

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ім. О.О. Галкіна

на правах рукопису

**ЗАБЛОЦЬКИЙ Віталій Арсенович**

**СПОНТАННІ ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ У ДОМЕННИХ СТРУКТУРАХ  
ТОНКИХ ОДНООСЬОВИХ МАГНІТНИХ ПЛІВОК**

Спеціальність 01.04.11 - магнетизм

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття вченого ступеня  
доктора фізико-математичних наук

ДОНЕЦЬК- 1996

ДВ 37.20

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Донецькому державному університеті

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук,  
професор Мамалуй Ю.О.

Офіційні опоненти:

академік АВШ та АІН України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Горобець Ю.І.,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор Криворучко В.М.,  
доктор фізико-математичних наук  
Денисов С.І.

Провідна організація: Харківський державний університет

Захист відбудеться "4" апреля 1996р. о 13<sup>00</sup> годин на засіданні спеціалізованої ради Д 06.11.01 в Донецькому фізико-технічному інституті НАН України (340114, Донецьк-114, вул. Р. Люксембург, 72).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ДонФТІ НАН України.

Відгуки на автореферат просимо надсилати на ім'я вченого секретаря спеціалізованої ради.

Автореферат розіслано "1" марта 1996р.

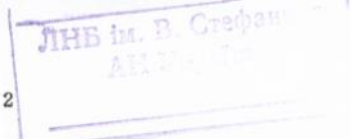
Вчений секретар спеціалізованої ради  
Д 06.11.01

Є.Є. СОЛОВЬОВ

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00740442 (L)



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми та ступінь дослідження тематики дисертації.* На протязі багатьох років доменні структури магнітних плівок є об'єктом інтенсивних експериментальних та теоретичних досліджень, направлених як на вивчення доменних структур конкретних магнітних матеріалів, так і на вивчення явищ, що мають фундаментальне значення не тільки для фізики магнітних явищ, але й для інших розділів фізики, наприклад, фізики фазових переходів.

Серед багатьох магнітних матеріалів особливе місце займають монокристалічні плівки феритів-гранатів, доменні структури яких відрізняються надзвичайним різноманіттям й можуть бути використовані у практичних цілях. Крім практичного застосування цих матеріалів у різного роду пристроях магнітоелектроніки та магнітооптики, підвищена зацікавленість до їх досліджень пояснюється їх прозорістю, що з використанням ефекту Фарадея робить можливим здійснювати візуальний контроль за зміненнями, які відбуваються у доменних структурах під впливом зовнішніх факторів: магнітних та електричних полей, температури, механічних напружень, електромагнітного випромінювання, тощо. Крім того, епітаксіальні плівки феритів-гранатів є практично "бездефектними" матеріалами, і в силу цього вони служать унікальним об'єктом для дослідження динамічних властивостей доменних структур.

За останні роки була виконана велика кількість експериментальних та теоретичних досліджень доменних структур, які існують поблизу точок спонтанних та індукованих полем магнітних фазових переходів, що дозволили виявити ряд цікавих особливостей у поведінці таких ДС. Особливий інтерес до дослідження поведінки ДС при фазових переходах пояснюється тим, що у магнітній доменній структурі, дуже чутливій до змінення внутрішніх параметрів зразка, відбувається істотна перебудова (зміна розмірів та форми доменів, їх числа, орієнтації вектора намагніченості усередині доменів, тощо) разом із зміненням магнітної фази зразка.

Поведінка ДС при зміненні температури або магнітного поля удалині від точок, де магнітні параметри зразка мають будь-які особливості, тривкий період залишалася без належної уваги. Це

пояснюється тим, що при нагріванні або охолодженні монотонні плавні змінення магнітних характеристик зразка часто приводять лише до незначних безперервних змінень параметрів його ДС. Це відбувається, якщо інтервал змінення температури недостатньо широкий чи магнітні параметри зразка змінюються з температурою не дуже швидко. У цьому випадку невеликого змінення параметрів ДС (при збереженні повного числа доменів у зразку та їх форми) виявляється достатньо для того, щоб вона могла пристосуватися до нових значень магнітних констант матеріала. Інша ситуація постає, коли або є широким діапазон змінення температури, або параметри матеріала сильно залежать від температури: відносна величина температурного змінення одного (чи декількох) з магнітних параметрів зразка виявляється великою, а його ДС безперервним чином змінює свої параметри тільки до моменту досягнення такої температури, при якій вся структура стає нестійкою й може бути дестабілізованою внаслідок найменшого зовнішнього впливу на зразок: невеликим зміненнями поля чи температури, прикладенням невеликих механічних напружень, взаємодією з полем електромагнітної чи звукової хвилі. Аналогічну поведінку можуть викривати доменні структури тонких магнітних плівок й із зміненням величини напруженості зовнішнього магнітного поля при фіксованій температурі. Таким чином, квазістатичні змінення температури чи зовнішнього магнітного поля можуть переводити ДС з рівноважного стану, в якому вона знаходилася в момент її виникнення або цілеспрямованого формування, у метастабільний стан, в області якого може здійснитися або стрибкоподібний перехід до іншої, термодинамічно більш вигідної структури, або вихідна ДС досягає межі своєї абсолютної стійкості, за якою виникає нова рівноважна структура.

Очевидно, що для опису подібних переходів від метастабільних до термодинамічно вигідних структур не можуть бути використані висновки теорій, які було розроблено для цілком рівноважних структур. Крім того, ДС, що виникають внаслідок спонтанного чи індукованого полем переходу, як правило, виявляються нерегулярними, що знову-таки обмежує застосування існуючих теорій, оскільки останні розроблено лише для періодичних доменних структур. Належить також зауважити, що, оскільки метастабільні стани ДС відокремлені один від

одного енергетичними бар'єрами, підходи до опису можливих переходів між доменними структурами, в основі яких лежить умова рівності енергій цих ДС як умова переходу, не є адекватними. Все це говорить про актуальність задачі розробки єдиного підходу, який дозволяє аналізувати можливість і умови здійснення того чи іншого переходу у доменних структурах тонких магнітних плівок.

Особливий інтерес уявляють дослідження переходів в доменних структурах з точки зору пошуку загальних закономірностей фазових переходів у системах частинок, що взаємодіють. Погляд на проблему переходів у доменних структурах як на частину загальної проблеми фізики фазових переходів почав розвиватися в останнє десятиріччя. Привабливість цієї ідеї обумовлена тим, що в протилежність переходам в молекулярних системах кінетика переходів у магнітних доменних структурах є доступною для безпосередніх візуальних спостережень. Саме цьому ідентифікація переходів в ДС та встановлення їх загальних закономірностей й особливостей складають ще один аспект актуальності теми дослідження даної дисертаційної роботи.

*Цілі та задачі роботи.* Ціллю дисертаційної роботи є експериментальні та теоретичні дослідження спонтанних (що відбуваються при зміні температури) та індукованих зовнішнім магнітним полем фазових переходів у доменних структурах тонких одноосьових магнітних плівок.

Ціль цієї дисертаційної роботи передбачає розв'язування наступних експериментальних задач:

1. Вимірювання температурних залежностей параметрів рівноважних та метастабільних доменних структур. Знаходження середніх параметрів нерегулярних ДС та встановлення виду функцій розподілу числа доменів за їх розміром. Дослідження впливу умов формування ДС на величину температурного інтервалу їх стійкості.
2. Вимірювання температурних залежностей основних магнітних параметрів плівок феритів-гранатів: намагніченості насичення, константи одноосьової анізотропії, характеристичної довжини матеріалу, поля коерцитивності доменних меж, тощо.
3. Дослідження кінетики фазових переходів у регулярних і кластерних доменних структурах. Спостереження і фіксування основних етапів

переходів від одного типу ДС до іншого. Виявлення ролі дефектів доменної структури у механізмі утворення та зростання зародків нової доменної фази. Отримання експериментальних фазових діаграм для ДС різних типів.

