладне, комплексне дослідження їх магнітних та структурних властивостей.

Таким чином, дослідження механізмів непланарної анізотропії одно- та багат шарових плівок на основі перехідних металів є актуальною задачею як для розуміння фундаментальних питань фізики плівок, так і для отримання плівок з параметрами, дозволяючими використовувати їх в електроніці, особливо в системах запису інформації.

Наукова задача роботи - визначення внесків різних механізмів в формування перпендикулярної анізотропії нанокристалічних плівок нікеля і кобальту та багат шарових плівок на основі кобальту, розробка методів визначення параметрів непланарної одноосної анізотропії плівок.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що вперше:

- проведено комплексне дослідження формування перпендикулярної анізотропії в нанокристалічних плівках перехідних металів. Виявлено основні механізми перпендикулярної анізотропії та встановлено внесок кожного з них. Виявлено, що при товщині плівок Ni близько 20 нм відбувається зміна знаку сталої ефективної анізотропії плівки.

- експериментально спостерігався ефект, названий "гістерезисом сигналу феромагнітного резонансу у високих полях".

- розроблено методику визначення параметрів нахиленої анізотропії магнітних плівок методом феромагнітного резонансу. Використання цієї методики дозволило виявити відхилення осі анізотропії деяких отриманих нормальним осадженням багат шарових плівок Co/Pd та одно шарових плівок перехідних металів від нормалі до плівки.

Наукова і практична цінність роботи. Проведені дослідження дозволили виявити основні закономірності формування перпендикулярної магнітної анізотропії нанокристалічних плівок перехідних металів. Запропоновано конкретні методи визначення параметрів доволно орієнтованої одноосної анізотропії магнітних плівок. Отримані результати можуть бути використаними при розробці систем перпендикулярного запису інформації.

На захист виносяться такі наукові положення:

1. Модифікація розмагнічуючого фактора плівки,

обумовлена магнітостатичним механізмом, дає основний внесок в перпендикулярну анізотропію нанокристалічних плівок Zd - металів, причому величина цього внеску зростає із збільшенням намагніченості плівки.

2. Із збільшенням товщини нанокристалічних плівок нікеля при наявності в них значних розтягуючих напруг відбувається перехід вектора намагніченості від площинної орієнтації до перпендикулярної, обумовлений зростанням магнітостатичного внеску в перпендикулярну анізотропію та, як наслідок, зміною знака сталої ефективної анізотропії плівки.

3. Зміна періоду залежності поля феромагнітного резонансу від азимутального кута прикладеного магнітного поля при зменшенні полярного кута відображує наявність в плівці нахиленої анізотропії і дозволяє визначити її параметри.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та були представлені на:

1. І Республіканської міжвузовської наукової конференції "Актуальні проблеми фізики твердого тела, радіофізики і теплофізики", Ашхабад, Туркменія, 4-6 квітня (1991).
2. Українсько-польському семінарі з фізики магнітних явищ, Київ, 12-14 травня (1992)
3. XIII Всесоюзної конференції "Новые магнитные материалы микроэлектроники", Астрахань, Росія, 21-26 вересня (1992).
4. VI науковому семінарі "Фізика магнітних явищ", Донецьк, 24-29 травня (1993)
5. International Conference on magnetism (ICM-94), Warsaw, Poland, 22-26 August (1994)
6. NATO Advanced Study Institute "Frontiers in Nanoscale Science of Micron/Submicron Devices", Kiev, Ukraine, August 16-27 (1995)
7. European Magnetic Materials and Applications Conference (EMMA'95), Vienna, Austria, 3-8 September (1995)

Крім того, матеріали дисертації доповідались на наукових семінарах Інституту металофізики.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 13

наукових праць, в тому числі 5 статей в журналах та 8 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота викладена на 129 сторінках і складається з вступу, чотирьох глав, висновків та списку використаної літератури, що включає 105 найменувань/ вміщує 27 рисунків та 2 таблиці.

Особистий внесок автора. Дисертантом безпосередньо були отримані нанокристалічні плівки Ni та Co, проведено їх дослідження за допомогою електронної мікроскопії (в тому числі і лоренцовської), розроблено програми для розрахунків кутових залежностей поля ФМР та визначення магнітних параметрів плівок. Йому також належить значна роль в інтерпретації отриманих результатів.

Об'єктами дослідження були нанокристалічні плівки Ni та Co, осаджені електронно - променевим методом на підкладки з слюди та скла, а також багат шарові плівки Co/Pd, осаджені катодним розпиленням при постійному струмі пар мішеней Co та Pd, розташованих одна над іншою.

Основні методи дослідження: феромагнітний резонанс, ядерний магнітний резонанс, просвічуюча електронна мікроскопія, лоренцівська мікроскопія, Оже - електронна спектроскопія, комп'ютерна обробка результатів, комп'ютерне моделювання.

