

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. Каразіна

Самофалов Володимир Миколайович

УДК 537.622.6(043)

СИЛЬНІ ПОЛЯ РОЗСІЯННЯ В СИСТЕМАХ МАГНІТІВ З
ГІГАНТСЬКОЮ МАГНІТНОЮ АНІЗОТРОПІЄЮ

спеціальність 01.04.11-магнетизм

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків-2009 р.

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук, професор,
Равлік Анатолій Георгійович,
професор кафедри фізики металів та напівпровідників
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор,
Горобець Юрій Іванович,
заступник директора Інституту магнетизму
НАН України та МОН України

доктор фізико-математичних наук, професор
Фінкель Віталій Олександрович,
начальник лабораторії фізичного матеріалознавства
функціональних керамік Національного наукового центру
„Харківський фізико-технічний інститут” НАН України

доктор фізико-математичних наук, ст. н. співробітник
Хацько Євген Миколайович,
провідний науковий співробітник,
Фізико-технічного інституту низьких температур
імені Б.І. Веркіна НАН України

Захист відбудеться " 13 " березня _____ 2009 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.03 Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна (61077, м. Харків, пл. Свободи, 4, ауд. ім. К. Д. Синельникова).

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розіслано " 28 " січня _____ 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.П. Пойда

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Наприкінці 60-х років минулого століття був відкритий новий клас магнітних матеріалів – сполуки 3d-ферромагнетиків з рідкоземельними металами (РЗМ). Розроблені на їх основі постійні магніти мають рекордно високі магнітні характеристики. Унікальність магнітних властивостей цих матеріалів обумовлена, перш за все, їх гігантською магнітною анізотропією, поле якої H_K досягає, наприклад, в $SmCo_5$ майже 500 кЕ . Те, що постійні магніти з гігантською магнітною анізотропією можуть генерувати великі поля розсіяння, які перевищують значення індукції речовини магнітів у декілька разів, стало відомо тільки в останні 10 років. Щоб виділити окремо недостатньо вивчений раніше вид полів розсіяння, в дисертаційній роботі введено нове визначення сильного поля розсіяння: *сильним полем розсіяння запропоновано називати таке поле, напруженість якого перевищує значення індукції насичення B_S матеріалу магніту $H > B_S = 4\pi M_S$, де M_S – намагніченість насичення.* Аналіз літературних даних показує, що такі поля є новим, раніше невідомим, видом полів розсіяння з низкою характерних особливостей. На сьогодні відома лише невелика кількість наукових праць з сильних полів, у яких досліджені фізичні умови їх виникнення. Вони були виконані порівняно недавно. Це, зокрема, обумовлено тим, що існування сильних полів розсіяння раніше не передбачалося.

Питання, пов'язані з фізичними причинами виникнення сильних полів розсіяння, в літературі фактично не висвітлені. У переважній більшості праць вивчені поля в так званому циліндрі і сфері Хальбаха різних конструкцій. Результати цих досліджень мають переважно прикладний характер. Оскільки дотепер в деяких роботах циліндр Хальбаха називають «магічним циліндром», то це побічно вказує на винятковість такої системи магнітів, а також свідчить про неповноту знань щодо фізичної природи сильних полів розсіяння. Можна вважати, що вказаний напрям в магнетизмі перебуває на стадії розвитку. До початку виконання роботи систематичні дослідження сильних полів не проводилися. Не були визначені фізичні умови, які забезпечують досягнення і стійкість сильних полів розсіяння, а також не були визначені їх можливі граничні величини.

Як буде показано нижче, в постійних магнітах з гігантською магнітною анізотропією є особливі (сингулярні) точки, поблизу яких поле розсіяння і розмагнічуюче поле набувають дуже високих значень. Особливості розподілу намагніченості поблизу цих особливих точок дотепер залишалися невивченими. Крім того, як виявилось, в системах магнітів в околі від їх сингулярних точок рекордно високих значень набуває і градієнт поля розсіяння. Окреслена проблема не тільки не була вирішена, але раніше не була сформульована. У всіх відомих монографіях з магнетизму нічого не згадується про сильні поля такого виду. Тому вивчення фізичної природи сильних полів розсіяння є актуальною задачею у фізиці магнітних явищ.

Отже, актуальність теми дисертації пов'язана з необхідністю детального теоретичного і експериментального вивчення нових властивостей магнітних систем, обумовлених наявністю гігантського поля анізотропії. Актуальність теми цієї

дисертаційної роботи полягає також і в тому, що встановлені особливі властивості сильних полів розсіяння відкривають можливості для їх широкого використання в різних галузях сучасної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана на кафедрі фізики металів та напівпровідників Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» відповідно до планових завдань науково-дослідного відділу та в рамках міжнародних проєктів:

1. Науково-дослідна робота «Дослідження метрологічних можливостей та розробка лабораторної технології виготовлення тонкоплівкових магніторезистивних датчиків» (госпдоговір №54920, номер ДР 0188 0065296; 1988-1990 pp.)

2. «Теоретична та експериментальна розробка і комплексне вивчення нових довговічних функціональних плівкових матеріалів з унікальними фізичними властивостями для використання в якості відповідальних елементів приладів і пристроїв новітньої техніки» (наказ Міносвіти України №78 від 21.03.91, номер ДР 0193V027850; 1991-1992 pp.).

3. Науково-дослідна робота за грантом Дж. Сороса «Magnetoresistance magnetic multilayers and thickness modulated films» угода №2638000; 1993-1994 pp. та угода №2638200; 1995p.

4. Дослідження наноструктурованих плівок та композицій на їх основі (номер ДР 0103U001534; 2003 - 2005 pp.).

5. Дослідження структури і фізичних властивостей конденсованих плівок та наноструктурованих систем на їх основі (номер ДР 0106U001509); наказ Міносвіти і науки України №654, 16.11.05; 2006-2008 pp.).

6. Науково-дослідна робота «Розробка конструкції і виготовлення системи магнітів для розділення біологічних частинок» (виконана за угодою №54354 на замовлення інституту «Institut Pasteur Korea», Сеул; 2006-2007pp.).

Здобувач був виконавцем науково-дослідних робіт 1-5 із зазначених у списку та науковим керівником теми 6 із вказаного списку.

Мета і завдання дослідження

Метою даної роботи було розв'язання проблеми щодо визначення фізичних закономірностей, які забезпечують виникнення і стабільність сильних полів розсіяння з індукцією $B > B_S = 4\pi M_S$ в системах магнітів з гігантською анізотропією.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. На підставі аналізу рішень різних задач магнітостатики визначити фізичні умови існування сильних полів і їх стабільності. Крім того, визначити основні типи систем магнітів, які генерують сильні поля розсіяння, провести їх класифікацію і ввести основні фізичні параметри, які характеризують сильні поля.

2. Розробити нові методики дослідження, а також модифікувати відомі методики, за допомогою яких можна знайти сильні поля розсіяння і виміряти їх параметри.

3. Вивчити розмірні властивості доменної структури тонких магніторезистивних плівок у формі вузьких смужок. На підставі проведених досліджень розробити методику виготовлення магніторезистивних датчиків мікронних розмірів,

призначених для реєстрації полів розсіяння в широкому інтервалі значень напруженості.

4. Провести експериментальні дослідження розподілів полів розсіяння в системах постійних магнітів. Перевірити відповідність розрахованих і вимірених значень полів розсіяння.

5. Провести оптимізацію різних систем магнітів і визначити граничні значення полів розсіяння для кожної з них, а також знайти граничний рівень градієнта поля.

6. Обґрунтувати можливість практичного використання сильних полів розсіяння в різних галузях сучасної техніки.

Об'єкт дослідження – сильні магнітні поля розсіяння з напруженістю $H > 4\pi M_S$, що генеруються постійними магнітами; фізичні умови виникнення та обчислення граничних значень полів і граничних величин градієнтів цих полів.

Предмет дослідження - системи магнітів з великою анізотропією, в яких поле одноосної анізотропії істотно більше за їх індукцію насичення $H_K \gg 4\pi M_S$.

Методи дослідження - проведення розрахунків сильних полів розсіяння з використанням методу «магнітних зарядів» Кіттеля і вимірювання полів розсіяння за допомогою плівкових магніторезистивних датчиків, ЕПР-спектрометра і спеціальних магнітооптичних середовищ.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше обґрунтована можливість одержання і визначені фізичні умови виникнення сильних магнітних полів розсіяння напруженістю $H > 4\pi M_S$ в різних типах систем магнітів, як з однорідним, так і з неоднорідним розподілом намагніченості.

2. На підставі аналізу результатів проведених комплексних досліджень структури і магнітних властивостей гранульованих плівок *Ag-Co*, *Co-Cu* і острівцевих плівок *Co-Cu* встановлено, що гранульовані плівки *Ag-Co* проявляють гігантський магніторезистивний ефект (ГМР) з коефіцієнтом магніто-опору $\Delta R/R$ до 30%. Встановлено, що ГМР-ефект в плівках *Ag-Co*, *Co-Cu* і острівцевих плівках *Co-Cu* не пов'язаний з суперпарамагнетизмом гранул *Co* в шарах.

3. На підставі вивчення розмірних властивостей доменної структури плівок із сплавів *Ni-Fe* і *Ni-Fe-Co* у вигляді вузьких смужок показано, що низькі значення коерцитивної сили $H_C \approx 0.01E$ досягаються в шарах, які знаходяться в однодоменному стані. При цьому шари мають великі значення коефіцієнта магнітоопору $\Delta R/R = 3-5\%$.

4. Завдяки проведенню прямих вимірювань полів розсіяння за допомогою магніторезистивних датчиків і ЕПР-спектрометра на системі з 2-х магнітів вперше були зареєстровані поля розсіяння, які перевищують в два рази значення індукції насичення матеріалу магнітів. Також вперше доведена відповідність експериментальних значень поля з розрахованою логарифмічною залежністю $H \approx 4M_S \ln(r/a)$, де a – характерний розмір магніту, r – відстань від особливої точки магніту.

5. Вперше проведена класифікація сильних магнітних полів, які можуть бути створені різними системами з постійних магнітів. Залежно від форми області лока-

лізації поля визначено три види сильних полів: *лінійні, точкові і однорідні сильні поля*, для яких встановлені їх максимальні значення для систем кожного типу.