4. Розроблення способів формування двофазних доменних структур (співіснуючих ґратки ЦМД та смугових доменів, спіральних й циліндричних доменів, ґраток ЦМД відмінної полярності, тощо) та дослідження їх стійкості й еволюції при змінній температурі півки або зовнішнього магнітного поля.

5. Експериментальна перевірка наслідків теоретичних моделей, що розроблюються, та встановлення загальних закономірностей еволюції магнітних доменних структур.

Нижче сформульовано основні задачі теоретичних досліджень, виконаних у дисертаційній роботі.

1. Розроблення єдиного термодинамічного підходу, що дозволяє аналізувати термодинамічний стан періодичних, кластерних і аморфних доменних структур тонких магнітних плівок, який повинен задовольняти наступним основним вимогам: включати в себе рівняння, котрі описують термодинамічно рівноважні ДС при різних способах фіксування зовнішніх параметрів системи; мати кількісну характеристику ступеня метастабільності ДС і методи знаходження меж стійкості метастабільних станів; мати у розпорядженні аналітичні вирази для основних термодинамічних потенціалів регулярних та аморфних ДС; бути універсальним у значенні застосування до опису фазових переходів у будь-якій ДС.

2. З'ясування фізичних механізмів й умов здійснення фазових переходів у ДС. Встановлення взаємозв'язку поміж температурними зміненнями магнітних параметрів півки та інтервалами стійкості доменних структур.

3. Розрахунок енергії хвилеподібних доменних структур й енергії аморфних ґраток ЦМД.

4. Ідентифікація фазових переходів у доменних структурах. Встановлення загального виду фазових діаграм та їх розрахунок для ДС різних типів.

5. Побудова моделей двофазних ДС, аналіз умов їх рівноваги та розрахунок залежностей параметрів співіснуючих структур від

температури плівки. Дослідження фазових переходів у співіснуючих ДС.

6. Дослідження впливу флуктуацій, що виникають у системі доменів під впливом зовнішніх змінних магнітних полей або температури, на стійкість ДС. Розрахунок конфігураційної ентропії ДС.

***Наукова новизна й результати, що виносяться на захист.***

Оригінальний напрямок досліджень, виконаних в дисертаційній роботі, міститься у тому, що систематично й цілеспрямовано вивчені природа та механізми спонтанних та індукованих полем фазових переходів у доменних структурах тонких одноосьових магнітних плівок. Об'єктами експериментального дослідження було обрано монокристалічні плівки феритів-гранатів, основні магнітні параметри яких виміряні в інтервалі температур від 20 до 460 К. У цих магнітних матеріалах вперше було виявлено ряд спонтанних переходів у регулярних та кластерних магнітних доменних структурах й розроблено послідовний термодинамічний підхід, що застосовується до їх опису.

Наступні основні результати та наукові положення, котрі виносяться на захист, окреслюють конкретну **новизну** дисертаційної роботи:

1. Розроблений **термодинамічний підхід**, оснований на введенні понять хімічного потенціалу домена, тиску доменної структури, ефективної температури ДС та її ентропії, який дозволяє з єдиної точки зору описувати різноманітність фазових перетворень у квазірегулярних магнітних доменних структурах одноосьових плівок. З використанням цього підходу встановлено загальний вигляд фазових діаграм для ДС різних типів та показано, що положення ліній переходів на фазових діаграмах визначається початковими параметрами ДС, магнітними параметрами плівки та швидкістю їх змінювання з температурою.

2. **Загальні закономірності** еволюції доменних структур тонких одноосьових магнітних плівок, яка є результатом квазістатичного змінювання температури або магнітного поля: безперервна еволюція аморфних ДС; фазові переходи першого роду у регулярних ДС, які супроводжуються термодинамічно рівноважним співіснуванням фаз; дестабілізація метастабільних ДС шляхом колапсу, змінювання розмірів або форми доменів; утворення й зростання на дефектах початкової структури зародків нової доменної фази.

3. Механізми спонтанних фазових переходів у доменних структурах. З'ясовано, що провідну роль у механізмах спонтанних фазових переходів у доменних структурах грає *магнітостатичний тиск ДС*, який є функцією розмірів доменів і змінюється разом із зміною температури або магнітного поля. Саме змінюванням магнітостатичного тиску ДС керуються процеси утворення та зростання зародків нової доменної фази або їх блокування, визначаються температури фазових переходів, умови співіснування доменних фаз та проявлення скейлінгу.

4. Існування *топологічних фрустрацій* у системі хвилеподібних доменів, пов'язаних з тим, що енергія хвилеподібної доменної структури як функція амплітуди згинів її доменних меж, має велику кількість локальних мінімумів однакової глибини, які розділені бар'єрами і відповідають квазірівноважним станам системи, які відрізняються одне від одного. Показано, що багатодолинисті рельєфу енергії хвилеподібних ДС є причиною гістерезисних явищ, які спостерігаються у хвилеподібних та аналогічних до них лабірінтних доменних структурах при зміні температури або магнітного поля.

5. Результати експериментальних та теоретичних досліджень стійкості двофазних доменних структур магнітних плівок. Установлено, що в просторово-однорідному магнітному полі зміщення доменні структури різних типів можуть співіснувати як *метастабільні* доменні фази, котрі при зміні температури плівки або магнітного поля можуть оборотнім чином змінювати свій період та розміри доменів. Показано, що взаємний вплив співіснуючих доменних фаз магнітної плівки проявляється у зміні температури спонтанного переходу у кожній з ДС, а зміщення міжфазної межі є оборотнім в інтервалі температур між точками фазових переходів у співіснуючих структурах.

6. *Новий ефект* - обертання гантелеподібних доменів (dumbbells) у ґратках ЦМД (що утворені з співіснуючих спіральних та циліндричних доменів та знаходяться під впливом змінного магнітного поля), в яке при збільшенні температури плівки послідовно утягуються інші гантелеподібні домени, що раніше були нерухомими при температурі формування ДС.

*Достовірність* та обґрунтованість основних результатів дисертації обумовлена застосуванням апробованих методів

математичної фізики й термодинаміки, узгодженням у ряді граничних випадків результатів дисертаційної роботи з відомими результатами. Крім того, практично всі головні висновки роботи підтверджено експериментально.

**Наукова і практична вагомість** дисертаційної роботи міститься у тому, що розроблений автором термодинамічний підхід дозволяє з єдиної точки зору описувати все різноманіття спонтанних та індукованих полем фазових переходів у доменних структурах одноосьових плівок. Виконані у дисертаційній роботі дослідження дозволили поширити й поглибити уявлення про фізичні властивості і термодинамічну поведінку доменних структур тонких магнітних плівок, сформулювати основні закони еволюції магнітних доменних структур, яка відбувається при змінненні зовнішніх умов. Було проведено дослідження спонтанних й індукованих полем переходів у доменних структурах, що являють собою приклад фазових переходів у відкритих по числу частинок системах, в яких розмір "частинок", а отже, і потенціал їх взаємодії можуть змінюватися разом із змінненням зовнішніх параметрів; ці дослідження поширили клас фазових переходів у системах взаємодіючих частинок. Отримані в дисертаційній роботі результати служать основою і стимулом для нових експериментів та теоретичних досліджень не тільки у фізиці магнітних доменів, але й у фізиці фазових переходів. Практична вагомість дисертації пов'язана з можливістю застосування її результатів при створенні й удосконаленні різних магнітоелектронних пристроїв, що використовують плівки із змістом доменів.