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 про непланарну анізотропію в одно- та багат шарових плівках на основі 3d-феромагнітних металів. В першому розділі вводиться поняття перпендикулярної анізотропії та її більш загального випадку - непланарної анізотропії. Потім розглядаються причини виникнення перпендикулярної (непланарної) анізотропії в одно шарових плівках. Підкреслюється, що в реальних плівках величина анізотропії

залежить не стільки від сталих матеріала, скільки від його структурного стану. Можна виділити декілька фізичних механізмів виникнення анізотропії: 1 - магнітокристалічний/ 2 - магнітопружний/ 3 - магністатичний, обумовлений діполь- діпольною взаємодією, який має наступні форми реалізації:

- анізотропний розподіл дефектів по межах кристалітів/
- анізотропія форми зразка (макроскопічна анізотропія форми)
- анізотропія форми елементів структури (мікроскопічна чи внутрішня анізотропія форми).

Всі ці механізми детально обговорюються в другому - четвертому розділах. В п'ятому розділі розглянуто результати попередніх досліджень перпендикулярної анізотропії дрібнокристалічних плівок 3d - металів. Підкреслюється, що більшість висновків цих робіт мали якісний характер, в кожному випадку враховувався тільки один механізм, теоретичні та експериментальні результати не співпадали. Зроблено висновок про доцільність подальшого вивчення механізмів формування перпендикулярної анізотропії дрібнокристалічних плівок 3d - металів як перспективного матеріалу для систем магнітного запису інформації.

В шостому розділі розглядається перпендикулярна анізотропія в нових системах - в багат шарових плівках феромагнітний метал - благородний метал, товщина кожного з шарів не перевищує кількох нанометрів. Ще десять років тому було визначено, що інтерфейс грає головну роль в формуванні великої перпендикулярної анізотропії таких систем і запропоновано формулу, що феноменологічно встановлює зв'язок між інтерфейсною, об'ємною та вимірною анізотропіями. З того часу було виконано кілька сотень робіт, але, незважаючи на це, мікроскопічна природа поверхневої анізотропії залишається не до кінця зрозумілою через суттєву різницю в результатах для номінально еквівалентних систем. Розглядаються можливі причини такої різниці - якість інтерфейсу та її зв'язок з технологією отримання плівки, формування стовчастої структури та викривлення напрямку росту шарів, вплив напруг на величину як об'ємної, так і поверхневої анізотропії. Зроблено висновок про доцільність

подальшіх досліджень.

В другій главі описані експериментальні методики, які використовувались при проведенні роботи, експериментальні установки, способи одержання зразків.

Нанокристалічні плівки Ni та Co були одержані електроно-променевим випаровуванням на стандартній установці ВУП - 5М із графітового тигля на скляні та слюдяні підкладки при кімнатній температурі. Якість вакуума складала 10^{-6} Торр до вимкнення електронної пушки та $5 \cdot 10^{-5}$ Торр при її роботі. Швидкість осадження залежала від підбору параметрів електронної пушки і для цих зразків становила приблизно 0.1 нм/с. З метою отримання в одному циклі серії зразків різних товщин було виготовлено спеціальну рухливу заслонку, яка керувалась оператором. Товщина плівок вимірювалась за допомогою інтерференційного мікроскопу МІИ-4.

У зв'язку з тим, що більшість результатів було отримано за допомогою методу феромагнітного резонансу, в другому розділі описуються загальні принципи цього методу. Явище ФМР пов'язано з прецесією вектора намагніченості навколо магнітного поля. У відсутності магнітної анізотропії власна частота прецесії пропорційна напруженості поля. Наявність магнітної анізотропії суттєво ускладнює умову резонансного поглинання. В загальному випадку розв'язок можна знайти тільки за допомогою чисельних методів. Метод ФМР дозволяє знайти лише значення полів анізотропії, для визначення сталих анізотропії необхідно знати величину намагніченості, яку треба отримати за допомогою інших методик. Головним же достоїнством методу ФМР є його висока чутливість, що особливо важливо при дослідженні тонких плівок.

В даній роботі дослідження проводились за допомогою спектрометра ФМР фірми RADIOFAN, працюючого на частоті 9 Гц. Максимальне значення прикладеного магнітного поля складає 1.1 Т.

Електронно-мікроскопічні дослідження структури виконувались на просвічуючому електронному мікроскопі ПЕМ-100, на цьому ж приладі досліджувалась доменна структура плівок в площині плівки. Хімічний склад плівок досліджувався на Оже-спектрометрі JEOL JAMP-10s. В четвертому та п'ятому

розділах обговорюються фізичні основи цих методік.

В третій главі представлено результати дослідження структури і магнітних властивостей нанокристалічних плівок Ni та Co, осаджених електронно-променевим випаровуванням. В одному технологічному циклі отримувалась серія плівок різних товщин ($D = 5 - 40$ нм).

Розміри кристалітів d у площині плівки визначалися за допомогою просвітлюючого електронного мікроскопа. У найтонших плівках ($D \approx 5$ нм) $d = 5$ нм. У плівках з найбільшою товщиною ($D \approx 40$ нм) розмір кристалітів збільшувався до 10 нм.