6. Вперше показано, що найбільше значення *лінійного поля* досягається в замкнутій системі типу циліндра Хальбаха: $H \approx 4\pi M_S \ln(R/r)$, де R – радіус циліндра. Найбільші *точкові поля* розсіяння досягаються в системі з декількох пар конічних магнітів, розділених на сектори радіальними площинами, а максимальне значення поля розсіяння $H \approx 6 \pi M_S \ln(R/r)$.

7. Вперше обґрунтована можливість виникнення сильних полів розсіяння в системах магнітів з неоднорідною намагніченістю. Так, в зазорі системи з 2-х циліндрових магнітів з радіальною намагніченістю величина поля розсіяння не перевищує $H_z(z) \approx 4\pi M_S \ln 2(z/R)$. Показано, що відмітною особливістю сильних полів в таких системах є велика область локалізації Δr сильного поля порівняно з діаметром циліндрового магніту: $\Delta r \approx 2R$.

8. Вперше встановлено, що за допомогою систем з постійних магнітів з гігантською магнітною анізотропією можна створювати високоградієнтні поля ($|\nabla H| \approx 10^6 - 10^8 \text{ E/cm}$), сумірні за значенням градієнта поля розсіяння, які досягаються в надпровідних магнітах з конічними концентраторами з феромагнетиків з високою індукцією.

Практичне значення одержаних результатів.

Одержані в дисертаційній роботі результати досліджень пояснюють природу сильних полів розсіяння і у подальшому можуть бути використані при вивченні особливостей магнітного стану поблизу сингулярних точок в постійних магнітах з гігантською магнітною анізотропією. Наприклад, можливість виникнення сильних полів розсіяння слід враховувати при вивченні доменної структури у феромагнетиках, а також дослідженнях інших магнітних явищ.

Сильні магнітні поля можуть бути використані в різних галузях сучасної техніки.

1. Обґрунтована можливість створення магнітних головок для запису інформації на носіях з коерцитивною силою $H_C = 5 - 10 \text{ кЕ}$. Ефективність таких головок обумовлена тим, що при використанні висококоерцитивних носіїв збільшується густина записаної інформації, одночасно розв'язується проблема надійності її зберігання.

2. Розроблена методика одержання плівок, що характеризуються великим магнітоопором, може бути використана при розробці різного типу датчиків магнітного поля. Так, плівки пермалою зі схрещеними осями легкого намагнічування (ОЛН) можуть застосовуватися як елементи оперативної пам'яті обчислювальних машин. За матеріалами досліджень одержано патент Росії.

3. Обґрунтована можливість створення ЕПР мікроскопа з джерелом сильного поля з постійних магнітів для одержання даних про фізико-хімічні властивості з локальних ділянок зразка. В Інституті радіофізики і електроніки НАН України розроблено і виготовлено діючий макет такого мікроскопа.

4. Системи магнітів, які створюють сильні високоградієнтні поля розсіяння, можуть бути використані в сепараторах для розділення слабوماгнітних речовин, наприклад, гематитових руд. Подібні сепаратори можуть також використо-

уватися в біології, хімії і в інших галузях сучасної техніки. На замовлення Інституту Пастера (м. Сеул, Республіка Південна Корея), були виготовлені 2 системи магнітів для розділення частинок з різною магнітною сприйнятливістю (госпдоговірна робота №54354).

5. Системи, що складаються з магнітів з неоднорідною намагніченістю, які генерують поля розсіяння з великою областю сильного поля, можуть бути використані при розробці холодильних пристроїв, заснованих на гігантському магнітокалоричному ефекті.

За матеріалами досліджень одержано 2 авторські свідоцтва на винахід і 1 патент.

Особистий внесок здобувача

При формулюванні завдань, виконанні розрахунків полів розсіяння, виготовленні магніторезистивних датчиків, проведенні вимірювань магнітного поля, обговоренні результатів і написанні статей участь автора була визначальною. З праць, які були виконані спільно з іншими авторами, в дисертацію були включені тільки результати досліджень, одержані за безпосередньої участю автора. Так, з праць, опублікованих спільно із співробітниками ІРЕ НАНУ, в дисертацію включені лише ті матеріали, які стосуються систем магнітів, що використовуються в ЕПР спектрометрі для створення сильних полів розсіяння. В співавторстві зі співробітниками кафедр НТУ «ХП» були опубліковані праці [5,7,16]. З них в дисертації використані матеріали стосовно методик виготовлення плівок, вимірів полів розсіяння і процесів перемагнічування магніторезистивних плівок. Спільно із співавторами [13,16] була обґрунтована можливість створення магнітних голівок для запису інформації на магнітні носії з коерцитивною силою $H_c = 5-10 \text{ кЕ}$.

Апробація результатів дисертації

Основні результати роботи доповідалися на таких наукових конференціях і симпозіумах: на 12-й Всесоюзній школі-семінарі «Новые магнитные материалы микроэлектроники» – Новгород, 1990р.; на 19-й Всесоюзній конференції «Физика магнитных явлений» – Ташкент, 1991р.; на 13-й, 14-й, 16-й, 18-й, 19-й та 20-й Міжнародних школах-семінарах «Новые магнитные материалы микроэлектроники» – Астрахань, 1992 р.– Москва, 1994, 1998, 2002, 2004 та 2006 рр.; на Міжнародному симпозіумі «The 2nd International Symposium on Physics of Magnetic Materials» – Пекін, Китай, 1992 р.; на Міжнародному симпозіумі «2004 China Magnet Symposium» – Сіань, Китай, 2004 р.; на Міжнародному семінарі «The 4th International Workshop on Materials for Electrotechnics» – Бухарест, Румунія, 2004; на Міжнародному семінарі «The 18th International Workshop on High Performance Magnets and Their Applications» – Анси, Франція, 2004 р.; на Міжнародному семінарі «The 19th International Workshop on Rare Earth Permanent Magnets & Their Applications» – Пекін, Китай, 2006р.; на Міжнародних конференціях «Functional Materials-2005» та «Functional Materials-2007» – Крим, Партеніт, 2005 та 2007 рр.; на 8-й Міжнародній конференції «Фізичні явища в твердих тілах» – Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2007 р., а також на інших конференціях.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 45 праць. З них 21 стаття в спеціалізованих наукових журналах, 2 авторських свідоцтва на винахід, 1 патент і 21 теза доповідей на конференціях.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел. Текст дисертації представлений на 280 сторінках, включає 8 таблиць, 80 рисунків і список використаних джерел з 121 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтована актуальність вибраної теми і необхідність її проведення, сформульована мета роботи, вказані об'єкт, предмет дослідження і методи дослідження. Відзначений зв'язок роботи з науковими планами і програмами, а також охарактеризовані наукова новизна і практичне значення дисертаційної роботи.

У першому розділі - «Літературний огляд» проведений аналіз робіт, в яких указується на існування великих полів розсіяння в системах з постійних магнітів. Відзначено, що до початку виконання дисертаційної роботи єдиною системою магнітів, де були знайдені великі поля розсіяння, був циліндр Хальбаха. Практично всі раніше опубліковані роботи з сильних полів розсіяння пов'язані з розглядом різних модифікацій циліндра і сфери Хальбаха і переважно мають технічний характер. Підкреслюється, що в цих працях не обговорюються вимоги до магнітних характеристик матеріалу магнітів, які забезпечують виникнення великих полів розсіяння. В літературному огляді проаналізовані наукові праці, що стосуються розрахунку моделей смугової доменної структури, аналіз яких указує на можливість існування великих полів розсіяння над доменами. До початку виконання роботи, проте, систематичні дослідження сильних полів не проводилися. В заключній частині літературного огляду сформульовані невирішені задачі і обгрунтована необхідність проведення досліджень.

У другому розділі – «Методика і техніка експериментальних досліджень» описані методики, які були розроблені дисертантом для експериментального доказу існування сильних полів розсіяння, що генеруються системами магнітів з великою анізотропією. При рішенні поставлених задач використано комплексний підхід. Він включав розрахунок полів розсіяння і експериментальну перевірку отриманих залежностей. При визначенні полів розсіяння застосовано метод «магнітних зарядів» Кіттеля. Виконання чисельних розрахунків проведено з використанням пакету математичних програм MATHCAD і МАТЕМАТИКА.

Для перевірки відповідності розрахованих і вимірених значень поля розсіяння опрацьовані різні експериментальні методики – з використанням магніторезистивних датчиків, магніто-оптичних індикаторів з феррит-гранатових плівок, а також ЕПР спектрометра. У даному розділі також описані методи вимірювання основних магнітних параметрів як тонких плівок для магніторезистивних датчиків поля, так і речовини магнітів за допомогою вібраційного магнітометра, крутильного анізометра і осцилографічної установки для одержання

петель гістерезису. Наведена схема установки для вимірювання магнітоопору і описана методика проведення вимірювань на ній. Залежність магнітоопору від поля вивчали в полях, що змінюються в інтервалі $H = \pm 22 \text{ кЕ}$. Для спостереження доменної структури використовувалася установка, зібрана на базі мікроскопа МБІ-6 чи „БИОЛАМ”.

При вимірюваннях великих полів розсіяння напруженістю $H > 1000E$ розроблені та виготовлені датчики, які мають гігантський магніторезистивний ефект (ГМР - ефект). Для кожного датчика знаходилася конкретна залежність магнітоопору від поля $\Delta R/R(H)$. Ця залежність використовувалася при подальших вимірюваннях полів розсіяння.

При вимірюваннях великих магнітних полів розсіяння як додатковий метод застосовано ЕПР спектрометр. Резонансна комірка спектрометра дозволяла реєструвати сигнал, якщо в резонансному поглинанні брало участь 10^7 - 10^9 атомів.

Як середовище для вимірювання напруженості неоднорідних полів розсіяння використовували також монокристалічні ферит-гранатові плівки із лабіринтною (смуговою) доменною структурою. Товщина h феритової плівки складу $(Y, Bi, Pr, Lu)_3 (Fe, Ga)_{5.0}O_{12.0}$ становила 7 мкм . Поле насичення плівок при намагніченні у напрямі нормалі дорівнювало $H_S = 120E$, а поле одноосної анізотропії $H_K \approx 8 \text{ кЕ}$.