**Апробація роботи.** Основні результати досліджень, наведені в дисертації, доповідалися й обговорювалися на таких конференціях та семінарах: Республіканських наукових семінарах "Фізика ферритів і магнітних діелектриків, их применение в технике" (Донецьк, 1987), "Фізика магнітних явлень" (Донецьк, 1988), III Семінарі з функціональної магнітоелектроніки (Красноярськ, 1988), III Радянсько-Чехословацькому семінарі "Фізика магнітних доменів і фазовые переходы" (Бердянськ, 1988), XI Всесоюзній школі- семінарі "Новые магнітныє материалы микроэлектроники" (Ташкент, 1988), Всесоюзному семінарі " ЦМД/ ВБЛ в системах обработки и хранения

информации" (Москва, 1989), Республіканському науковому семінарі "Фізика ферритов и родственных им соединений, их применение в технике" (Донецьк, 1989), XII Всесоюзній школі-семінарі "Новые магнитные материалы микроэлектроники" (Новгород, 1990), Всесоюзному семінарі з проблем ЦМД/ ВБЛ (Москва, 1991), Семінарі з магнітоелектроніки (Сімферополь, 1991), Школі-симпозіумі з фізики магнітних явищ (Алушта, 1993), VI науковому семінарі "Фізика магнитных явлений" (Донецьк, 1993), Європейській конференції "Магнитные материалы и их применение" -ЕММА'93 (Кошице, 1993), Семінарі відділу магнетизму Інституту фізики Академії Наук Чеської республіки (Прага, 1994), Міжнародної конференції з магнетизму - ICM'94 (Варшава, 1994), VII Міжнародному науковому семінарі "Фізика магнитных явлений" (Донецьк, 1994), VI Європейській конференції "Магнитные материалы и их применение" - ЕММА'95 (Відень, 1995), IX Чесько-Словацькій конференції з магнетизму (Кошице, 1995).

**Публікації.** По темі дисертації надруковано 39 робіт й отримано 1 авторське свідомство на винахід. Список основних робіт наведено у кінці автореферату. Основні результати дисертації одержані *особисто автором*.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, шести глав, закінчення та списку цитованої літератури. Її повний об'єм складає 345 сторінок і включає 73 малюнка на 47 сторінках, 5 таблиць і список літератури з 243 найменувань на 27 сторінках.

**Методика** роботи полягає в застосуванні методів термодинаміки до аналізу фазових переходів у доменних структурах магнітних плівок. В роботі поєднуються методи експериментальних та теоретичних досліджень.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* мотивується вибір теми дисертації, визначається її наукова актуальність, формулюються мета та задачі роботи, перераховуються положення, які виносяться на захист. Тут також розкривається структура і зміст дисертації по главах.

В *першій главі* обґрунтовується можливість термодинамічного опису доменних структур як систем частинок, що взаємодіють і

задовольняють усім аксіомам макроскопічної термодинаміки. Сформульовано головні ідеї термодинамічного підходу, який розроблюється і в основі якого є введення понять хімічного потенціалу домену та магнітостатичного тиску доменної структури. Хімічний потенціал домену та тиск ДС визначено як  $\mu = \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{V,S}$  та  $P = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S$  (де  $U$ - енергія ДС,  $N$ - число доменів в структурі,  $V$ - об'єм). Введено поняття конфігураційної ентропії доменної структури ( $S$ ) та виконано її розрахунок для ґратки ЦМД і смугової ДС. На прикладі розрахунку конфігураційної ентропії ґратки ЦМД, яка має дефекти типу міжвузельний домен, показано, що облік ентропійних доданків у виразах для вільної енергії доменних структур необхідний лише в тих температурних інтервалах, де намагніченість насичення є малою (наприклад, поблизу точки Неєля або точки компенсації). При будь-якій температурі ( $T$ ) рівноважне відносне число точкових дефектів ( $\xi$ ) у ґратці ЦМД визначається рівнянням

$$b \frac{(4\pi M_s(T))^2 h^3 y^3 x}{kT} \xi = \ln \frac{(1-\xi)(2-\xi)}{\xi^2}, \quad (1)$$

де  $M_s$  - намагніченість насичення плівки,  $h$ - товщина плівки,  $y=d/a$ ,  $x=d/h$ ,  $d$ - діаметр ЦМД,  $a$ - період ґратки доменів,  $k$ -константа Больцмана,  $b$ - чисельна стала.

У цій же главі наводяться температурні залежності основних магнітних параметрів ферит-гранатових плівок (намагніченості насичення, констант одноосьової анізотропії й обміну, характеристичної довжини, поля коерцитивності доменної межі), які було виміряно в інтервалі температур від 20 до 460 К. Запропоновано статистичну модель, яка описує взаємодію доменної межі скінченної ширини із деякими основними типами дефектів монокристалічних плівок феритів-гранатів. У рамках цієї моделі з використанням експериментальної залежності константи одноосьової анізотропії для феритів-гранатів розраховано температурну залежність поля коерцитивності доменної межі та в інтервалі температур (200 - 460) К отримано задовільне узгодження з експериментальними даними. Показано, що, не дивлячись на зростання коерцитивності доменної межі із зниженням температури, для ферит-гранатових плівок, які було

досліджено при  $T > 50K$ , магнітостатичний тиск доменної структури на один-два порядки перевищує тиск поля коерцитивності ДМ. Останнє дозволяє не брати до уваги вплив коерцитивності ДМ при опису температурної еволюції магнітних доменних структур гранатових плівок.

У *другій главі* наведено результати експериментальних та теоретичних досліджень спонтанних фазових переходів у квазірегулярних ґратках ЦМД. На основі експериментальних даних і з використанням термодинамічного підходу, що розроблюється у цій дисертаційній роботі, встановлено, що спонтанні переходи у ґратках ЦМД обумовлені температурним змінням характеристичної довжини (константи одноосьової анізотропії) плівки. Шляхом мінімізації відповідного термодинамічного потенціалу ГЦД, який розглядається при різних способах фіксації зовнішніх параметрів системи (розглянуто ґратки ЦМД з  $N = const$ , що знаходяться під постійним зовнішнім тиском, та ґратки з числом частинок, що не зберігається, але при виконанні умов  $\mu = const$  і  $V = const$ ), отримано рівняння, які пов'язують параметри регулярних рівноважних ґраток ЦМД із магнітними характеристиками плівки.

Показано, що для квазірегулярної ґратки ЦМД, сформованої у ферит-гранатовій плівці, існує температурний інтервал, в якому всі температурні зміння її параметрів (діаметра ЦМД, тиску ґратки, намагніченості, тощо) носять оборотний характер. Так, при нагріванні плівки внаслідок зменшення її характеристичної довжини ( $l$ ) ЦМД у ґратці збільшується в діаметрі. До того ж домени, що знаходяться у місцевості дефекту ГЦД, розширюються у більшій мірі, ніж інші, оскільки в цієї області плівки тиск з боку оточення ґратки знижений.

Із зростанням температури плівки збільшується ступінь метастабільності ( $\Delta\mu = |\mu - \mu_s|$ , де  $\mu_s$  - хімічний потенціал страйп-домену) існуючої ГЦД по відношенню до смугової ДС з тим же періодом. При певній температурі, що знаходиться із умови розвитку еліптичної нестійкості ЦМД у ґратці, локалізовані у місцевості дефекту домени перетворюються у страйпи невеликої довжини та утворюють зародки нової фази. Температурну залежність критичного розміру

зародка ( $L_{cr}$ ) знайдено із умови максимуму змінення термодинамічного потенціала Гібса при його утворенні

$$\Delta G = n(\mu_s - \mu) + 4L_s h \sigma_r + A, \quad (2)$$

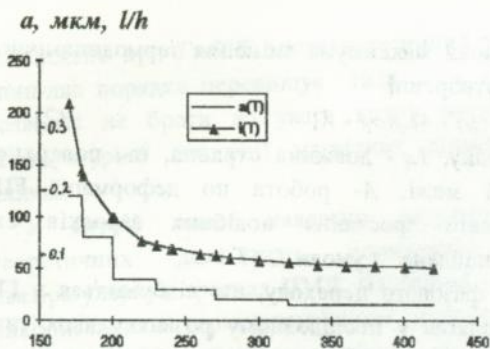
де  $n$ -число страйпів у зародку,  $L_s$  - довжина страйпа,  $\sigma_r$ - поверхнева густина енергії міжфазної межі,  $A$ - робота по деформації ГЦД. Температура ( $T_2$ ), при якій зростання подібних зародків стає термодинамічно вигідним, знайдена з умови  $L_{cr}(T_2) \approx a$ .