Величина перпендикулярної анізотропії (ПА) визначалась методом ФМР при кімнатній температурі на частоті 9,4 ГГц. Для цього вимірювалось поле резонансу при паралельній та перпендикулярній орієнтаціях магнітного поля відносно площини плівки. Отримані значення підставлялися у відомі рівняння Кіттеля для феромагнітного резонансу, звідки отримували значення ефективного поля анізотропії H_a^{eff} , яке пов'язано з величиною поля перпендикулярної анізотропії H_L^{eff} та намагніченістю зразка M співвідношенням

$$H_a^{eff} = H_L^{eff} - 4\pi M \quad (1)$$

Цікаво, що при товщині $D \approx 20$ нм ефективне поле анізотропії змінює знак на позитивний. Це означає, що ефективне поле ПА перевищує поле розмагнічування плівки і енергетично більш вигідною конфігурацією буде розташування вектора намагніченості плівки вздовж нормалі до поверхні.

Аналіз товщинної залежності ефективного поля анізотропії проводився на основі теорії, викладеної в другому розділі:

$$H_a^{eff} = H_G - H_-(D) + H_M \quad (2)$$

де H_G - магнітострикційний внесок, обумовлений зв'язком плівки з підкладкою, другий член - пов'язаний з формуванням стовпчастої структури і модифікацією через це розмагнічуючого фактора плівки N_{eff} , а H_M - невідомий поки що внесок, припущення про природу якого зроблене нижче.

Для експериментального вивчення H_G вимірювався ФМР у

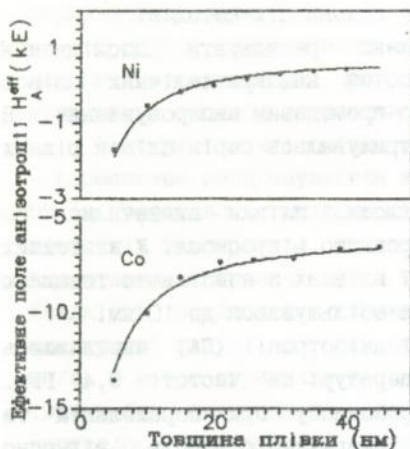


Рис.1

Залежність H_A^{eff} нанокристалічних плівок Ni та Co від товщини

плівці до і після її зняття з підкладки. Для різних серій величина H_D змінювалась від 1 до 2 кЕ, але в межах однієї серії розкид H_D був не дуже великий (не більший 0.2 кЕ), тому при розрахунках за формулою (2) H_D вважався постійним для всієї серії. Для серії плівок на рис.1 $H_D \approx 1.3$ кЕ.

Згідно з теорією, ефективний розмагнічуючий фактор такої плівки визначається як:

$$N_{eff} = 4\pi(1 + (N_{-B}^Z - N_{-B}^1)(1 - M_B/M_S)^2) \quad (3)$$

де N_{-B}^Z і N_{-B}^1 - розмагнічуючі фактори окремого зерна вдовж нормалі до плівки та в її площині відповідно, M_B (M_S) - намагніченість кристаліта (його межі). У наближенні витягнутого еліпсоїда Нееля розмагнічуючі фактори зерна мають вигляд

$$N_{-B}^Z = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left(\ln \frac{1 + e}{1 - e} - 2e \right), \quad e = \sqrt{1 - (d/D)^2} \quad (4)$$

$$N_{-B}^1 = (1 - N_{-B}^Z)/2$$

Підстановка (4) в (3) дає $N_{eff}(D)$. Нарешті,

$$H_{-}(D) = M_B N_{eff}(D) \quad (5)$$

Таким чином, у формулі (2) залишились два невідомих параметри - H_M і M_B/M_S , які визначались шляхом найкращого опису експериментальної залежності $H_{-}^{eff}(D)$ формулою (2) за допомогою нелінійного методу найменших квадратів. Результат такої обробки наведено на рис.1 у вигляді неперервної

кривої. Видно, що розрахована і експериментальна залежності $H_a^{eff}(D)$ практично збігається при $H_M=2.1$ кЕ та $M_D/M_S=0.08$. Цей збіг дозволяє з великим ступенем достовірності припустити, що внесок стовпчастої структури до ефективної ПА плівок Ni, який раніше вважався незначним, становить до 45% величини H_1^{eff} (тут і надалі всі оцінки внесків різних механізмів до H_1^{eff} зроблено для плівки з товщиною $D \approx 30$ нм). Таким чином, внесок стовпчастої структури у модифікацію розмагнічуючого фактора плівок становить близько 2 μ .

З метою аналізу складу домішок плівки було досліджено методом Оже-електронної спектроскопії (ОЕС). Було виявлено майже повну відсутність кисню (4 % поблизу поверхні і підкладки і менше 1 % в об'ємі плівки). Єдиною домішкою, що виявилась суттєвою, був вуглець (близько 10 % по всій товщині плівки). Кількість нікелю по всій товщині плівки перевищувала 85 %. Відомо, що вуглець майже не розчиняється у нікелі, тому природно припустити, що весь вуглець збирається на межах зерен, що приводить до різкого зниження їх намагніченості і до магнітної ізоляції кристалітів.