У третьому розділі - «Дослідження і розробка плівкових магніторезистивних датчиків» описана методика виготовлення магніторезистивних плівок, які призначені для виготовлення датчиків поля. Сильні поля розсіяння не були відкриті раніше також через відсутність датчиків, які б дозволяли реєструвати великі поля, локалізовані в малому об'ємі. Датчики на основі ГМР-ефекту виготовлено з гранульованих шарів $Co-Ag$ і острівцевих плівок $Co-Cu$. Плівки $Co-Ag$ одержували шляхом одночасного випаровування у вакуумі $P \approx 10^{-5} - 10^{-6} \text{ Па}$ срібла і кобальту на підкладки нагріті до температури $T_D \approx 100 \text{ С}$. Острівцеві плівки $Co-Cu$ виготовляли послідовною конденсацією у високому вакуумі шарів міді і кобальту на підкладки з ситалу, скла і слюди. При проведенні структурних досліджень використовували методи електронної мікроскопії і рентгенівської дифракції. Фазовий склад плівок визначали з аналізу рентгенівських дифрактограм. На підставі проведених досліджень була розроблена методика виготовлення гранульованих плівок $Ag-Co$, які мають великий магнітоопір: $\Delta R/R \approx 30\%$. На острівцевих плівках $Co-Cu$ магнітоопір не перевищував 12% . Показано, що великий магніторезистивний ефект в гранульованих і острівцевих плівках не пов'язаний з суперпарамагнетизмом дисперсних феромагнітних частинок Co .

При розробці датчиків на основі ефекту анізотропного магніторезистивного ефекту Томсона (АМР) використані конденсовані у вакуумі шари із сплавів $Ni-Fe$, $Ni-Fe-Co$ і Ni . Одноосна магнітна анізотропія в плівкових шарах $Ni-Fe$, $Ni-Fe-Co$ створювалася в процесі конденсації їх в магнітному полі. Дослідження проводили як на одношарових, так і на багатошарових плівках, в яких феромагнітні шари були розділені немагнітними прошарками. Вивчалися два типи багатошарових структур: 1) легкі осі у феромагнітних шарах паралельні; 2) легкі осі намагнічування у сусідніх шарах пермалою схрещені. Для вивчення розмірних

властивостей доменної структури феромагнітних плівок за допомогою фотолітографії були виготовлені зразки у формі прямокутних смужок шириною 5, 10, 20, 50 і 100 мкм. Дослідження доменної структури показали, що в смужках шириною $b \leq 20$ мкм рівноважному стану відповідає ромбоподібна доменна структура. Характерним для неї є те, що ширина доменів $d \approx b$, а не $d \approx \sqrt{b}$, як завжди. Також встановлено, що гістерезисні явища в них проявляються в меншій мірі, якщо плівкові зразки будуть багат шаровими, а в межах шару реалізується однодоменний стан. Показано, що за допомогою датчиків з чутливими елементами із шарів з схрещеними ОЛН можна визначати як величину, так і знак магнітного поля без застосування полів зміщення. На підставі проведених досліджень були виготовлені магніторезистивні датчики з високою чутливістю до магнітного поля.

У четвертому розділі - «Сильні магнітні поля розсіяння і експериментальні докази їх існування» на основі розрахунків обґрунтовується можливість виникнення сильних полів і приведені експериментальні докази їх існування. Оскільки рішення магнітостатичних задач принципово важливо для розкриття змісту роботи, то розглянуті деякі з них.

1. Задача Кіттеля, пов'язана з розрахунком параметрів моделі відкритої доменної структури (рис.1а). Через велику анізотропію ширина доменної стінки може бути малою і тому не розглядалася. Поля розсіяння, що виникають над доменами, Кіттелем не розраховувалися. В цій роботі для визначення залежності напруженості поля розсіяння над доменами був використаний вираз для потенціалу магнітного поля смугової доменної структури Кіттеля. В результаті обчислення градієнта потенціалу була одержана залежність для тангенціальної компоненти поля розсіяння у такому вигляді:

$$H_x(x, z) = 8M_s \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cos\left[\frac{(2n+1)\pi x}{a}\right] \exp\left[-\frac{(2n+1)\pi z}{a}\right]. \quad (1)$$

З (1) витікає, що компонента поля розсіяння H_x в точках з координатами $z = 0$, $x = na$, де $(n = 0 \pm 1 \pm 2 \dots)$, зростає до нескінченності, а в околиці вказаних точок для інтервалу завширшки $\Delta x \approx a/10$, набуває значень вище індукції насичення матеріалу одноосного феромагнетика, тобто $H_x > 4\pi M_s$. На рис.1б показаний графік, що демонструє поведінку компоненти поля розсіяння $H_x(x, z)$ в околі сингулярної точки O .

Через безперервність тангенціальної компоненти поля розсіяння $H_x(x, z)$ такі ж за величиною розмагнічуючі поля проникають і вглиб доменів. У одноосних матеріалах з відносно невеликими значеннями $H_K \approx 4\pi M_s$ подібне горизонтальне поле може відхилити вектор намагніченості від осі легкого намагнічування (ОЛН) в локальних ділянках і призвести до «релаксації» сильних полів розсіяння.

Отже, для виникнення сильних полів розсіяння над смуговими доменами необхідно, щоб поле одноосної анізотропії матеріалу магнітів було $H_K \gg 4\pi M_S$, а коерцитивна сила була $H_C \approx 2\pi M_S$.

Система з 2-х магнітів (так звана система **A**), намагнічених антипаралельно, подібна відкритій структурі Кіттеля (рис.2а). Магнітопровід в системі призначений для зменшення знижуючого впливу нижніх полюсів магнітів на величину полів розсіяння над верхньою площиною. При розрахунку цієї системи припускалося, що за наявності гігантської анізотропії розподіл намагніченості в об'ємі магніта є однорідним. У цьому випадку виникають тільки поверхневі заряди з густиною $\sigma_S = \text{div} \mathbf{M}_S = \pm M_S$. Вираз для компоненти $H_X(x,z)$ при $b \gg a$ має вигляд

$$H_X(x,z) = M_S [\ln(a^2 + z^2 + 2ax + x^2) - 2\ln(x^2 + z^2) + \ln(a^2 + z^2 - 2ax + x^2)]. \quad (2)$$

На малих відстанях r від осі OY $r \ll a$ напруженість поля описується формулою $H_X(r) \approx 4M_S \ln(a/r)$, де $r = (x^2 + z^2)^{0.5}$. Графік $H_X(x,z)$ подібний до графіка, зображеного на рис.1б, але значення напруженості поля при однакових r для системи **A** дещо вище, ніж для структури Кіттеля. Залежність $H_X(x,y)$ показана на рис.2б.

Сильні поля зберігаються і за наявності зазору 2δ між плоскими поверхнями магніту (рис.3.а, так звана система **B**). Це видно з графіка $H_Z(x,z)$ на рис.3б. Сингулярні точки поля знаходяться на краях зазору.

З аналізу рішення задач магнітостатики випливає, що виникнення сильних полів розсіяння можливе тільки у феромагнетиках з гігантською магнітною анізотропією та коерцитивною силою $H_C > 2\pi M_S$ (для системи **A**). Такі умови виконуються тільки для магнітів на основі РЗМ з великою анізотропією, які були відкриті наприкінці 60-х років минулого століття.

У цьому розділі також наведені експериментальні докази існування сильних полів розсіяння. Для проведення експериментів була обрана система **A** (рис.2а). При її виготовленні були використані магніти з $SmCo_5$, оскільки в них більш високе поле одноосної анізотропії ($H_K \approx 400$ кЕ). Розміри кожного з 2-х магнітів складала $40 \times 40 \times 20$ мм. Схема вимірювань за допомогою датчика з гігантським магнітоопором наведена на рис.4а. На рис.4б точками позначені виміряні значення поля розсіяння. Як видно, спостерігається добра відповідність експериментальних значень поля та розрахованої теоретично логарифмічної залежності $H_X(x) \approx 4M_S \ln(a/x)$.

Додатковим доказом наявності сильних полів розсіяння над магнітами з гігантською магнітною анізотропією є дані досліджень на ЕПР спектрометрі. Джерелом статичного поля в цьому приладі була система з 2-х постійних магнітів з $SmCo_5$ (рис.2а). Контрольний зразок з аморфного сплаву $Fe_{40}Ni_{40}B_{20}$, виготовлений у формі вузької смужки з тонкої стрічки, розташований на кварцовій пластинці. Зразок знаходиться поблизу як максимуму статичного магнітного поля, так і в

максимумі магнітної компоненти резонансного електромагнітного поля. При цьому зареєстровано резонансне поглинання на частоті $\nu_{res} = 44 \text{ ГГц}$. Показано, що для такої частоти статичне магнітне поле поблизу щілини досягало $H_{res} \approx 19000 \text{ Е}$. Отже, ще одним методом експериментально підтверджена можливість генерації магнітного поля з напруженістю близько 20 кЕ . Цей експеримент також переконливо підтверджує існування сильних магнітних полів розсіяння.

Магнітооптичні дослідження сильних полів розсіяння за допомогою ферит-гранатових плівок дали можливість одержати відомості не тільки про напруженість поля, але також і про його конфігурацію. Індикаторним середовищем служили ферит-гранатові плівки з великим полем одноосної магнітної анізотропії $H_K \approx 8 \text{ кЕ}$. Встановлено, що конфігурація областей із смуговими доменами, що виникає в індикаторі при різних відстанях його від магнітів, відповідає розрахованим лініям рівної напруженості для цієї системи.

Таким чином, існування сильних полів розсіяння, обґрунтовано розрахунками і доведено експериментально. При цьому в системі магнітів із SmCo_5 виміряні значення поля добре співпадають із розрахованою логарифмічною залежністю.

У розділі 5 – «Максимальні поля розсіяння в системах магнітів з великою анізотропією» проведена оптимізація різних систем магнітів, які генерують сильні поля розсіяння. Задача оптимізації полягала в знаходженні таких геометричних конфігурацій магнітів і розподілу намагніченості в системах, при реалізації яких досягається найсильніше поле розсіяння поблизу його особливих точок. Така система магнітів була названа *оптимальною*. Для кожної такої системи обчислені граничні значення полів розсіяння.