Таким чином, механізм фазового переходу, що відбувається у ГЦД при нагріванні плівки, полягає у послідовному розвитку двох типів нестійкості: при деякій температурі циліндричні домени, що знаходяться у місцевості дефектів ґратки, стають нестійкими відносно еліптичних збурень форми ДМ та утворюють зародки нової фази; подальше зростання температури призводить до виникнення нестійкості відносно розпаду на фази: блоки ґратки ЦМД з меншими параметрами ( $d$  та  $a$ ) й області страйп-доменив скінченної довжини. При цьому температура фазового переходу в ГЦД ( $T_2$ ) визначається початковими параметрами ґратки (тобто залежить від умов її формування і параметрів зразка) і швидкістю змінення характеристичної довжини плівки з температурою ( $\alpha$ ):

$$T_2 - T_0 = \frac{z(H) + 2\pi(8\tilde{\sigma} + \varphi(H)) - 6k(\chi)\chi^{-1}y^4(H)}{4\alpha}, \quad (3)$$

де  $T_0$  - температура формування ГЦД,  $z = a/h$ ,  $k(\chi) = 0.172$  і  $\chi = \sqrt{3}$  для гексагональної ґратки,  $\tilde{\sigma} = \sigma_r / (4\pi M_s)^2 h$ ,  $\varphi(H)$ - протабульована функція величини напруженості поля зміщення. На основі (3) вдалося пояснити всі особливості експериментальних фазових діаграм ґраток ЦМД. Зокрема, один з висновків (3)- величина інтервалу термостабільності ГЦД ( $T_2 - T_0$ ) обернено пропорційна  $\alpha = |dI(T)/dT|$ - повністю узгоджується з даними експеримента, що ілюструє мал.1.

У випадку охолодження плівки при  $H = const$  нижньою границею інтервалу термостабільності ГЦД є температура її спонтанного переходу до ґратки з більшими параметрами. Виявлено механізм і характер цього переходу. Показано, що даний перехід відбувається шляхом колапсу частини ЦМД вихідної ґратки й одночасного з ним поширення решти ЦМД до рівноважного діаметра, який відповідає характеристичній довжині плівки при температурі переходу.



Мал.1 Залежності інтервалу термостабільності ГЦД (ширина сходин на кривій  $a(T)$ ) та характеристичної довжини плівки від температури.

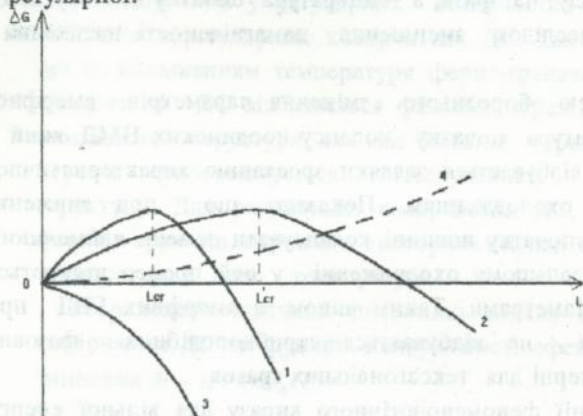
T, K

Установлено, що перехід до нової ГЦД здійснюється на границі абсолютної стійкості вихідної фази ГЦД та відбувається без утворення зародків нової доменної фази. Неможливість виникнення зародків нової фази - ґратки ЦМД з великими параметрами пояснюється тим, що тиск ґратки з меншою густиною (більшим періодом) менше, ніж у ГЦД, що її оточує ( $P = 6(2\pi M_s)^2 k(\chi) \chi^{-1} x^4 z^{-5}$ , тобто  $P \sim a^{-5}$ ). Цьому зародки ГЦД з більшими  $d$  і  $a$  не можуть існувати у вихідній ГЦД. Тут ми маємо справу з явищем блокування зародків нової доменної фази, яке обумовлено дією магнітостатичного тиску ГЦД. Розраховано фазові ( $H-T$ ) діаграми для ґраток ЦМД, які відрізняються умовами їх формування, та проведено порівняння з експериментальними результатами.

Показано, що спонтанні переходи, які відбуваються у квазірегулярних ґратках ЦМД, є фазовими переходами першого роду, тобто супроводжуються стрибками питомого об'єму домену, намагніченості плівки й гістерезисом. Виникнення температурного магнітного гістерезису в ЦМД-структурах плівок феритів-гранатів пояснено різницею механізмів переходів, що відбуваються при нагріванні та охолодженні плівки.

Третя глава присвячена дослідженню термодинамічної поведінки кластерних (тобто тих, що складаються з великого числа блоків гексагональної ґратки) й аморфних ґраток ЦМД. Експериментально виявлено, що температура фазового переходу у кластерних ГЦД на  $(10 \div 50)$  K вище, ніж у регулярних. Крім того, поблизу точки Нееля в кластерних ґратках виявлено оборотні переходи до структури, яка

складається з блоків нової ґратки з меншим періодом та страйп-доменів скінченної довжини. Аналіз змінення термодинамічного потенціалу (2) при утворенні зародка страйп-фази у кластерній ґЦД показав, що внаслідок нерівноважності вихідної кластерної ґратки по числу доменів ( $\mu(T_0) < 0$ ) критичний розмір зародка у кластерній ґратці завжди більше, ніж у регулярній (див. криві 1 та 2 на мал.2). Саме цьому температура распаду на фази кластерної ґратки вище, ніж регулярної.



**Мал.2** Змінення термодинамічного потенціалу Гібса при утворенні зародка страйп-фази у ґратках ЦМД: 1-гексагональної, 2-кластерної, 3-кластерної при  $T \leq T_m$ , 4- аморфної.

Встановлено, що механізм «оборотніх» переходів, які спостерігаються у кластерних ґратках поблизу температури Нееля, пов'язаний із температурним змінням намагніченості насичення шівки. У цьому випадку  $\Delta G < 0$ , а  $L_{cr} \rightarrow 0$  (крива 3 на мал.2), тобто в указаному інтервалі температур зростання зародків будь-якого розміру стає термодинамічно вигідним, і переходи носять безгістерезисний характер.

Експериментально показано, що аморфні ЦМД-структури володіють найбільшою стійкістю відносно підвищення температури півки. На основі встановленого експериментально нормального закону розподілу доменів за їх діаметрами та введеної парної кореляційної функції розраховано основні термодинамічні потенціали аморфної ґЦД та знайдено рівняння, що визначають середні параметри аморфних ґраток.

Проаналізовано змінення термодинамічного потенціала Гбса (2) при утворенні в аморфній ґратці зародка страйп-фази й показано, що утворення таких зародків не може бути термодинамічно вигідним ( $\Delta G$  монотонно зростає із зростанням  $L$ , тобто  $L \rightarrow \infty$ , (див. криву 4 на мал.2), а отже, у аморфних ГЦД неможливі переходи, аналогічні тим, що відбуваються при нагріванні в регулярних та кластерних ґратках. Таким чином, у протилежність регулярним та кластерним ГЦД верхньою границею інтервала термостабільності аморфної ГЦД є не температура її розпаду на фази, а температура початку колапсу ЦМД, який відбувається внаслідок зменшення намагніченості насичення з температурою.

Нижньою границею оборотнього змінення параметрів аморфної ГЦД є також температура початку колапсу поодиноких ЦМД, який у цьому випадку вже відбувається завдяки зростанню характеристичної довжини плівки з охолодженням. Показано, що при зниженні температури плівки спочатку повинні колапсувати домени найменшого діаметру, а при подальшому охолодженні у цей процес втягуються ЦМД із більшими діаметрами. Таким чином, в аморфних ГЦД при зміні температури не відбувається стрибкоподібних фазових переходів, які характерні для гексагональних ґраток.