Іншим способом визначення розмагнічуючого фактора плівок є вимір нахилу петлі гістерезису при перпендикулярній орієнтації магнітного поля. Для плівки з $K_1 > 2\mu\text{m}^2$ процес намагнічування має здійснюватися зсувом доменних стінок, а $M(H)=\chi H$, де $\chi=1/N_{eff}$. У нашому випадку $N_{eff} \approx 5$, тобто навіть більше, ніж можуть дати стовпчики. Деяка розбіжність в результатах може бути пояснена внеском, обумовленим неідеальністю поверхні плівки. З літератури відомо, що цей внесок може зменшувати N_{eff} на 1 - 2.5. У нашому випадку додатковий вклад поверхні до зменшення N_{eff} становить близько 1.3. А внесок, який обумовлений модифікацією розмагнічуючого фактора, дає до 60 % величини ПА.

Магніострикційний внесок, обумовлений зв'язком плівки з підкладкою, який раніше вважався основним для Ni, дає не більше 25 % величини H_1^{eff} . На третій внесок залишається до 30 % величини H_1^{eff} . Для розуміння його природи важливою є поява в спектрах зразків через кілька місяців після осадження додаткового резонансного сигналу ФМР, інтенсивність якого з часом збільшувалась, в той час як

Інтенсивність основного резонансного сигналу зменшувалась. При цьому резонансне поле додаткового піка залишалось незмінним. Очевидно, що ми маємо справу з структурною релаксацією плівки, наслідком якої є поява областей з ПА, відмінною від висхідної. При цьому H_a^{eff} для цих областей плівки на 2 кЕ менше, ніж для решти плівки. Збіг ΔH_a^{eff} з величиною H_M дозволяє припустити, що спостерігається релаксація третього механізму, який зникає стрибком або за короткий час і неодноразово по всій плівці. Найпевніше, цей механізм пов'язаний з напруженнями в межах кристалітів.

В четвертому розділі представлено результати дослідження механізмів ПА нанокристалічних плівок Co, що було проведено для додаткової перевірки правильності моделі, запропонованої для нанокристалічних плівок Ni. Попередньо було проведено оцінку величин кожного з трьох вкладів для плівок Co. Серія плівок Co різних товщин були досліджені за допомогою тих саміх методик, що і плівки Ni. Залежність H_L^{eff} від товщини представлено на рис.1. Було отримано наступні величини полів анізотропії:

$$H_G \approx 0.9 \text{ кЕ}, \quad H_U \approx 8.8 \text{ кЕ}, \quad H_M \approx 1.6 \text{ кЕ}.$$

Ці результати майже повністю збіглися з передбаченими на основі запропонованої моделі, що ще раз доводить її правильність. Видно, що у випадку нанокристалічних плівок Co ми маємо один домінуючий механізм - магнітостатичний, що дає більше ніж 80% величини ПА. Два інших механізми мають практично таку саму величину, як і в плівках Ni, але у зв'язку із різким зростанням величини H_U , їх сумарний внесок до величини ПА складає менше ніж 20%.

В п'ятому розділі розглянуто особливості феромагнітного резонансу в плівках Ni з перпендикулярною намагніченістю. Плівки досліджувались за допомогою двох спектрометрів ФМР, які відрізнялись частотними діапазонами. Похідна сигналу ФМР реєструвалась на частотах 9.4 та 37.5 ГГц при кімнатній температурі.

Спектри ФМР на частоті 9.4 ГГц в плівці Ni з перпендикулярною намагніченістю показані на рис.2. Крім додаткового максимуму в перпендикулярній конфігурації ФМР (спектр б), про який буде сказано нижче, вони мають ще ряд

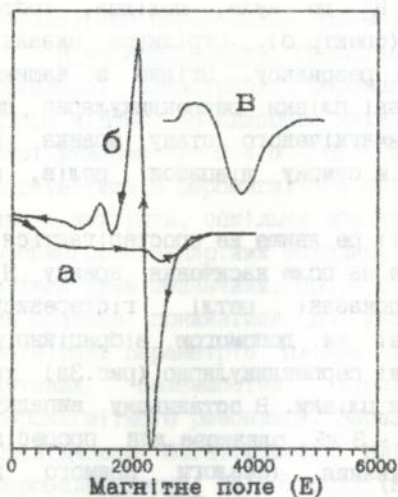


Рис.2

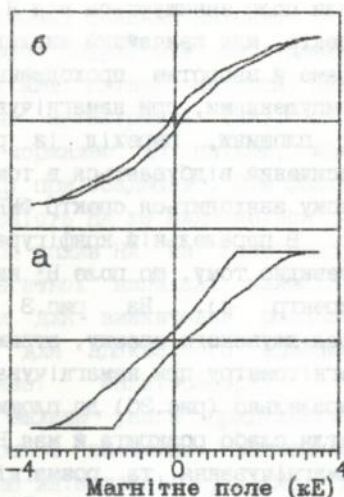


Рис.3

Рис.1 Спектри ФМР в плівках Ni на частоті 9,4ГГц: а - в перпендикулярній конфігурації ФМР при прямому проходженні; б - при зворотному проходженні; в - в паралельній конфігурації.

Рис.2 Петлі гістерезису в плівках Ni: а- при перпендикулярному намагнічуванні; б - при паралельному намагнічуванні.