Оскільки сильні поля розсіяння, створені різними системами, мають ряд особливостей, то в роботі була проведена їх класифікація. Залежно від форми області локалізації сильних полів вони були розділені на три типи – *лінійні, точкові і однорідні*. Характерним для *лінійних полів* є те, що максимальні значення поля (або сингулярні точки) знаходяться на деякій лінії (рис.2б). Областю локалізації сильного лінійного поля є напівциліндр радіусом Δr , віссю якого служить ця напрямна лінія. Прикладом лінійного поля може також служити поле розсіяння, яке виникає по периметру граней паралелепіпеда або поблизу від прямої лінії прямого циліндра, однорідно намагніченого уздовж своєї осі. Сильні магнітні поля розсіяння, які виникають, наприклад, в околиці вершини однорідно намагніченого конуса, піраміди або на лінії перетину заряджених площин магнітів, були названі *точковими*. Характерною для сильних *однорідних полів* розсіяння є велика область локалізації сильного поля і відсутність сингулярних точок на залежності поля розсіяння від координат.

У системах магнітів з однорідною намагніченістю магнітні заряди локалізовані на їх поверхні. На основі рішення варіаційної задачі показано, що в таких магнітах більш високі поля розсіяння виникають, якщо заряджена поверхня є плоскою, а її край є прямим. Тому при дослідженнях та аналізі різних магнітних систем переважно проводили розрахунок магнітів у формі паралелепіпедів і прямих призм.

Відкритою названо систему магнітів, у якій сильні поля виникають над плоскою поверхнею. Наприклад, для системи **A** (рис.2а) – це площина XOY . Були визначені характерні параметри магнітів - кути α при вершині секторів і оптимальний напрям намагніченості (кути φ). З урахуванням оптимальних параметрів була одержана залежність для компонент сильного поля. У відкритій системі магнітів гранична залежність має вигляд: $H_X(x) \approx 2M_S \ln(a/x)$ – для одного магніта; $H_X(x) \approx 4M_S \ln(a/x)$ – для 2-х магнітів; $H_X(x) \approx 3\sqrt{3} M_S \ln(a/x)$ – для 3-х магнітів; $H_X(x) \approx 4\sqrt{2}M_S \ln(a/x)$ – для 4-х магнітів. Результати розрахунків узагальнені в таблиці 1.

Таблиця 1. Гранична залежність поля $H_X(r)$ і значення оптимальних кутів α , φ для цієї залежності у відкритих системах з різним числом n магнітів. R – характерний розмір системи магнітів.

n	1	2	3	4
H_X	$2M_S \ln(R/r)$	$4 M_S \ln(R/r)$	$3\sqrt{3}M_S \ln(R/r)$	$4\sqrt{2}M_S \ln(R/r)$
α	$\alpha = 90^0$	$\alpha_1 = \alpha_2 = 90^0$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 60^0$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 45^0$
φ_1	φ - довільний	$\varphi_1 + \varphi_2 = \pi$	$\varphi_1 = 0^0$	$\varphi_1 = 0^0$
φ_2			$\varphi_2 = 60^0$	$\varphi_2 = 90^0$

У *закритих* системах магнітів сильне поле локалізовано в замкнутому об'ємі між магнітами. Через симетрію воно в 2 рази вище, ніж у відкритих системах. Показано, що із збільшенням числа магнітів поле розсіяння монотонно збільшується згідно залежності $H \approx A(n)M_S \ln(a/r)$, де коефіцієнт $A(n)$ – зростаюча функція числа магнітів n . Був одержаний вираз для поля розсіяння в закритій системі з довільною кількістю магнітів

$$H_X(n) = 8M_S \ln(R/r) n \sin(\pi/2n), \quad (3)$$

де R – радіус замкнутої системи у формі циліндра великої висоти, що складається з $4n$ секторів. При $n \rightarrow \infty$ знайдено простий аналітичний вираз для граничного поля, яке може бути досягнуто в лінійній системі. Воно не може бути вищим, ніж це витікає з аналізу формули

$$H_X = 4\pi M_S \ln(R/r). \quad (4)$$

Слід зазначити, що закрита система з магнітів у формі призм із внутрішньою порожниною, по суті, є так званим циліндром Хальбаха. В роботі проведений розрахунок компоненти поля розсіяння $H_Z(x,z)$ для циліндра, зображеного на рис.5а. Показано, що цей циліндр є комбінацією чотирьох систем з 2-х магнітів із зазором $\delta = 0,01R$, тобто (система **B**, рис.3а), повернутих відносно осі циліндра на кути $\pm 22,5^\circ$ і $\pm 67,5^\circ$. Як видно з рис.5б і проведеного аналізу, поле в порожнині циліндра Хальбаха є неоднорідним як за величиною, так і за напрямком. Компоненти градієнта поля можуть досягати значень $|\partial H_Z / \partial z| \approx 10^5 - 10^6$ Е/см.

Дотепер вважалось, що поле в циліндрі Хальбаха є однорідним. Проведена оцінка максимального поля, яке може бути досягнуто в циліндрі Хальбаха, що складається з магнітів із намагніченістю $M_S = 1200 \text{ Гс}$. Так, для порожнини з внутрішнім радіусом $r \approx 0,001R$ поле складає $H_Z \approx 100\,000 \text{ Е}$. Для досягнення таких полів розсіяння магніти системи повинні мати не тільки високі значення поля H_K , але і коерцитивну силу $H_C \sim H_Z$. Це зв'язано з тим, що в 2-х секторах системи (рис.5а), компонента розмагнічуючого поля H_Z направлена назустріч вектору M_S .

На рис.6а показано джерело **точкового поля** у формі циліндра, що складається з 4-х секторів, які намагнічені по бісектрисі сектору. Сильне поле H_Z в точці O обумовлено зарядами на лінії перетину площин XOZ і YOZ . Поле H_Z в цій системі є сумою двох лінійних полів і характеризується в малій околиці точки O залежністю $H_Z \approx 4\sqrt{2} M_S \ln(H/r)$, де $r \approx (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ – відстань від точки O до точки визначення поля. Графік залежності $H_Z(x,y)$ при $z = 0$ наведений на рис.6б, а на рис.6в зображені лінії рівної напруженості для цієї залежності.

Для системи, що складається з n секторів, залежність компоненти цього поля буде описуватися виразом $H_Z \approx 2M_S n \sin(\pi/n) \ln(H/r)$. У тому випадку, коли число секторів $n \rightarrow \infty$, граничне значення точкового поля поблизу точки O можна обчислити за формулою

$$H_Z \approx 2\pi M_S \ln(H/r). \quad (5)$$

Якщо над циліндром (рис.6а) розташувати такий же циліндр, то поле розсіяння в зазорі збільшиться в 2 рази. При цьому вектор намагніченості в кожному секторі другого циліндра має бути направлений від центру. В цьому випадку максимальне поле буде описуватися залежністю $H_Z \approx 4\pi M_S \ln(H/r)$.

Більш високі точкові поля досягаються в системі з конусних магнітів. На рис.7а показано найпростіше джерело точкового поля, що складається з 2-х прямих конусів, однорідно намагнічених уздовж їх загальної осі симетрії OX . Сильне поле досягатиметься поблизу вершини конуса, тобто в околі точки O . Поле H_X набуває найбільше значення, коли кут $\alpha \approx 55^\circ$. У цьому випадку залежність матиме вигляд $H_X \approx 4,8 M_S \ln(R/r)$.

Показано, що це поле можна посилити шляхом оптимізації складніших симетричних систем з конічних магнітів. Одна з таких систем, що складається з 2-х пар магнітів, зображена на рис.7б. Два магніти *типу 1* мають форму конуса, а магніти *типу 2* мають форму півсфери з вирізом у вигляді конуса. Дві пари цих магнітів утворюють сферу. Система у формі сфери була вибрана для того, щоб спростити вирази для поля H_X . У цьому випадку до залежності поля H_X увійде тільки один характерний розмір магніта – радіус сфери R .

Для побудови систем з великими полями розсіяння кожна пара конусів розділяється на сектори радіальними площинами, що проходять через вісь конусів. Таке ускладнення забезпечує більш широкий вибір орієнтацій векторів намагніченості в системі. Передбачається, що кожний з секторів намагнічений однорідно і вектор M_S лежить в площині, яка проходить через бісектрису кута

сектора. При цьому вектор M_S направлений паралельно ОЛН, яка утворює кути φ_1 (або φ_2) з віссю конуса. Параметрами, що розраховуються, були кути α і кути φ . Оптимальні значення цих параметрів визначали за допомогою використання чисельних методів. У системі з 2-х пар конічних магнітів, розділених на 8 секторів, найбільше поле визначалося залежністю $H_X \approx 14M_S \ln(r/R)$. У графічній формі така залежність зображена на рис.8.

Подальше ускладнення системи до 5 і 7 пар конічних магнітів, як показали чисельні розрахунки, збільшувало значення поля до $H_X \approx 18M_S \ln(r/R)$. Зроблено припущення про те, що граничне поле лімітується залежністю $H_X \approx 6\pi M_S \ln(r/R)$. Розрахунки показують, що поле розсіяння поблизу точки O може приймати дуже високі значення $H_X(y,z) \approx 1,4 \cdot 10^5 E$ при досяжних на практиці значеннях відстані $r = 0.001R$ і $M_S = 1000 Gc$. Таким чином, конічна система в порівнянні з системами магнітів іншої форми створює більш високі поля.

У всіх розглянутих вище системах магнітів сильні поля розсіяння були пов'язані з ефектами, що виникають поблизу краю заряджених площин. Ці системи магнітів відрізняються великим ступенем неоднорідності сильного поля. Поряд з цим були створені системи магнітів, що генерують однорідні поля розсіяння. На рис.9а,б зображена система магнітів, в якій в зазорі між магнітами існує поле з напруженістю $H > 4\pi M_S$ практично по всьому зазору шириною 2δ . Це поле можна вважати близьким до однорідного.

На відміну від лінійних і точкових полів, для однорідного сильного поля характерна відсутність на залежності $H_Z(x)$ сингулярних точок. Ступінь однорідності поля розсіяння відображає залежність поля H_Z (рис.9б, верхня крива), яка розрахована для системи, зображеної на рис.9а.

Відмітною особливістю сильного поля є те, що воно обумовлено компонентою поля розсіяння H_Z , нормального до зарядженої поверхні, а не тангенціальною, як це було в системах, описаних вище. Якщо прийняти кут $\varphi = 0$, то залежність компоненти поля розсіяння буде мати такий вигляд

$$H_Z \approx 4\pi M_S + 4\pi M_S \cos(\alpha)(1 - \cos(\alpha)). \quad (6)$$

Із збільшенням числа магнітів в системі на рис.9а поле в зазорі зростатиме. Для системи, що складається з великого числа магнітів, граничне поле розсіяння не буде вищим, ніж $H_Z \approx 6\pi M_S$.