Шляхом мінімізації феноменологічного виразу для вільної енергії ґратки доменів знайдено умови, при яких аморфні ґратки існують як рівноважні: а) температура плівки приблизно дорівнює точці Нееля або точці компенсації; б) товщина плівки не перевищує  $\sim 10^3$  моношарів. Для опису процесів упорядкування та "плавлення" ґратки ЦМД запропоновано модель, в якій збурення, що створені осцилюючим магнітним полем, виконують роль ефективної температури. Методами нерівноважної термодинаміки знайдено час релаксації нерегулярної ґратки доменів до стану з рівноважним числом дефектів та показано, що він є прямо пропорційний числу доменів у структурі та обернено пропорційний ефективній температурі ДС. Розраховано ефективну температуру "плавлення" гексагональної ГЦД:

$$\tilde{T}_m = 0.024(4\pi M_s)^2 d^4 h^2 \rho^{3/2}, \quad (4)$$

де  $\rho$  - число ЦМД на одиницю площі плівки. З (4), зокрема, впливає, що плавлення ГЦД, яка знаходиться під впливом змінного магнітного

поля або іншого зовнішнього фактору, який створює шум флуктуацій, може бути досягнуто одним з таких способів: а) збільшенням амплітуди поля; б) зменшенням  $M_s(T)$  шляхом підвищення температури плівки або її зниження (останнє можливо при наявності точки компенсації); в) зменшенням діаметру домена, наприклад, збільшенням поля зміщення; г) зменшенням густини ґратки, що можливо при температурному або польовому колапсу частини доменів.

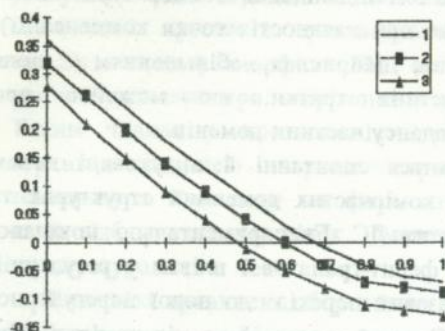
В четвертій главі досліджуються спонтанні й індуковані полем фазові переходи у регулярних комірчастих доменних структурах та еволюція нерегулярних комірчастих ДС. Експериментально показано, що із збільшенням температури ферит-гранатової плівки у регулярній комірчастій ДС відбувається фазовий перехід до нової нерегулярної комірчастої структури, яка має більший середній розмір комірки. Цей перехід супроводжується співіснуванням двох фаз комірчастої структури. Для регулярних комірчастих ДС, сформованих у плівках феритів-гранатів, отримано експериментальні фазові діаграми густина - температура і поле - температура.

Розраховано хімічний потенціал домену і магнітостатичний тиск комірчастої ДС як функції напруженості ефективного магнітного поля зміщення  $\tilde{H} = H / 4\pi M_s(T)$ :

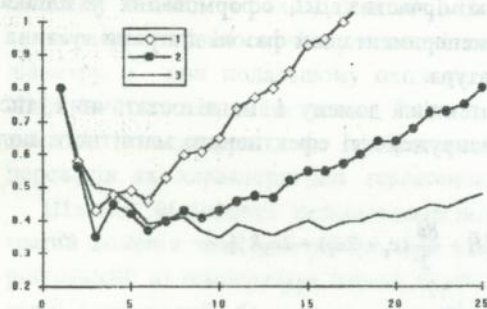
$$\mu = 4\pi M_s^2 h \sqrt{3} [4lh - 4R^2 \tilde{H} - \frac{Ra}{2} (c_1 + 2c_2) + 2c_2 R^2], \quad (5)$$

$$P = 4\pi M_s^2 [(c_1 + 2c_2) \frac{R}{a} - 2\tilde{H} - (c_1 + c_2)], \quad (6)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  - чисельні сталі. Аналіз залежності  $\mu(\tilde{H})$  показує, що із зростанням  $T$  при  $H = const$  або із збільшенням  $H$  при  $T = const$  хімпотенціал (5) монотонно зростає, залишаючись додатною величиною. Це указує на можливість у системі такого переходу, при якому повне число комірчастих доменів повинно зменшуватися. Встановлено, що умовою переходу у регулярній комірчастій ДС, який приводить до стрибкоподібного зменшення густини доменів, є умова обертання на ноль магнітостатичного тиску структури  $P(\tilde{H}) \leq 0$ . На основі (6) розраховано залежності  $P(\tilde{H})$  для ДС із різною густиною доменів (мал.3).

$P / 4\pi M_s^2$ 

Мал.3. Залежність тиску комірчастої ДС від напруженості ефективного поля зміщення для ДС різної густини: 1-  $n=1000$   $\text{мм}^{-2}$ ; 2-  $n=3000$   $\text{мм}^{-2}$ ; 3-  $n=7000$   $\text{мм}^{-2}$ .

 $H/4\pi M_s$  $W / 2\pi M_s^2$ 

Мал.4. Густина енергії розмагніченої хвилеподібної ДС як функція амплітуди згинів ДМ для різних  $\lambda/h$ : 1-  $\lambda/h=4$ ; 2-  $\lambda/h=8$ ; 3-  $\lambda/h=16$  ( $l/h=0.1$ ,  $r/h=7.0$ ).

 $A/h$ 

Механізм стрибкоподібного переходу до комірчастої ДС меншої густини складається з наступного. Із зростанням температури або поля зміщення (в обох випадках зростає  $\tilde{H}$ ), коли  $\tilde{H}$  досягає певної критичної величини, що залежить від початкової густини комірчастої ДС (див. мал.3), тиск ДС обертається на ноль і далі стає від'ємним. Однак у вихідній структурі, як правило, є в наявності дефекти - області комірчастих доменів з великими розмірами (відповідно з меншою локальною густиною структури), які і являють собою зародки нової доменної фази. Ці зародки отримують можливість лавиноподібного зростання в момент, коли тиск оточуючої їх структури стає від'ємним, оскільки  $P(n_2) > 0$ , якщо  $n_2 < n_1$  і  $P(\tilde{H}, n_1) = 0$  (див. мал.3). Отримано прямий експериментальний доказ справедливості умови

$P(\dot{H}) = 0$ , як умови стрибкоподібного переходу в регулярних комірчастих ДС. З використанням цієї умови розраховано фазові діаграми регулярних комірчастих ДС та проведено їх порівняння з експериментальними діаграмами. Проявлювання скейлінгу, що спостерігаються (подоби в еволюції комірчастих доменних структур, що відрізняються розмірами комірки та періодом структури, але мають однакові відношення  $R/a$ ), безпосередньо впливають з виразу магнітостатичного тиску ( $\beta$ ) та вищезгаданої умови переходу.

Для нерегулярних комірчастих ДС, котрі із збільшенням поля або температури переходять у монодомений стан шляхом безперервного укрупнення комірок, розраховано криві намагнічування і статична сприйнятливості доменних меж. Показано, що цікавою особливістю такого переходу в монодоменність є те, що як і у випадку зростання температури (при  $H=const$ ), так і у випадку збільшення напруженості магнітного поля (при  $T=const$ ) відбувається однакоє зростання відносної величини намагніченості зразка ( $m=M/M_s$ ), якщо остання виражається як функція напруженості ефективного поля.

У п'ятій главі вивчаються спонтанні переходи від смугової до хвилеподібної доменної структури та переходи між хвилеподібними ДС із різними параметрами. Експериментально показано, що перехід від смугової до хвилеподібної ДС супроводжується стрибкоподібним зменшенням періоду структури і відбувається шляхом зростання зародків нової фази - хвилеподібних доменів на дислокаціях, які були присутні у вихідній смуговій ДС.