особливостей. По-перше, величина резонансного поля в перпендикулярній конфігурації H_r^{\perp} на 1 кЕ нижче, ніж в паралельній H_r^{\parallel} , що вказує на перпендикулярну орієнтацію намагніченості, оскільки ми не виявили анізотропії з нахиленою віссю в цих зразках. По-друге, спостерігалось явище, яке ми назвали гістерезисом сигналу ФМР. Головною його особливістю є різниця спектрів ФМР, якщо їх реєстрація проводиться при збільшенні (пряме проходження) або зменшенні (зворотне проходження) постійного магнітного поля. В першому випадку спектр дуже спотворений - чітко видно тільки високопольовий максимум (мінімум в разі зміни фази сигналу) похідної (спектр а). При зворотному проходженні резонансу,

коли поле зменшується від $H > H_V^1$ до нуля, похідна, тобто спектр, має звичайний вигляд (спектр б). Стрілками вказані пряме й зворотне проходження резонансу. Згідно з нашими припущеннями, при намагнічуванні плівки перпендикулярно до її площини, перехід із розмагніченого стану зразка в насичений відбувається в тому ж самому діапазоні полів, в якому знаходиться спектр ФМР.

В паралельній конфігурації це явище не спостерігається, очевидно тому, що поле H_V^{\parallel} вище за поле насичення зразку $H_{\parallel}^{\parallel}$ (спектр в). На рис.3 показані петлі гістерезису досліджуваного зразку, отримані за допомогою вібраційного магнітометра при намагнічуванні перпендикулярно (рис.3а) та паралельно (рис.3б) до площини плівки. В останньому випадку петля слабо розкрита й має $H_{\parallel}^{\parallel} \sim 3$ кЕ, однакове для процесів намагнічування та розмагнічування (аналоги прямого й зворотного проходження). Відповідні спектри ФМР однакові при обох варіантах запису. Петля на рис.3а близька до прямокутної та має рівні поля насичення при намагнічуванні та розмагнічуванні зразку. Збереження насиченого стану від 3 до 1.4 кЕ при зворотному проходженні якраз і дозволяє спостерігати майже не спотворений резонансний сигнал, коли $H_V^1 \sim 2.5$ кЕ.

Використання ФМР спектрометра з частотою 9 ГГц залишає нез'ясованим питання про походження додаткового резонансу, тому були проведені виміри на частоті 37.5 ГГц, де резонансне поле в 4 рази вище, ніж на попередній, і $H_V^1 > H_{\parallel}^1$. Ці спектри не показані на рисунку, тому що при прямому й зворотному проходженні мають вигляд, аналогічний спектру б. Виходить, що додатковий резонансний максимум дійсно не зв'язаний з доменною структурою, а також не є спін-хвильовим резонансом, оскільки він існує й в паралельній конфігурації ФМР і кутова залежність резонансного поля цього додаткового сигналу узгоджується з відомими формулами Кіттеля для однорідної прецесії. Встановлено, що додатковий пік з'являється, коли товщина плівки перевищує 30 нм, але залежність його резонансних параметрів від товщини не погоджується з відомими уявленнями про неоднорідний резонанс. Найімовірніше, його походження пов'язане із

структурною перебудовою при збільшенні товщини плівки.

В четвертій главі представлено результати дослідження нахиленої анізотропії феромагнітних плівок методом ФМР. Добре відомо, що одноосна нахилена анізотропія (НА), вісь якої утворює кут $0 < \alpha < 90^\circ$ з нормаллю до плівки, може формуватися в феромагнітній плівці при осадженні. Цім фактом часто нехтують, оскільки або наявність НА не виявляється за допомогою стандартних методик, або вплив НА на властивості плівок дуже незначний. Проте в багатьох випадках наявність НА повинна прийматися до уваги для визначення реальних магнітних параметрів плівок та для адекватного описання кутових залежностей торсіонної магнітометрії та феромагнітного резонансу. Зараз велика увага приділяється дослідженню багатосарових плівок з великими значеннями перпендикулярної анізотропії (поле анізотропії $H_A \sim 4\pi M_B$, де M_B намагніченість насичення плівки). В деяких зразках спостерігався ряд ефектів (поява додаткових максимумів на кутових залежностях резонансних полів ФМР, їх переміщення і таке інше). Автори цих робіт роблять припущення, що тільки врахування членів четвертого порядку перпендикулярної анізотропії дозволяє отримати добрий збіг між теоретичними та експериментальними результатами. Але, як буде показано в цій главі, більшість з вказаних результатів може бути описано при використанні членів тільки другого порядку з врахуванням незначного (до 10°) відхилення осі анізотропії від нормалі до плівки.