У розділі 6 - «Сильні поля розсіяння в системах магнітів з неоднорідним розподілом намагніченості» розглянуті магніти у формі циліндра, у яких вектор намагніченості направлений по радіусу. Передбачалося, що радіальний розподіл намагніченості досягається завдяки радіальній кристалічній текстурі з віссю легкого намагнічування, направленою в кожній точці по радіусу циліндра (рис.10а). Поле анізотропії H_K речовини магнітів передбачалося настільки великим, що виникаючі поля розсіяння практично не змінюють радіальний розподіл намагніченості у всіх точках магніта. З метою одержання аналітичних виразів для компонент поля розсіяння, зручних для аналізу, циліндр вважався нескінченним.

При радіальному напрямі намагніченості в циліндровому магніті з циліндричною порожниною радіусу r_0 , окрім поверхневих магнітних зарядів з густиною

$\sigma_s = \pm M_s$, виникають і об'ємні заряди з густиною $\sigma_v = \pm M_s/r$. Зазначимо, що хоч густина об'ємних зарядів і зростає при наближенні до осі циліндру, заряд в об'ємі $dv = 2\pi r dr$ залишається кінцевим в цій точці.

При обчисленні максимальних полів не враховувався вплив зарядів на зовнішній поверхні магніту. Цього можна досягнути за допомогою спеціальних магнітопроводів. Для точок, які знаходяться на осі OZ , сумарне значення компоненти поля $H_z = H_{zv} + H_{zs}$ описується формулою

$$H_z = 2\pi M_s \{ \ln[(R + (z^2 + R^2)^{1/2})/(r_0 + (r_0^2 + z^2)^{1/2})] + [r_0/(r_0^2 + z^2)^{1/2}] \}. \quad (7)$$

Вираз під знаком логарифма характеризує внесок об'ємних зарядів, а другий доданок - вплив поверхневих зарядів на внутрішній порожнині. Граничне значення компоненти поля H_z при $r_0 \rightarrow 0$ дорівнює $H_z = 2\pi M_s \ln[2R/z]$. Таким чином, при обчисленні поля H_z в залежності (7) можна обмежитися 1-м членом. Якщо над магнітом коаксіально розташувати ще один такий же магніт, але з протилежним напрямом намагніченості, то максимальне поле збільшиться в 2 рази.

На рис.10б зіставляється розрахована залежність поля $H_z(r)$ для точок на торцевій поверхні магніта ($z = 0$) при різних значеннях r_0 . Характерною особливістю поля розсіяння магніта з радіальною намагніченістю, як видно з рис.10б, є наявність великої області локалізації сильного поля $\Delta r \approx R$. Представлені дані чисельних розрахунків указують на наявність сильних полів з сингулярними точками на напрямній циліндра. Якщо виготовити систему з 2-х таких магнітів, розташованих співісно, то у вузькому зазорі між ними радіус локалізації сильного поля буде дорівнюватиме діаметру циліндра $\Delta r \approx 2R$.

Для порівняння різних неоднорідних полів був введений інтегральний параметр - середнє поле $\langle H \rangle$. Величина середнього поля в зазорі об'ємом V обчислювалася за формулою $\langle H \rangle = (\int H_z dV)/V$. Як видно з таблиці 2, поле $\langle H_z \rangle$ в зазорі між магнітами набуває великих значень.

Таблиця 2. Значення середнього поля $\langle H_z \rangle$ при різній ширині зазора δ між циліндричними магнітами з радіальною намагніченістю

R^* – радіус області усереднення поля H_z	R	R	R	R	0,5R	0,5R	0,5R
δ	0	0,01 R	0,1 R	0,2 R	0	0,01 R	0,1 R
Поле $\langle H_z \rangle$	22,5	22,4 M_s	21 M_s	20 M_s	32 M_s	31 M_s	30 M_s

Компонента поля розсіяння $\langle H_z \rangle$ в зазорі між двома циліндричними магнітами може бути посилена, якщо вектор намагніченості M_s в кожному циліндричному магніті має в кожній точці, крім радіальної компоненти $M_r = M_s \cos \alpha$, також і осьову компоненту $M_z = M_s \sin \alpha$, де α – кут між вектором M_s і радіус-вектором r . У цьому випадку середнє поле буде найбільшим при $\alpha = \pi/6$, коли $\langle H_z \rangle \approx 26 M_s \approx 8\pi M_s$. Отже, у вузькому зазорі між циліндричними магнітами з радіальною

намагніченістю середнє поле перевищує в два рази індукцію насичення речовини магніта.

Система, яка зображена на рис.11, складається з 8 магнітів у формі призм, однорідно намагнічених по бісектрисі двогранного кута. Вона названа *квазінеоднорідною*. Подібність її та системи, показаної на рис.10а, не тільки зовнішнє, але проявляється також і в однаковій залежності їх густини об'ємних зарядів $\sigma_V \sim M_S/r$ від відстані до центру циліндра r і близьких значеннях параметрів сильного поля.

Хоча в системі, показаної на рис.11, об'ємних зарядів немає, але на сусідніх гранях між секторами виникають поверхневі заряди з густиною $\sigma_S = 2M_S \sin(\pi/8)$ і утворюють деяке поле зарядів. Так, для системи з 4-х магнітів усереднене за об'ємом магніту значення $\langle \sigma \rangle \approx 0,94M_S/r$, а для 8-ми магнітів $\langle \sigma \rangle \approx 0,97M_S/r$ мало відрізняються від σ_V магніту з радіальною намагніченістю. Якщо число магнітів в системі велике, то $\sigma_V = \langle \sigma \rangle \approx M_S/r$.

Подібність магніту з радіальною намагніченістю і системи магнітів на рис.11 проявляється також в картині полів розсіяння в цих системах. Обидві системи створюють точкове поле і величина максимального поля компоненти H_Z системи з великим числом магнітів у вигляді призм дорівнює $H_Z(r) \approx 2\pi M_S \ln(H/r)$ (дивись формулу (5)). У вузькому зазорі системи з 2-х таких магнітів, розташованих коаксіально, значення граничного поля характеризується залежністю $H_Z(r) \approx 4\pi M_S \ln(H/r)$.

Крім цього, квазінеоднорідні системи, як і магніти з радіальною намагніченістю, мають велику область локалізації сильного поля. Це видно з рис.6в, де показані лінії рівної напруженості квазінеоднорідної (точкової) системи з 4-х магнітів. Якщо здвоїти квазінеоднорідні магніти, то замість ізолінії з $H = 5500 E$ (рис.6в) буде розташована ізолінія з $H = 11000 E$. Середнє значення компоненти поля $\langle H_Z \rangle$ у цій системі з пари таких магнітів становитиме $\langle H_Z \rangle \approx 20 M_S$. Якщо кожний магніт пари складається не з 4-х, а з 8 магнітів, то середнє поле в зазорі збільшується до $\langle H_Z \rangle \approx 22 M_S$.

Отже, при рішенні певних задач система у формі циліндра з радіальною намагніченістю може бути замінена квазінеоднорідною системою.

Квазінеоднорідна система, в порівнянні з розглянутим вище циліндром з радіальною намагніченістю, має відмінності в картині полів розсіяння усередині її порожнини. Так, в циліндровій порожнині круглого перетину системи з радіальною намагніченістю компонента поля $H_r(r) \approx 0$, тоді як в порожнині квазінеоднорідної системи ця компонента поля розсіяння набуває високих значень $H_S(x,y) > 4\pi M_S$ поблизу її стінок.

У розділі 7 - «Особливості градієнта сильних полів розсіяння» показано, що сильне поле розсіяння в лінійних і точкових системах є не тільки сильним за величиною, але й дуже неоднорідним, тобто має великий градієнт ∇H . Проведене обчислення компонент тензора градієнта поля розсіяння для різних систем магнітів, які генерують сильні поля. Оцінені граничні значення градієнта поля для різних систем магнітів. Так, для системи **A** величини градієнта поля на малій відстані r від сингулярних точок характеризується залежністю $|\nabla H| \approx 4M_S(1/r)$. Для градієнта поля сингулярними є ті самі точки, що і для сильного поля. Вони розташовані на краях системи **A** при $x = \pm a, z = 0$ і на осі OY . Оцінки показують,

що градієнт поля в системах магнітів може досягати значень $|\nabla H| = 10^6 - 10^8 \text{ E/cm}$. Також встановлено, що в системах з постійних магнітів з гігантською магнітною анізотропією досягаються високоградієнтні поля, які співмірні з градієнтом поля в надпровідних магнітах з конічними наконечниками, виготовленими з матеріалів з високою індукцією.

Градієнт напруженості магнітного поля, поряд з його напруженістю, є важливою фізичною характеристикою магнітного поля, оскільки він впливає на інші фізичні параметри. Так, у високоградієнтному полі в речовині магніта поблизу сингулярних точок виникають механічні сили з великою густиною $|f(x,z)| \approx 4M_s^2/r$. Механічні напруження в системі А, що пов'язані з градієнтом поля, не можуть перевищувати значень, які витікають із залежності

$$\sigma \sim 4M_s^2 \ln(a/x), \quad (8)$$

з якої випливає, що $\sigma < 1-2 \text{ кГ/мм}^2$.

У розділі 8 - «Перспективи практичного використання сильних полів» обговорюються питання застосування сильних полів в різних областях науки і техніки. Розглядаються фізичні основи застосування сильних полів в техніці магнітного запису, при створенні ЕПР мікроскопа, в біології і в сепараторах для розділення слабкомагнітних речовин.

Головними проблемами в техніці магнітного запису є збільшення густини записаної на носії інформації і підвищення надійності її зберігання. Один з шляхів рішення цієї проблеми полягає в можливості використання висококоерцитивних носіїв ($H_c > 5 \text{ кЕ}$). У даний час застосування цих носіїв неможливе через відсутність головок, здатних намагнітити їх висококоерцитивний шар. При цьому висококоерцитивні носії потрібні як для горизонтального, так і для вертикального запису. Їх застосування дає можливість на порядок зменшити розмір магнітного відбитка. Крім того, висококоерцитивні носії будуть нечутливими або слабо чутливими до дії випадкових магнітних полів, тобто підвищується надійність збереження записаної інформації. Використовування таких носіїв особливо важливо при створенні різних архівних документів.