Розраховано залежність магнітостатичного тиску смугової доменної структури (СДС) від її періоду, і на основі цієї залежності запропановано механізм утворення і зростання зародків фази хвилеподібних доменів. Розв'язано магнітостатичну задачу розрахунку енергії системи хвилеподібних доменів, які мають синусоїдну форму доменних меж. При цьому як параметри, що характеризують хвилеподібну доменну структуру (ХДС), обрано амплітуду ( $A$ ) і період згинів доменних меж ( $\lambda$ ), ширину домену ( $a$ ) та період доменної структури ( $p$ ). Отримані точні та наближені (усереднені за  $\lambda$ ) вирази для густини повної енергії хвилеподібної структури. Наближений

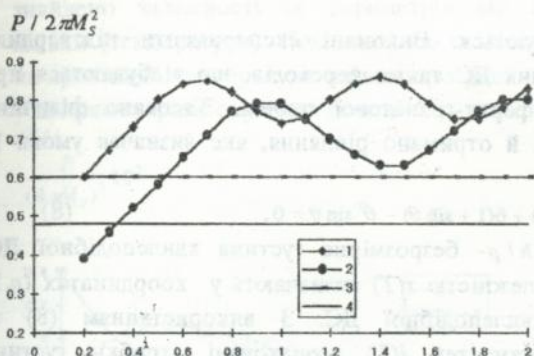
вираз для густини енергії плівки із розмагніченою ( $a=p/2$ ) хвилеподібною ДС має вид:

$$\frac{W}{2\pi M_s^2} = \frac{4l}{zh} + C_1 z + \frac{z^2}{x} (C_2 + C_3 \sin 4\pi \frac{x}{z} - C_4 \sin^3 4\pi \frac{x}{z}), \quad (7)$$

де  $z=p/h$ ,  $x=A/h$ ,  $C_1 = \frac{2}{\pi^3}$ ,  $C_2 = \frac{82}{81\pi^5}$ ,  $C_3 = \frac{84}{81\pi^5}$ ,  $C_4 = \frac{4}{81\pi^5}$ .

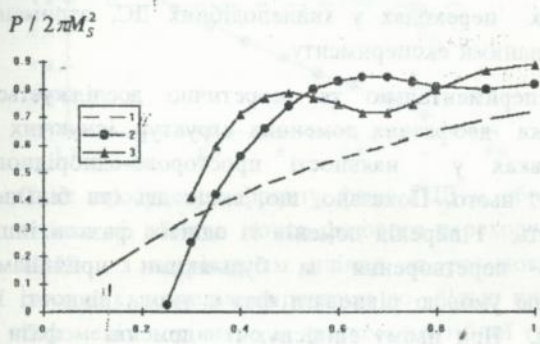
Шляхом мінімізації (7) знайдено рівноважні період структури та амплітуду згинів доменних меж. Показано, що рівноважна хвилеподібна ДС має меншу енергію, ніж рівноважна система плоскопаралельних доменів, що пояснює можливість спонтанних переходів від смугової до хвилеподібної ДС. Виявлено існування топологічних *фрустрацій* у системі хвилеподібних доменів - великого числа локальних енергетичних мінімумів однакової глибини (багатодолинний рельєф) на залежності енергії розмагніченої хвилеподібної ДС від амплітуди згинів її доменних меж (див. вираз для енергії (7) та мал.4). Саме це і є причиною температурного та польового гістерезису у змінні параметрів хвилеподібних та схожих до них лабіринтних ДС, який спостерігається у магнітом'яких плівках. До того ж, як це витікає із розрахунків, наведених на мал.4, величина напруженості магнітного поля, необхідного для подолання енергетичних бар'єрів поміж двох станів хвилеподібної структури з різними амплітудами згинів ДМ, на 1-2 порядку перевищує поле коерцитивності, що знаходиться у задовільному узгодженні з експериментальними даними.

Розраховано магнітостатичний тиск ( $P$ ) розмагніченої хвилеподібної ДС як функцію амплітуди згинів ДМ (мал.5) і густини доменів (мал.6). Як випливає з мал.5, тиск зародка фази хвилеподібних доменів перевищує тиск смугової ДС, якщо амплітуда згинів ДМ перевищує певну критичну величину, що залежить від густини вихідної ДС. Тому смугова ДС при збільшенні температури ( $A(T) \sim 1/l(T)$ ) випробує нестійкість відносно збурлень форми ДМ, які мають скінченну амплітуду згинів. Джерелом збурлень форми ДМ є дислокації, присутні у смуговій ДС, що визначають період згинів ДМ (для дислокації одиничної потужності  $\lambda=4p$ ). Однак зростання таких зародків фази хвилеподібних доменів стає можливим при досягненні температури, яка визначається умовою  $R_{дс}(T) \geq P_{дс}(T)$  (див. мал.5 та мал.6).



Мал.5. Залежності тиску ХДС від амплітуди згинів ДМ при різних густинах доменів: 1-  $\bar{n}=0.7$ , 2-  $\bar{n}=0.5$ . Криві 3 та 4 - тиск СДС з  $\bar{n}=0.7$  та  $\bar{n}=0.5$ , відповідно.

$A/h$



Мал.6. Залежність тиску СДС (крива 1) і ХДС (криві 2 і 3) від лінійної густини доменів. Крива 2 для  $A/h=3/4$ , крива 3 для  $A/h=1$ .

При цьому початково зародок нової фази зростає від ядра дислокації у напрямку, перпендикулярному напрямку доменних меж у СДС, а при досягненні амплітудою згинів меж величини  $A(T) \approx p$  відбувається просування фази хвилеподібних доменів уздовж ДМ. Розраховано залежності хімічного потенціалу домену у смуговій ( $\mu_1$ ) та хвилеподібній ( $\mu_2$ ) структурах від їх густини та показано, що перехід СДС-ХДС може носити характер бінодального розпаду, тобто  $\mu_1 = \mu_2$  є умовою переходу.

Немонотонний характер залежності тиску хвилеподібної ДС від її густини (мал.6) означає, що для деяких інтервалів густини структури не виконується умова термодинамічної стійкості  $dP/dn > 0$ . На цій основі передбачено можливість каскаду послідовних спонтанних переходів поміж станами хвилеподібної ДС із періодом структури та амплітудою

згинів ДМ, які зменшуються. Виконані експерименти підтвердили існування у хвилеподібних ДС таких переходів, що відбуваються при зростанні температури ферит-гранатової плівки. З'ясовано фізичний механізм цих переходів, й отримано рівняння, яке визначає умови їх здійснення:

$$\theta(\pi - 4 \cos \theta) + 6(1 + \sin \theta) - \theta^2 \sin \theta = 0, \quad (8)$$

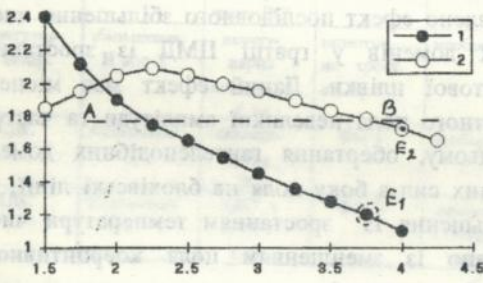
де  $\theta(T) = 4\pi x(T)\bar{n}$  и  $\bar{n} = h/p$  - безрозмірна густина хвилеподібної ДС. Рішення (8) разом із залежністю  $x(T)$  визначають у координатах  $(n, T)$  рівняння спінодалей хвилеподібної ДС. З використанням (8) та експериментальних залежностей  $l(T)$  розраховані стрибки густини доменів при спонтанних переходах у хвилеподібних ДС, отримано задовільне узгодження з даними експерименту.

У шостій главі експериментально та теоретично досліджується термодинамічна поведінка двофазних доменних структур, існуючих у тонких магнітних плівках у наявності просторово-однорідного магнітного поля або без нього. Показано, що, якщо дві (чи більше) доменні фази співіснують, і перехід доменів із однієї фази в іншу шляхом їх взаємного перетворення за будь-якими причинами неможливий, тоді єдиною умовою рівноваги фаз є умова рівності їх магнітостатичних тисків. При цьому співіснуючі доменні фази є метастабільними, тобто мають параметри, що відрізняються від параметрів рівноважних структур того ж типу. Наприклад, на мал.7 наведено залежності тисків СДС та ГЦД від їх періодів, де точками  $E_1$  та  $E_2$  відмічено значення рівноважних періодів відповідних структур (для плівки з  $l/h=0.175$ ). Як видно з цього малюнку, співіснування СДС та ГЦД можливо, якщо їх періоди відповідають точкам перетинання будь-якої прямої постійного тиску АВ з кривими 1 та 2, однак значення цих періодів можуть істотно відрізнятись від рівноважних.