Перший розділ присвячено розрахунку кутових залежностей ФМР в плівках з нахиленою анізотропією. Вільна енергія плівки з нахиленою віссю в сферичній системі координат записується у вигляді!

$$F = -MH(\sin\theta_H \cos\phi_H \sin\theta \cos\phi + \sin\theta_H \sin\phi_H \sin\theta \sin\phi + \cos\theta_H \cos\theta) + 2\pi M^2 \cos^2\theta \quad (6)$$

$$K_1(\sin^2\theta \sin^2\phi + \sin^2\alpha \cos^2\theta + \cos^2\alpha \sin^2\theta \sin^2\phi - 2\sin\alpha \cos\alpha \sin\theta \cos\theta \sin\phi)$$

де θ і ϕ - рівноважні полярний та азимутальний кути намагніченості, θ_H та ϕ_H визначають напрямок зовнішнього магнітного поля, перший член рівняння відповідає енергії

однорідно намагніченої плівки в зовнішньому магнітному полі, другий член представляє анізотропію форми плівки а останній відповідає енергії одноосної анізотропії (K - стала анізотропії другого порядку).

Найбільш загальна форма запису рівняння ФМР в сферичній системі координат

$$\omega = \frac{\gamma}{M \sin\theta} \left[\frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \phi^2} - \left(\frac{\partial^2 F}{\partial \theta \partial \phi} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

де γ - гіромагнітне відношення, ω - частота НВЧ - поля. Рівноважні кути намагніченості θ та ϕ визначаються з умов

$$\partial F / \partial \phi = 0; \partial F / \partial \theta = 0 \quad (8)$$

Підставляючи F в рівняння (7 - 8) та спільно роз'язуючи систему рівнянь (7 - 8) ми отримуємо значення резонансного поля ФМР H_T для заданих ω , θ_H , ϕ_H та фактору спектроскопічного розщеплення g. Очевидно, що спільний розв'язок системи рівнянь можливий лише в чисельному вигляді. Тому було написано комп'ютерну програму, яка дозволяла отримувати однозначні розв'язки цієї системи.

За допомогою цієї програми були розраховані кутові залежності $H_T(\phi_H)$ та $H_T(\theta_H)$ для плівок Co з різними величинами K і α . Підкреслимо, що зміна частоти ФМР (в межах 3 - 40 ГГц) та намагніченості плівок (в межах 200 - 1500 Гс) не призведе до зміни характеру кутових залежностей.

Кутова залежність $H_T(\phi_H)$ для різних значень θ_H для випадку $\alpha=15^\circ$, $K=5 \times 10^6$ ерг/см³, $M=1420$ Гс, $g=2.08$ та $f=25$ ГГц представлена на рис.4. Видно, що характер кутової залежності змінюється з ростом θ_H . Коли H лежить в площині плівки, в діапазоні кутів 0 - 360° спостерігаються два максимуми, причому кутова залежність має 180°-ну періодичність. При наближенні θ_H до кута відхилення осі анізотропії α максимуми зближуються (при цьому періодичність кутової залежності змінюється на 360°-ну). Починаючи з деякого кута θ_H , який в загальному випадку не дорівнює α , в діапазоні кутів ϕ_H 0 - 360° спостерігається лише один

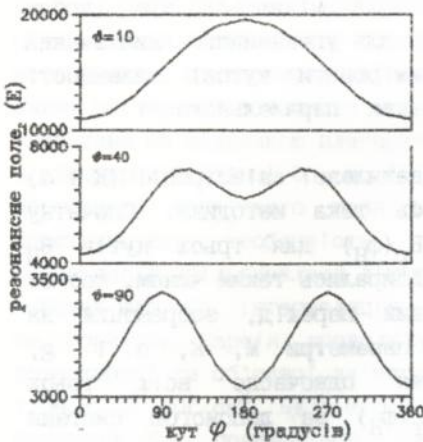


Рис. 4

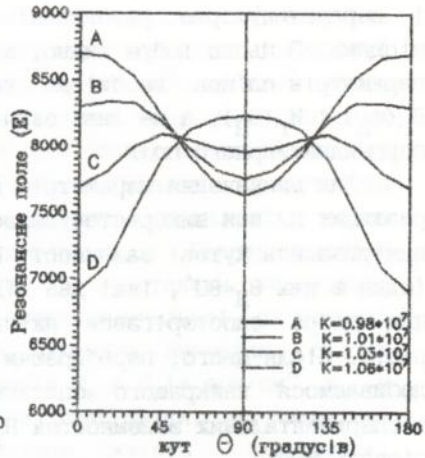


Рис. 5

Рис. 4 Залежність резонансного поля ФМР від кута ϕ_H для різних θ_H для плівки з нахиленою анізотропією.

Рис. 5 Залежність резонансного поля ФМР від кута θ_H при $\phi_H = 90^\circ$ для плівки з нахиленою анізотропією для різних величин K (в ерг/см³), $M = 1420$ Гс, $\alpha = 25^\circ$, $f = 25$ ГГц, $g = 2.08$.

максимум. Таким чином, зміна характеру кутової залежності $H_r(\phi_H)$ є одним з критеріїв наявності в плівці НА. Проте при стандартній методиці дослідження кут ϕ_H зафіксовано, а кут θ_H змінюється з 0 до 180° . Тому для цих же параметрів розглянемо характер кутової залежності $H_r(\theta_H)$ для різних ϕ_H . У випадку $\phi_H = 0$ положення максимуму кутової залежності відхиляється від $\theta_H = 0$ на величину, яка в залежності від параметрів плівки може бути як більше, так і менше α . Із збільшенням ϕ_H ця зсув зменшується і при $\phi_H = 90^\circ$ зовсім зникає. Така поведінка кутової залежності також характерна для плівок з НА і є другим критерієм наявності НА в плівці.