На рис. 13а показана схема головки для горизонтального запису з плівковими постійними магнітами. Одержані формули, за допомогою яких можна оцінити розміри відбитка на носії залежно від коерцитивної сили носія і його геометричних розмірів. На рис.13б показано як змінюється поле над носієм при віддаленні від нього головки.

Описана конструкція магнітопровода для створення додаткового поля при записі інформації на носії. Наведена схема головки для вертикального запису і розглянута система магнітів для точкової головки

У дисертаційній роботі вивчена також можливість використання різних джерел сильного поля (лінійних і точкових) для ЕПР-мікроскопа. Оскільки сильні поля розсіяння локалізовані в малому об'ємі, то їх можна визначити, якщо резонансна комірка ЕПР спектрометра має необхідну чутливість. Спектрометр, який використовувався в роботі, дав можливість зареєструвати резонансне поглинання 10^7-10^8 атомів. По лініях і поверхнях рівної напруженості для цих

джерел був обчислений об'єм області, яка бере участь в резонансному поглинанні для заданої частоти.

Системи магнітів, які генерують сильні, високоградієнтні поля розсіяння можуть бути також використані в сепараторах для збагачення слабкомагнітних руд, а також в біології. Крім того, системи магнітів, що створюють поля розсіяння з великою областю локалізації сильного поля, можуть знайти застосування при розробці холодильних пристроїв на основі гігантського магнітокалоричного ефекту.

Висновки

В дисертаційній роботі розв'язана важлива наукова проблема фізики магнітних явищ – визначені фізичні закономірності, які забезпечують виникнення і стабільність сильних полів розсіяння з індукцією $B > B_S = 4\pi M_S$ в системах магнітів з гігантською анізотропією.

В ході проведення комплексних досліджень різних систем з постійних магнітів з гігантською магнітною анізотропією були одержані такі наукові і практичні результати:

1. На прикладах рішення магнітостатичних задач вперше обґрунтовано існування сильних магнітних полів розсіяння в різних системах магнітів з гігантською анізотропією і визначені умови їх виникнення. Показано, що для цього необхідно, щоб поле одноосної анізотропії речовини магніта було істотно більшим його індукції насичення: $H_K \gg 4\pi M_S$. Встановлено, що залежність тангенціальної компоненти поля розсіяння на малій відстані r від краю магніта є логарифмічною: $H \approx AM_S \ln(a/r)$, де A – деяка постійна для даної системи магнітів.

2. На підставі аналізу результатів проведених комплексних досліджень структури і магнітних властивостей гранульованих плівок $Ag-Co$, $Co-Cu$ і острівцевих плівок $Co-Cu$ встановлено, що гранульовані плівки $Ag-Co$ проявляють гігантський магніторезистивний ефект (ГМР) з $\Delta R/R$ до 30%. Встановлено, що ГМР-ефект плівок $Ag-Co$, $Co-Cu$ і острівцевих плівок $Co-Cu$ не пов'язаний з суперпарамагнетизмом гранул Co в шарах. На основі цих плівок виготовлені різні типи магніторезистивних датчиків для вимірювання сильних полів в інтервалі значень 1-25 кЕ.

3. На підставі вивчення розмірних властивостей доменної структури плівок із сплавів $Ni-Fe$ і $Ni-Fe-Co$ у вигляді вузьких смужок завтовшки $h \sim 0.1$ мкм показано, що низькі значення коерцитивної сили $H_C \approx 0.01E$ досягаються в шарах, які знаходяться в однодоменому стані. При цьому шари мають великі значення коефіцієнта магнітоопору: $\Delta R/R = 3-5$ %. На основі тонких гранульованих плівок $Ag-Co$ і плівок пермалою були виготовлені за допомогою конденсації у вакуумі датчики, призначені для вимірювання сильних, неоднорідних магнітних полів в широкому діапазоні значень.

4. Прямими вимірюваннями за допомогою магніторезистивних датчиків і ЕПР спектрометра експериментально доведена наявність сильних магнітних полів розсіяння. Найбільше поле, яке було зареєстроване ГМР датчиком і ЕПР спектрометром на системі з 2-х магнітів дорівнювало 17 і 19 кЕ відповідно, що в

2 рази перевищує індукцію насичення матеріалу магніта з $SmCo_5$. Дослідження на магнітооптичній установці показали, що при використанні ферит-гранатових плівок в якості індикаторів з великим полем одноосної анізотропії ($H_K = 8 \text{ кЕ}$) можна визначити як конфігурацію сильних полів розсіяння, так і обчислити їх напруженість

5. Вперше показано, що виміряні значення полів розсіяння добре корелюють з розрахованою логарифмічною залежністю: $H \approx 4M_S \ln(r/a)$.

6. Вперше проведена класифікація сильних магнітних полів, які можуть бути створені різними системами з постійних магнітів. У залежності від форми області локалізації поля визначено три види сильних полів: *лінійні, точкові і однорідні сильні поля*.

7. На підставі рішення варіаційної задачі було встановлено, що в магнітах з однорідною намагніченістю найбільше лінійне поле розсіяння досягається поблизу прямого краю плоскої зарядженої поверхні і, як наслідок, в системах магнітів, що складаються з паралелепіпедів і призм. Оптимізація таких систем постійних магнітів показує, що граничне значення *лінійного* поля не може бути вищим, ніж це витікає із залежності $H = 4\pi M_S \ln(R/r)$.

8. Вивчено 2 типи джерел точкового поля – системи з однорідно намагнічених магнітів, у яких точкове поле виникає поблизу лінії перетину заряджених площин, і конічні магніти. Показано, що в точковому джерелі, що являє собою циліндричний магніт з n секторів, граничне значення точкового поля поблизу особливої точки визначається із залежності $H = 2\pi M_S \ln(R/r)$. У системі з 2-х таких магнітів з протилежним напрямом намагніченості в секторах граничне поле не буде вищим, ніж це витікає із залежності $H = 4\pi M_S \ln(R/r)$.

9. Оптимізація конічних джерел точкового поля показує, що найбільше поле розсіяння досягається у вершини конуса, поверхня якого утворена обертанням прямої лінії навколо його осі. Був проведений чисельний розрахунок систем, що складаються з різного числа пар однорідно намагнічених конічних магнітів, розділених на сектори радіальними площинами. Показано, що в таких комбінованих системах граничне значення точкового поля можна охарактеризувати залежністю $H \approx 6\pi M_S \ln(R/r)$.

10. Вперше показано, що сильні поля розсіяння виникають також в магнітах з неоднорідною за напрямом намагніченістю. Так, в циліндричному магніті з радіальним розподілом векторів намагніченості залежність поля розсіяння має вигляд $H_z(z) \approx 2\pi M_S \ln(2z/R)$. У системі з 2-х таких магнітів граничне поле лімітується залежністю $H_z(z) \approx 4\pi M_S \ln 2(z/R)$. Встановлено, що відмітною особливістю сильних полів у вивчених системах є велика область локалізації Δr цього поля сумірна з діаметром циліндричного магніта $\Delta r \sim 2R$. Так, в зазорі між двома магнітами середнє за об'ємом зазора значення поля розсіяння в 2 рази перевищує індукцію насичення матеріалу магніту: $\langle H_z \rangle \approx 2B_S$.

11. Встановлено, що в системах магнітів з гігантською магнітною анізотропією модуль градієнта поля може досягати значень $|\nabla H| \approx 10^6 - 10^8 \text{ Е/см}$. Це значення градієнта порівнянно з високоградієнтним полем розсіяння, яке досягається в надпровідних магнітах з конічними наконечниками із матеріалів з високою індукцією.

12. Обґрунтована можливість створення магнітних головок для запису інформації на носіях з коерцитивною силою $H_C = 5 - 10$ кЕ. Показано, що це дасть можливість збільшити густину записаної інформації на 1 – 2 порядки. Крім того, використання подібних носіїв одночасно розв'яже проблему надійності зберігання записаної інформації. В роботі була також обґрунтована можливість створення ЕПР мікроскопа для одержання відомостей про фізичні характеристики різних речовин в локальних ділянках.

Список опублікованих робіт за темою дисертації:

1. Dimensional effects domain structure in narrow stripes uniaxial magnetic films / Lukashenko L.I., Potapov S.V., Ravlik A.G., Roschenko S.T., **Samofalov V.N.**, Shipkova I.G. // J. Magnetism and Magnetic Materials (JMMM). - 1992.- Vol. 116.- P. 70-72.
2. Измерение параметров тонких ферромагнитных пленок при помощи крутильного анизометра / Равлик А.Г., **Самофалов В.Н.**, Потапов С.В., Костенко А.В. // Приборы и техника эксперимента (ПТЭ).- 1992.- Т.4. - С. 147-151.
3. **Samofalov V.N.** Features remagnetization processes in stripes multilayer films with crossed easy axes magnetization and prospects their applications **V.N. Samofalov**, L.I. Lukashenko. // J. Magnetism and Magnetic Materials.- 1993.- Vol. 128. - P. 354-360.
4. Лукашенко Л.И. Доменная структура и магнитосопротивление многослойных пленочных полос со скрещенными осями легкого намагничивания / Л.И. Лукашенко, **В.Н. Самофалов** // Физика металлов и металловедение (ФММ). - 1993.- Т.75, № 5. - С.47-53.
5. Features Barkhausen jumps in multilayer ferromagnetic films with crossed easy axes magnetization / **V.N. Samofalov.**, L.Z. Lubyaniy, L.I. Lukashenko, N.Ye. Overko, A.V. Lukashenko // J. Magnetism and Magnetic Materials.- 1995.- Vol. 148. - P. 267-268.
6. Магниторезистивные ферромагнитные плёнки: новые конструкции чувствительных элементов, технология изготовления и некоторые применения / Л.И. Лукашенко, А.Г. Равлик., С.Т. Рощенко, **В.Н. Самофалов**, И.Г. Шипкова // Труды Украинского вакуумного общества. – Харьков. 1996. - Т.2.- С. 97-111.
7. Шумы Баркгаузена в плёнках пермаллоя с доменными структурами различных типов / Л.З. Лубяный, Н.Е. Оверко, А.Г. Равлик, **В.Н. Самофалов** // Труды Украинского вакуумного общества. – Харьков. 1997. - Т.3 - С. 54-58.
8. Стеценко А.Н. Гигантское магнитосопротивление плёнок ванадия с поверхностной магнитной сверхрешёткой / А.Н. Стеценко, **В.Н. Самофалов**, В.В. Зорченко // Письма в ЖЭТФ. - Т.64, в.5. - С. 346 – 349.
9. Oscillating magnetoresistance Co/Cu (111) films / V.V. Zorchenko, **V.N. Samofalov**, A.N. Stetsenko, A.N. Chirkin // J. Magnetism and Magnetic Materials. – 1998. - Vol. 183. - P. 25-34.
10. New magnetoresistive elements based on W. Thomson effect / A.G. Ravlik, S.T. Roschenko, **V.N. Samofalov**, I.G. Shipkova // Functional Materials. - 1999.- Vol.6, №5. - P.897-902