Із зміненням температури або зовнішнього магнітного поля міжфазна межа може зміщуватися у напрямку однієї з доменних фаз так, щоб відновити баланс тисків між ними. З точки зору виконання умови рівності тисків співіснуючих доменних фаз досліджено поведінку наступних двофазних структур: ґратки ЦМД та смугової ДС, ґратки ЦМД та страйпів скінченної довжини, ґратки ЦМД та спіральних доменів. Зокрема, для співіснуючих ґратки ЦМД та смугової ДС

знайдено залежності їх параметрів від характеристичної довжини плівки (температури). Показано, що співіснуючі ГЦД та СДС реагують на зростання температури плівки просуненням міжфазної межі від ГЦД у напрямку фази смугових доменів.

$$\frac{P}{(4\pi M_s)^2} 10^2$$



Мал.7. Залежність тиску СДС (крива 1) та тиску ГЦД (крива 2) від періоду структури.

Таке просунення фронту фази ГЦД є оборотним, якщо температура плівки не досягає точки фазового переходу у ГЦД. Розширення ґратки ЦМД з нагріванням плівки за рахунок площі, яку займає фаза смугових доменів, спричиняє до більш швидкого зростання діаметрів її доменів порівняно із ґраткою постійної густини і, як наслідок цього, до зниження температури фазового переходу в ГЦД.

У температурному інтервалі, де змінення намагніченості плівки відбувається значно швидше, ніж змінення її характеристичної довжини, можливо співіснування фази ГЦД і фази страйпів скінченної довжини. При цьому тиск ГЦД зрівноважується постійним поздовжнім тиском страйпів. Показано, що фаза ГЦД, яка знаходиться під постійним зовнішнім тиском, при нагріванні плівки стискається, тобто має від'ємний коефіцієнт теплового розширення. Змінення об'єму такої ГЦД із температурою є оборотними, і цим пояснюється оборотність температурних змінень у двофазних структурах, які утворюються з кластерних ґраток ЦМД.

У плівках залізо-ітрієвого гранату виявлено перехід від нерівноважного стану - фази смугових доменів з малим періодом - до рівноважної фази хвилеподібних доменів з більшим періодом. Указаний

перехід відбувається після вимкнення зовнішнього магнітного поля й виявляється як ефект магнітної післядії. Показано, що в процесі переходу рух міжфазної межі відбувається під впливом різниці магнітостатичних тисків доменних фаз. Запропоновано модель двофазної ДС, яка існує при такому переході, та розраховано час післядії, який виявився обернено пропорційним різниці періодів змінюючих одна одну доменних фаз.

Експериментально виявлено ефект послідовного збільшення числа обертових гантелеподібних доменів у ґратці ЦМД із зростанням температури ферит-гранатової плівки. Даний ефект має місце у присутності змінного магнітного поля невеликої амплітуди та частоти  $\nu=(400\div 1000)$  Гц. При цьому, обертання гантелеподібних доменів пояснюється дією гіротропних сил з боку поля на блохівські лінії, що містяться в їх ДМ, а збільшення із зростанням температури числа обертових доменів пов'язано із зменшенням поля коерцитивності доменних меж і зростанням їх рухомості.

У заключенні формулюються основні закономірності еволюції доменних структур тонких магнітних плівок (див. таблицю 1), аналізуються особливості фазових переходів у доменних структурах та наводяться головні висновки і результати дисертаційної роботи.

**Таблиця 1. Основні закономірності еволюції доменних структур тонких одноосьових магнітних плівок.**

Початкова ДС	Змінення зовнішнього параметру	Нова доменна фаза	Тип еволюції	Характер переходу	Стрибки	Змінення симетрії	Число доменів
гексагональна ПЦД	збільшення T	ПЦД+ +страйпи	ФП I	необорот.	питомий об'єм $\Delta v < 0$ намагнітч.	незмінна: гексаг. → гексаг.	$N = \text{const}$
гексагональна ПЦД	зменшення T	ПЦД'	ФП I	необорот.	питомий об'єм $\Delta v > 0$ намагнітч.	гексаг. → гексаг.	$N \downarrow$
кластерна ПЦД	збільшення T	ПЦД+ +страйпи	безперервне змінення d та a	оборотн.	-	незмінна	$N = \text{const}$

аморфна ПЦД	збільшення Т	аморфна ПЦД	безперервне збільшення $d(T)$	оборот. (до поч. колапсу)	-	незмінна	$N = \text{const}$ , $N \downarrow$ з початк. колапсу
аморфна ПЦД	зменшення Т	ПЦД	безперервне зменшен. $d(T)$	оборот. (до поч. колапсу)	-	незмінна	$N \downarrow$
регулярна комірчаста ДС	збільшення Н або Т	нерегулярна комірчаста ДС'	ФП I	необорот.	питомий об'єм $\Delta v > 0$ намагніч.	підвищується: гекс. $\rightarrow$ аморф.	$N \downarrow$
нерегулярна комір. ДС	збільшення Н або Т	нерегулярна комірч. з $a' > a$	монотонне зрост. $a$ і $R$	необорот.	-	незмінна	$N \downarrow$
СДС	збільшення Т	хвилеподібна ДС	ФП I	необорот.	-	підвищується	$N = \text{const}$
ХДС	збільшення Т	ХДС' з $A' < A$ і $\lambda' < \lambda$	ФП I	оборотн. з гістерезисом	$\Delta v < 0$	підвищується	$N = \text{const}$

### Основні результати роботи.

1. Розроблено *термодинамічний підхід*, який оснований на введенні понять хімічного потенціалу домена, тиску доменної структури, ефективної температури ДС та її ентропії, що дозволяє з єдиної точки зору описувати різноманітність фазових перетворень у квазірегулярних магнітних доменних структурах одноосьових плівок. З використанням цього підходу встановлено загальний вигляд фазових діаграм для ДС різних типів та показано, що положення ліній переходів на фазових діаграмах визначається початковими параметрами ДС, магнітними параметрами плівки та швидкістю їх змінювання з температурою.
2. Установлено *загальні закономірності* еволюції доменних структур тонких одноосьових магнітних плівок, яка є результатом квазістатичного змінювання температури або магнітного поля: безперервна еволюція аморфних ДС; фазові переходи першого роду у регулярних ДС, які супроводжуються термодинамічно рівноважним співіснуванням фаз; дестабілізація метастабільних ДС шляхом колапсу,

змінювання розмірів або форми доменів; утворювання й зростання на дефектах початкової структури зародків нової доменної фази.

3. З'ясовано, що провідну роль у механізмах спонтанних фазових переходів у доменних структурах грає *магнітостатичний тиск ДС*, який є функцією розмірів доменів і змінюється разом із зміною температури або магнітного поля. Саме змінюванням магнітостатичного тиску ДС керуються процеси утворення та зростання зародків нової доменної фази або їх блокування, визначаються температури фазових переходів, умови співіснування доменних фаз та проявлення скейлінгу.

4. Виявлено існування *топологічних фрустрацій* у системі хвилеподібних доменів, пов'язаних з тим, що енергія хвилеподібної доменної структури як функція амплитуди згинів її доменних меж має велику кількість локальних мінімумів однакової глибини, які розділені бар'єрами і відповідають квазірівноважним станам системи, які відрізняються одне від одного. Показано, що багатодолінність рельєфу енергії хвилеподібних ДС є причиною гістерезисних явищ, які спостерігаються у хвилеподібних та аналогічних до них лабіринтних доменних структурах при змінненні температури або магнітного поля.