При дослідженні кутових залежностей $H_r(\theta_H)$ для різних співвідношень між параметрами M , K , α та ω було виявлено, що в деяких випадках при незначних змінах K (менш ніж на 10%) характер кутової залежності змінюється радикальним чином. На рис. 5 видно, що при збільшенні K спочатку з'являється, а потім знов зникає додатковий максимум, при цьому паралельне

і перпендикулярне резонансі поля міняються між собою місцями. З цього добре видно, що для упевненого визначення параметрів плівок необхідно вимірювати кутові залежності $H_T(\phi_H)$ і $H_T(\theta_H)$, а не лише значення паралельного і перпендикулярного поля.

Для визначення параметрів нахиленої анізотропії (K і α) реальних плівок використовувалась така методика. Спочатку вимірювались кутові залежності $H_T(\phi_H)$ для трьох кутів θ_H (один з них $\theta_H=90^\circ$, інші два підбирались таким чином, щоб на них добре спостерігався якісний перехід, зображений на рис.4. Після цього, перебираючи параметри M , K , α і g , добиваємося найкращого описання одночасно всіх трьох експериментальних залежностей $H_T(\phi_H)$ за допомогою системи рівнянь 7-8.

В другому розділі розглядається вплив тримача на експериментальні дослідження плівок з НА. В цій роботі використовувався спеціальний тримач, що дозволяє одночасно вимірювати кутові залежності $H_T(\phi_H)$ і $H_T(\theta_H)$. Через присутність в його конструкції зубчатих передаючих механізмів, можливі деякі перекоси столику об'єктів. Показано, що навіть при незначному перекосі тримача (менше 1°), у випадку дослідження НА з $\alpha = 5^\circ$ а $K \approx 15\%$ від $2\pi M^2$, такі перекоси можуть суттєво вплинути на точність результатів. Тому вкрай важливо до початку роботи паспортизувати тримач. Для цього була використана плівка пермалюю, відсутність в якій як площинної, так і нахиленої анізотропії було підтверджено методом низькочастотного ФМР. Було виявлено, що наш тримач має перекося 0.55° . Ця величина враховувалась при обробці всіх експериментальних результатів.

В третьому розділі розглядаються результати дослідження різних типів одноосної анізотропії в багатшарових плівках Co/Pd , осаджених катодним розпиленням при постійному струмі пар мішеної Co та Pd , розташованих одна над іншою. Товщина шару Pd була фіксована і складала ≈ 1.85 нм, товщина шару Co в різних зразках змінювалась з 0.35 до 1.8 нм. Магнітні властивості плівок досліджувались за допомогою методу ФМР на частоті 9.3 ГГц. Застосування тест-методу, описаного в

першому розділі, дозволило розділити одноосні анізотропії різних типів, існуючі в багат шарових плівках Co/Pd. Було встановлено, що планарну анізотропію $\approx 10^5$ ерг/см³ мають майже всі зразки незалежно від товщини шару Co. Оскільки така саме за величиною планарна анізотропія спостерігалася і в одношаровій плівці Co, то її поява обумовлена присутністю постійного магнітного поля в площині підкладки через конструкційну особливість установки. Перпендикулярна анізотропія збільшувалася лінійно із зростанням зворотньої товщини шару Co. Інтерполяція експериментальної залежності за формулою Карсія дозволила отримати значення сталих поверхневої та об'ємної анізотропії $K_s \approx 0.14$ ерг/см², $K_v \approx 1.06 \times 10^6$ ерг/см². Було зроблено припущення, що невелике значення K_s пояснюється низькою якістю інтерфейсу. Дослідження зразків за допомогою ядерного магнітного резонансу підтвердило це. В деяких зразках Co/Pd замість планарної та перпендикулярної анізотропій з'являється анізотропія з віссю, нахиленою на незначний кут по відношенню до нормалі (близько 8°). Можливою причиною нахиленої анізотропії є атомне самозатемнення та пов'язані з цим напруги.

Основні результати та висновки

1. Визначено основні механізми формування перпендикулярної анізотропії в нанокристалічних плівках Ni та Co: а) магнітостатичний механізм, обумовлений формуванням стовбчастої структури і пов'язаною з цим модифікацією розмагнічуючого фактору плівки/ б) магнітострикційний механізм, обумовлений різницею температурних коефіцієнтів розширення плівки та підкладки (макронапруги)/ в) магнітострикційний механізм, обумовлений локальними напругами в межах кристалітів (мікронапруги). Встановлено внесок кожного механізму. Основним механізмом в таких плівках є магнітостатичний, причому величина його внеску зростає із збільшенням намагніченості плівки.

2. Із збільшенням товщини нанокристалічних плівок Ni знак сталої ефективної анізотропії плівки змінюється з "-" на "+", при цьому перпендикулярна орієнтація вектора

намагніченості плівки стає енергетично більш вигідною.