11. Millimeter waveband resonator cell scanning ESP-spectrometer / S.I. Tarapov, **V.N. Samofalov**, A.G. Ravlik, D.P. Belozorov // International Journal Infrared Millimeter Waves. – 2003. - Vol. 24, №7. - P.1082-1089.
12. Сильные магнитные поля рассеяния в системах из высокоанизотропных магнетиков / **В.Н. Самофалов**, А.Г. Равлик, Д.П. Белозоров, Б.А. Авраменко // ФММ. - 2004. – Т. 97, №3. - С. 15-23.
13. Magnetic Heads for High Coercivity Recording Media / **V.N. Samofalov**, E. I. Ilyashenko, A. Ramstad, L. Z. Lub'yanuy, T. H. Johansen. // J. Optoelectronics and Anvanced Materials. - 2004. - Vol. 6, №3. - P. 911– 916.
14. Generation strong inhomogeneous stray fields high-anisotropy permanent magnets / **V.N. Samofalov**, A.G. Ravlik, D.P. Belozorov, B.A. Avramenko // J. Magnetism and Magnetic Materials. - 2004. - Vol. 281. - P. 326-335.
15. Magnetic anisotropy studies on FeNiCo/Ta/ FeNiCo three layers film sensitive ferromagnetic resonance technique / F. Yildiz, S. Kazan, B. Aktas, S. Tarapov, **V. Samofalov** and A. Ravlik // Phys. Stat. Sol. (c). - 2004. - Vol. 1, № 12. - P. 3694-3697.
16. Ильяшенко Е.И. Измерение и визуализация сильных магнитных полей с помощью индикаторов на основе феррит-гранатовых пленок / Е.И. Ильяшенко, Л.З. Лубяный, **В.Н. Самофалов** // Приборы и техника эксперимента. – 2005. - №4. - С. 1-6.
17. **Самофалов В.Н.** Оптимизация систем из постоянных магнитов / **В.Н. Самофалов**, Д.П. Белозоров, А.Г. Равлик // ФММ. - 2006. – Т. 102, №5. - С. 527-538.
18. New Scanning Millimeter Waveband ESR-Microscope with Localized Magnetic Field / D. Belozorov, V. Derkach, G. Ermak, M. Nakhimovich, A. Ravlik, **V. Samofalov**, S. Tarapov, A. Zamkovoy // International Journal Infrared Millimeter Waves. – 2006. - Vol. 27, №1. - P. 107 – 116.
19. Belozorov D. New Systems Rare Earth Permanent Magnets for Generation Extrahigh magnetic Fields / D. Belozorov, A. Ravlik, **V. Samofalov** // J. Iron and Steel Research Internat. – 2006. - Vol.13, Suppl. - P. 483- 488.
20. **Samofalov V.N.** Permanent Magnet Systems generating strong stray Fields with large localization region / **V.N. Samofalov**, D.P. Belozorov, A.G. Ravlik // J. Magnetism and Magnetic Materials. - 2008. - Vol. 320, №8. - P. 1490-1498.
21. **Samofalov V.N.** High-gradient fields in magnets with giant anisotropy / **V.N. Samofalov**, D.P. Belozorov, A.G. Ravlik // Functional Materials.- 2008.- Vol. 15, №3. - P. 407-411.
22. Патент №4832485 Российская Федерация, М.Кл. G 01R 33/05.- Способ изготовления магниточувствительного полоскового элемента на основе тонкоплёночного композитного материала / **Самофалов В.Н.**; заявители: Равлик А.Г., Рощенко С.Т, Шипкова И.Г., Абрамзон Г.В., Полякова Р.Н., Самофалов В.Н. Яковлев Н.И; патентообладатель Самофалов В.Н. - заявл. 01.10.90; опубл. 18.03. 1993г.
23. А.с. №1649478 СССР, М.Кл. G01R 33/05. - Способ измерения напряжённости магнитного поля и датчик для его реализации / С.Т. Рощенко, **В.Н. Самофалов**, Л.И. Лукашенко; заявл. 16.12. 1988г; опубл. 15.01.1991г.

24. А.с. №943835 СССР, М. Кл.³ G 11 В 5/42. Способ изготовления сердечников магнитных головок / А.И. Ефремов, Л.З. Лубяный., Л.С. Палатник., С.Т. Рощенко., А.Г. Равлик, **В.Н. Самофалов**, Уксусов Н.Н.; заявл. 08. 1979г; опубл. 16.03.1982, Бюл. №26.
25. Strong and Inhomogeneous Magnetic Fields Sources Based on High Anisotropy Rare-Earth Permanent Magnets / **V.N. Samofalov**, A.G. Ravlik, B.A. Avramenko, D.P. Belozorov, A.M. Bovda, V.A. Bovda // China Magnet Symposium. – 2004 - Xian. - P. 198-205.
26. Гигантское магнитосопротивление в плёнках Co-Ag с гранулированной структурой / Б.А. Авраменко, С.В. Малыхин, А.Г. Равлик, **В.Н. Самофалов** // Сборник трудов 18-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”. - М., МГУ.- 2002. - С. 282-284.
27. Сильные магнитные поля рассеяния в системах из высокоанизотропных магнетиков / **В.Н. Самофалов**, А.Г. Равлик, Д.П. Белозоров, Б.А. Авраменко // Сборник трудов 18-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”. - М., МГУ.- 2002. - С. 366-368.
28. Новые возможности практического использования плёнок с анизотропным магнитосопротивлением / Н.И. Яковлев, В.А. Шеленшкевич, С.Х. Карпенков, А.Г. Равлик, С.Т. Рощенко, **В.Н. Самофалов**, И.Г. Шипкова, Л.И. Лукашенко // Сборник трудов 18-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”. - М., МГУ.- 2002. - С. 251-253.
29. Nanostructured Film GMR Sensitive Elements and Their Applications for Strong Magnetic Field Measurement / B.A. Avramenko, D.P. Belozorov, S.V. Malyhin, A.G. Ravlik, E.N. Reshetniak, **V.N. Samofalov**, S.I. Tarapov // Proc. International Workshop on Nanostructured Magnetic Materials and their Applications NMMA. Istanbul, Turkey., 2003. - P.63.
30. Магниторезистивные, магнитные и структурные характеристики гранулированных плёнок Co - Ag с гигантским магнитосопротивлением / Б.А. Авраменко, С.В. Малыхин, А.Г. Равлик, **В.Н. Самофалов** // Сб. докл. Междунар. симпоз. "Тонкие пленки в оптике и электронике". – ННЦ ХФТИ, ИПЦ "Контраст". Харьков., 2002. – Ч.2, - С. 57-60.
31. Магнитные головки для записи на высококоэрцитивных носителях / **В.Н. Самофалов**, Е.И. Ильяшенко, А. Рамстад, Л.З. Лубяный // Сборник трудов. 19-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”.- М., МГУ, 2004. - С. 147-149.
32. Magnetic Heads for High Coercivity Recording Media / **V.N. Samofalov**, E.I. Ilyashenko, A. Ramstad, L. Z. Lub'yanuy, T. H. Johansen // Proceedigs 4th international Workshop. - Bucharest, Romanija., 2004. - P. 43-48.
33. High Performance Magnets as Sources Strong Magnetic Fields and Field Gradients / **V.N. Samofalov**, A.G. Ravlik, B.A. Avramenko, D.P. Belozorov, A.M. Bovda, V.A. Bovda // Proceedings 18th International Workshop on High Performance Magnets and Their Applications. - Annecy (France), 29 August – 2 September 2004, P. 637- 638.
34. Сильные поля рассеяния в магнитах с неоднородным распределением намагниченности / **В.Н. Самофалов**, Д.П. Белозоров, Е.И. Ильяшенко, В.А.

Глебов // Сборник трудов. 20-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”.- М., МГУ, 2006. - С.182-184.

35. Сканирующий ЭПР-спектрометр СВЧ диапазона с локальным намагничиванием объектов / Д.П. Белозоров, А.М. Бовда, В.Н. Деркач, Г.П. Ермак, М.И. Нахимович, А.Г. Равлик, **В.Н. Самофалов**, С.И. Тарапов, А.С. Замковой // Сб. трудов 20 междунар. школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники». - М., МГУ, 2006. - С. 671-673.

36. **Самофалов В.Н.** Предельные поля рассеяния в системах из высокоанизотропных постоянных магнитов и перспективы использования их в технике / В.Н. Самофалов, Д.П. Белозоров // Сборник трудов. 20-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”.- М., МГУ, 2006. -С. 185-187.

37. Размерные эффекты доменной структуры в узких пермалловых полосках / Потапов С.В., Равлик А.Г., Рощенко С.Т., **Самофалов В.Н.**, Шипкова И.Г. // Тез. Докладов 12-й. Всесоюзной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”.- Новгород., 1990. - С.75-76.

38. Размерные эффекты доменной структуры в узких плёночных полосках с различными значениями поля одноосной анизотропии / Л.И. Лукашенко, С.В. Потапов, С.Т. Рощенко, **В.Н. Самофалов**, И.Г. Шипкова // Тез. докладов 19-й Всесоюзной конференции по физике магнитных явлений. – Ташкент., 1991. - С.105.

39. **Самофалов В.Н.** Доменная структура и магнитные свойства плёночных магниторезистивных элементов со скрещёнными осями лёгкого намагничивания / В.Н. Самофалов, Л.И. Лукашенко // Тез. докл. 13-й Всесоюзной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”. – Астрахань, 1992. - С.132-133.

40. **Самофалов В.Н.**, Стеценко А.Н., Зорченко В.В. Поверхностные магнитные сверхрешётки – новый класс ферромагнитных материалов // Тез. докл. 14-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”.- М., МГУ., 1994. - С.17-18.