3. При деяких умовах в феромагнітних плівках значення порогового поля насичення може знаходитися в границях ширини лінії сигналу ФМР. В цьому випадку при прямокутній петлі гістерезису спостерігається гістерезис сигналу ФМР в високих полях.

4. Додаткові низькопольові сигнали ФМР зумовлені областями плівки, що відрізняються величиною ПА. Їх походження найімовірніше пов'язане із структурною перебудовою при збільшенні товщини плівки.

5. Запропоновано метод визначення параметрів нахиленої анізотропії за даними залежностей поля ФМР від азимутального та полярного кутів прикладеного зовнішнього магнітного поля. Вироблено якісні критерії існування нахиленої анізотропії.

6. Знайдено, що в плівках з нахиленою анізотропією при деяких значеннях намагніченості, K , α та частоти ФМР характер залежності поля резонанса від полярного кута θ прикладеного зовнішнього магнітного поля суттєво змінюється - на ній з'являється додатковий максимум.

7. За допомогою тест-методу вдалося розділити одноосні анізотропії різних типів, існуючі в багат шарових плівках Co/Pd , отриманих методом катодного розпилення. Було встановлено, що планарну анізотропію $\sim 10^5$ ерг/см³ мають майже всі зразки незалежно від товщин шарів Co та Pd , а перпендикулярна анізотропія зменшується з ростом товщини шару Co , що вказує на важливу роль поверхневої анізотропії в її формуванні. При деякому співвідношенні товщин Co та Pd замість планарної та перпендикулярної анізотропії з'являється анізотропія з віссю, нахиленою на незначний кут по відношенню до нормалі. Можливою причиною нахиленої анізотропії є атомне самозатемнення та пов'язані з цим напрути.

Основний зміст роботи викладено в публікаціях

1. Казакей Г.Н., Лесник Н.А., Мицек А.И., Пушкарь В.Н. /Перпендикулярная анизотропия и эффективный размагничивающий фактор пленок Ni //ФТТ. - 1992, т. 34, №2. - с.571-578.

2. Kakazei G.M., Lesnik N.A., Micek A.I., Pushkar' V.M. /Дослідження механізмів перпендикулярної магнітної анізотропії нанокристалічних плівок Ni//УФЖ. - 1994. - т.39, N 11-12. - с. 1120-1122.
3. Kakazei G.N., Lesnik N.A. /The study of the perpendicular anisotropy in the nanocrystalline Ni and Co films//J.Magn.Magn.Mat. - 1996. - v.155, N1. - p.57-59.
4. Лісник Н.А., Каказей Г.М. /Особливості ФМР в плівках Ni з перпендикулярною намагніченістю//УФЖ. - 1994. - т.39, N7-8. - с.885-888.
5. Golub V.O., Kakazei G.N., Lesnik N.A. /FMR study of the oblique anisotropy in 3d ferromagnetic films //Colloquium digest of 14th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Dusseldorf Germany. - 1994. - p.259-260.
6. Лесник Н.А., Каказей Г.Н., Голуб В.О. /Анизотропия с наклонной осью в ферромагнитных пленках //Фізичний кур'єр. - 1993. - N4. - с.3-4.

Summary

Gleb N. Kakazei. Uniaxial out-of-plane anisotropy of the polycrystalline and layered films based on Ni and Co

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

The complex investigation of the formation of the perpendicular anisotropy in the 3d-metals nanocrystalline films was performed. The main anisotropy mechanisms and their contribution values were determined. It was found that the sign of the effective anisotropy constant was changed when the Ni film thickness had become 20 nm. Method of the determination of the out-of-plane anisotropy parameters was designed. The use of this method allows to determine the deflection of the anisotropy axis from the film normal up to 10° in the some normally evaporated Co/Pd multilayers.

Аннотация

Каказей Г.Н. Непланарная одноосная анизотропия

поликристаллических и слоистых пленок на основе никеля и кобальта.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.13 - физика металлов, Институт металлофизики НАН Украины, Киев, 1996.

В работе проведены комплексные исследования формирования перпендикулярной анизотропии в нанокристаллических пленках переходных металлов. Выявлены основные механизмы перпендикулярной анизотропии и установлен вклад каждого из них. Обнаружено, что при толщине пленок Ni порядка 20 нм происходит изменение знака константы эффективной анизотропии пленки. Разработана методика определения параметров наклонной анизотропии магнитных пленок методом ферромагнитного резонанса. Использование этой методики позволило обнаружить отклонение оси анизотропии в некоторых полученных нормальным осаждением многослойных пленках Co/Pd и однослойных пленках переходных металлов от нормали к пленке на угол порядка 10° .

Ключові слова: нанокристалічні магнітні плівки, багатослоєві плівки, непланарна магнітна анізотропія, ферромагнітний резонанс, кобальт, нікель.

Підп. до друку 30.05.96 р. Формат 60×84 1/16.
Папір офс. № 1. Друк. офс. Умовн. друк. арк. 1,2.
Обл. вид. арк. 1,0. Тир. 100. Зам. 48.

Видавництво «Логос», Київ, вул. Б. Хмельницького, 19.

436775

AB 35.2377