41. Скачки Баркгаузена в многослойных плёнках со скрещёнными осями лёгкого намагничивания / **В.Н. Самофалов**, Л.З. Лубяный, Л.И. Лукашенко, Н.Е. Оверко, А.В. Лукашенко // Тез. докл. 14-й международной школы-семинара “Новые магнитные материалы микроэлектроники”.- М., МГУ.- 1994. - С. 29-30.

42. ESR – studies Ni-Fe-Co Magnetic Thin Films / F. Yldiz, B. Aktas, S.I. Tarapov, **V.N. Samofalov**, and Ravlik // Program and Abstracts Second Seeheim Conference on Magnetism. - June 27 – July 1. – 2004. - Seeheim, Germany., 2004. – P.236.

43. Belozorov D.P. Stray- Field Singularity Near the Edge of High Anisotropic Magnets: Origin, Manifestation, Applications / D.P. Belozorov, A.G Ravlik, **V.N. Samofalov** // Abstracts of International Conference ”Functional Materials” ICFM – 2005, Ukraine, Crimea, Partenit, 2005.- P. 48.

44. Belozorov D.P. High Anisotropy Permanent Magnets as Sources of Strong and Inhomogeneous Magnetic Fields / Belozorov, A.G Ravlik, **V.N. Samofalov** // Abstracts of International Conference “Functional Materials”, ICFM – 2007, Ukraine, Crimea, Partenit, 2007. - P. 55.

45. Белозоров Д.П. Системы постоянных магнитов, создающие сильные поля рассеяния с большой областью локализации / Д.П. Белозоров, А.Г. Равлик, **В.Н. Самофалов** // Матеріали 8-ої Міжнародної конференції «Фізичні явища в твердих тілах», Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2007.– С.136.

Анотація

Самофалов В.Н. **Сильні поля розсіяння в системах магнітів з гігантською магнітною анізотропією.** - *Рукопис.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01. 04. 11 – магнетизм. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2009.

Дисертаційна робота присвячена вивченню сильних магнітних полів розсіяння, які виникають в магнітах з гігантською магнітною анізотропією.

На прикладах рішення різних магнітостатичних задач теоретично обґрунтована можливість виникнення в магнітах з гігантською магнітною анізотропією полів розсіяння, напруженість яких перевищує значення індукції насичення матеріалу магніту B_S . В роботі такі поля були названі *сильними полями розсіяння*. Показано, що для виникнення таких полів необхідно, щоб поле одноосної анізотропії речовини магніта H_K значно перевершувало його індукцію насичення: $H_K \gg B_S$.

Прямими вимірюваннями напруженості поля за допомогою магніторезистивних датчиків і ЕПР спектрометра доведено існування сильних магнітних полів розсіяння. Показано, що виміряні значення поля добре корелюють з розрахованою логарифмічною залежністю $H \approx 4M_S \ln(r/a)$.

Залежно від форми області локалізації поля визначено три види сильних полів: *лінійні, точкові і однорідні сильні поля*. Показано, що граничні значення полів не можуть бути вищими, ніж $4\pi M_S \ln(R/r)$ та $6\pi M_S \ln(R/r)$ для лінійного та точкового поля відповідно. Показано, що сильні поля розсіяння також виникають в магнітах з неоднорідним розподілом намагніченості і вони мають велику область локалізації сильного поля.

У роботі була обґрунтована можливість створення магнітних головок для запису інформації на носіях з коерцитивною силою $H_C = 5 - 10$ кЕ, а також створення ЕПР мікроскопа для отримання даних щодо фізико-хімічних властивостей з локальних ділянок зразка.

Abstract

Samofalov V.N. Strong Stray fields in Systems of magnets with giant anisotropy

The thesis on the scientific degree of doctor of physical and mathematical sciences by the speciality 01.04.11 – magnetism – V.N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, 2009.

The thesis is devoted to studying the large stray fields which occur in magnets with giant magnetic anisotropy. In the work it is grounded theoretically and proved experimentally that in the magnets with large anisotropy, the stray field strength can exceed the saturation induction B_S value of the magnet material. Such fields were termed *strong stray fields*. It is shown that in order to the strong stray fields occur, the

uniaxial anisotropy field in the magnet substance is necessary to exceed substantially its saturation induction, $H_K \gg B_S$.

Existence of the strong stray fields was experimentally proved both by direct field measurements with magnetoresistive sensors with GMR effect and using EPR spectrometer. It is shown that the field measured values are in good correlation with the calculated logarithmic dependence $H \approx 4M_S \ln(r/a)$.

Three types of strong magnetic stray fields are determined – *linear, point, and uniform*. It is shown that the limit values of linear and point fields are determined by $H = 4\pi M_S \ln(R/r)$ and $H = 6\pi M_S \ln(R/r)$ dependencies, respectively.

In the work, the possibility of developing of diversity of devices, for example magnetic heads for recording the information on the media with coercivity $H_C = 5 - 10$ kOe, is grounded.

Аннотация

Самофалов В.Н. **Сильные поля рассеяния в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией.** – *Рукопись*.

Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2009.

Диссертационная работа посвящена изучению сильных магнитных полей рассеяния, которые возникают в магнитах с гигантской магнитной анизотропией.

На примерах решения различных магнитостатических задач теоретически обоснована возможность возникновения в магнитах с гигантской магнитной анизотропией полей рассеяния, напряжённость которых превосходит значение индукции насыщения материала магнита B_S . В работе такие поля были названы *сильными полями рассеяния*. Показано, что сильные поля достигаются вблизи особых (сингулярных) точек в магнитах. Были сделаны оценки предельных значений сильного поля. Показано, что для возникновения таких полей рассеяния необходимо, чтобы поле одноосной анизотропии вещества магнита H_K значительно превосходило его индукцию насыщения: $H_K \gg B_S$.

Для экспериментальной проверки наличия сильных полей рассеяния, и соответствия измеренных значений поля рассчитанным зависимостям были изготовлены магниторезистивные датчики микронных размеров в форме узких полосок. Создание высокочувствительных датчиков для измерения полей в интервале 1-20 кЭ стало возможным после проведения комплексных исследований структуры и магнитных свойств гранулированных пленок *Ag-Co*, *Co-Cu*, а также островковых пленок *Co-Cu*. Установлено, что гранулированные пленки *Ag-Co* обладают гигантским магниторезистивным эффектом (ГМР) до 30%. Показано, что ГМР-эффект в этих пленках не связан с суперпарамагнетизмом гранул *Co*.

Прямыми измерениями напряжённости поля при помощи магниторезистивных датчиков с чувствительными элементами на основе гранулированных плёнок $Ag-Co$ и с помощью ЭПР спектрометра доказано существование сильных магнитных полей рассеяния. Так, на системе из 2-х магнитов было зарегистрировано ГМР датчиком поле рассеяния $H \approx 17$ кЭ, а ЭПР-спектрометром поле с напряжённостью $H \sim 19$ кЭ. Это в 2 раза превосходит остаточную индукцию материала магнита из $SmCo_5$. Показано, что измеренные значения поля на малых расстояниях r от сингулярной точки хорошо коррелируют с рассчитанной логарифмической зависимостью $H \approx 4M_S \ln(r/a)$.

Определены три вида сильных магнитных полей рассеяния – *линейные, точечные и однородные*. Для каждого из них были найдены оптимальные геометрические формы и направление намагниченности в магнитах, при которых напряжённость сильных полей наибольшая. Для характеристики сильных полей введены следующие параметры: H_{max} – предельное значение поля рассеяния; Δr – область локализации сильного поля; $|\nabla H|$ – предельное значение градиента поля; $\langle H \rangle$ – среднее значение сильного поля в некотором объёме. Показано, что предельные значения линейного поля не могут быть выше, чем это следует из зависимости $H = 4\pi M_S \ln(R/r)$, а точечного $H = 6\pi M_S \ln(R/r)$. Предельная величина напряжённости однородного поля не превышает $H \approx 6\pi M_S$.

Установлено, что сильные поля рассеяния также возникают в магнитах с неоднородным распределением намагниченности. Так, в цилиндрическом магните с радиальным направлением намагниченности предельная зависимость поля рассеяния имеет вид $H_z(z) \approx 2\pi M_S \ln(2z/R)$. В системе из 2-х таких магнитов предельное поле лимитируется зависимостью $H_z(z) \approx 4\pi M_S \ln 2(z/R)$. Показано, что в узком зазоре системы из 2-х таких магнитов область локализации сильного поля сравнима с диаметром цилиндрического магнита $\Delta r \approx 2R$, а величина среднего поля рассеяния по объёму зазора в 2 раза превышает индукцию насыщения материала магнита $\langle H \rangle \approx 2B_S$.

Установлено, что в системах магнитов с гигантской магнитной анизотропией модуль градиента поля может достигать значений $|\nabla H| \approx 10^6 - 10^8$ Э/см. Указанные значения градиента сравнимы с высокоградиентным полем рассеяния, которое достигается в сверхпроводящих магнитах с коническими наконечниками, изготовленными из материалов с высокой индукцией. Проведены оценки величины механических напряжений, которые могут быть связаны с большим градиентным полем.

В работе была обоснована возможность создания магнитных головок для записи информации на носителях с коэрцитивной силой $H_C = 5 - 10$ кЭ. Показано, что при использовании высококоэрцитивных носителей размер магнитного отпе-

чатка может быть уменьшен до нескольких нанометров. Это позволит увеличить плотность записанной информации на 1 – 2 порядка. Кроме того, использование подобных носителей одновременно решит проблему надёжности хранения записанной информации. На основании проведенных исследований была также обоснована возможность создания ЭПР микроскопа для получения данных о физико-химических свойствах локальных участков образца. Обсуждается возможность использования сильных полей рассеяния в высокоградиентных магнитных сепараторах для обогащения слабомагнитных руд. Показано, что системы магнитов с большой областью локализации сильного поля могут быть использованы при разработке холодильных устройств на основе гигантского магнитокалорического эффекта.

Підписано до друку 01.22.2009р.
Формат 60 x 84/16. Папір офсетний.
Гарнітура Nimes. Друк різнографія.
Умов. друк. арк.. 1,8. Тир. 100 прим.
Замов. _____ Надруковано СПД ФО Бровін О.В.
Св-во 2708608999. м. Харків, майдан Свободи, 7.
Т. (057) 758-01-08, (8066) 822-71-30