5. Вперше здійснено експериментальні та теоретичні дослідження стійкості двофазних доменних структур магнітних плівок. Установлено, що в просторово-однорідному магнітному полі зміщення доменні структури різних типів можуть співіснувати як *метастабільні* доменні фази, котрі при змінненні температури плівки або магнітного поля можуть оборотнім чином змінювати свій період та розміри доменів. Показано, що взаємний вплив співіснуючих доменних фаз магнітної плівки проявляється у змінненні температури спонтанного переходу у кожній з ДС, а зміщення міжфазної межі є оборотнім в інтервалі температур між точками фазових переходів у співіснуючих структурах.

6. *Виявлено новий ефект* - обертання гантелесподібних доменів (dumbbells) у ґратках ЦМД (що утворені з співіснуючих спіральних та циліндричних доменів та знаходяться під впливом змінного магнітного поля), в яке при збільшенні температури плівки послідовно утягуються інші гантелеподібні домени, що раніше були нерухомими при температурі формування ДС.

7. Установлено, що нееквівалентність механізмів спонтанних фазових переходів, які відбуваються у доменних структурах при нагріванні та охолодженні плівки, є *причиною температурного магнітного гістерезису*, який спостерігається у магнітом'яких плівках.

8. Вперше показано, що *непорядок* у системі доменів тонкої плівки може мати різну природу. Перший тип непорядка, характерний для плівок мікронної товщини, обумовлений тим, що аморфні ДС існують як заморожені та можуть бути упорядковані дією змінного магнітного поля невеликої амплітуди, яке грає роль ефективної температури ДС. Другий тип непорядка може виникати у ДС ультратонких плівок, коли енергія термічних флуктуацій у системі доменів одного порядку з енергією взаємодії доменів. В цьому випадку аморфні ДС існують як рівноважні, а число дефектів, що містяться у них, зростає з температурою. І, нарешті, третій та найбільш цікавий тип непорядка - це непорядок, пов'язаний з фрустраціями у системі доменів. Такі топологічні фрустрації виникають у системі зігнутих доменів або у системі доменних меж нерегулярної комірчастої ДС, і вони істотно змінюють термодинамічну поведінку системи. Отак, у системі хвилеподібних доменів є можливість здійснення каскаду послідовних переходів поміж станами, що відрізняються амплітудою згинів доменних меж.

#### **Основні результати дисертації опубліковано у роботах:**

1. Заблоцкий В.А., Завадский Э.А., Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А. Температурная устойчивость гексагональных решеток ЦМД // Докл. АН УССР.- 1986. Сер.А.- № 11.-С.49-52.

2. Толпыго К.Б., Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А. Влияние флуктуаций на устойчивость РЦД // Докл. АН УССР.- 1987. Сер.А.- № 4.-С.74-76.

3. Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А. Влияние магнитного поля на плотность и стабильность решеток цилиндрических магнитных доменов // УФЖ.- 1988.- 33, №3.- С.403-406.

4. Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А. Температурная зависимость параметров решеток ЦМД в пленках ферритов-гранатов // Физика твердого тела, изд. ХГУ. -1989.- в.19.- С.63-68.

5. Zavadskii E.A., Zablotskii V.A. Phase transition in magnetic bubble lattices // *Phys. Stat. Sol.(a)*.- 1989.-112.- P.145-153.
6. Мамалуй Ю.А., Заблоцкий В.А. Изменение термодинамических параметров РЦД с температурой и полем // *Физика твердого тела*, изд. ХГУ.- 1990.- в.20.- С.61-65.
7. Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А. Интервал термостабильности решеток цилиндрических магнитных доменов // *УФЖ*.- 1990.- 35, №3.- С.425-430.
8. Дубовик А.А., Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А. Фазовые переходы в кластерных и аморфных ЦМД-структурах// *ФТВД* -1992.-2,№2.-С.12-17.
9. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A., Lamonova K.V. Mechanism of temperature-induced transitions between stripe and undulation domain structures // *Phys. Stat. Sol.(b)*.- 1992.- 170. - P.309-312.
10. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A., Siryuk Yu.A. Film-cooling-induced phase transitions in magnetic bubble lattices // *J. Phys.: Condens. Matter*. - 1992. - 4. - P. 2623 - 2627.
11. Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Магнитостатическое давление и его роль в механизме фазовых переходов в ячеистых доменных структурах// *ФТВД*.- 1993.- 3, № 4.-С.5-16.
12. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A. Temperature-induced changes of cluster bubble domain lattices in ferrite-garnet films // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* -1994.- 27. -P.587-590.
13. Zablotskii V.A., Lamonova K.V., Metlov K.L. Energy of undulation domain structure // *IEEE Trans. Magn.* - 1994.-30, N2.- P.815-817.
14. Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А. Фазовые диаграммы ячеистой магнитной доменной структуры // *ФТВД*.- 1994.- 4, № 1.-С.37-42.
15. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A., Metlov K.L. Thermodynamics of two-dimensional cellular domain structures // *IEEE Trans. Magn.* - 1994.-30, N2.- P.812-815.
16. Zablotskii V., Kirbitov V., Mezin N., Soika E. A magnetic after-effect as transition between two domain phases of garnet film // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* -1995.- 28. -P.1-3.
17. Zablotskii V.A., Lamonova K.V., Mamalui Yu.A. Nucleation mechanism of new domain phase at the transition between stripe and undulation domains // *J. Magn. Magn. Mater.*- 1995.- 145.- P.195-197.

18. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A. Ordering and melting of domain lattices in thin magnetic films // J. Phys.: Condens. Matter. -1995.- 7.- P.5271-5274.
19. Zablotskii V.A., Lamonova K.V., Mamalui Yu.A. Frustrations in the system of bent domains of a thin magnetic film // Physica B.- 1995.- 205.- P.371-378.
20. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A. Thermostability of amorphous bubble lattices in garnet films// J. Magn. Magn. Mater.- 1995.- 146.- P.195-197.
21. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A. Coexistence of bubbles and stripe domains in thin magnetic films with perpendicular anisotropy // Modern Physics Letters B.- 1995.- 9, N 21.- P.1352-1359.
22. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A., Soika E.N. Magnetization curves of disordered cellular domain patterns in thin magnetic films // Phys. Stat. Sol.(b).- 1996.- 193.- P.471-476.
23. Заблоцкий В.А., Мамалуй Ю.А., Сирюк Ю.А. Фазовые превращения в решетках цилиндрических магнитных доменов // Препринт ДовФТИ АН УССР.- 89-8.- 1989.- 34с.
24. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A. Domain structure disorder in thin magnetic films // Intern. Conf. on Magnetism, 22-26 Aug. 1994, Warsaw, - P.160.
25. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A., Soika E.N. Temperature-induced changes of magnetic cellular domain structures in thin films // 6th European Magn. Mater. and Appl. Conference, 4-8 Sept. 1995, Wien, - P.189.
26. Zablotskii V.A., Mamalui Yu.A. Two-phase domain structures in uniaxial garnet films // 6th European Magn. Mater. and Appl. Conference, 4-8 Sept. 1995, Wien, - P.194.
27. Zablotskii V.A., Metlov K.L., Tomas I., Vertesy G. On temperature dependence of domain wall coercivity of uniaxial garnet films // 9th Czech and Slovak Conference on Magnetism, 28-30 Aug., Kosice, Slovakia.- 1995.- 3p-32.

Заблоцкий В.А. Спонтанные фазовые переходы в доменных структурах тонких одноосных магнитных пленок.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11- физика магнитных явлений (рукопись). Донецкий физико-технический институт НАН Украины, Донецк, 1996. Защищается 39 научных работ, которые содержат экспериментальные и теоретические исследования спонтанных фазовых превращений в доменных структурах магнитоодноосных пленок. Обнаружен и исследован ряд индуцированных изменением температуры пленки фазовых переходов в магнитных доменных структурах. Разработан термодинамический подход, позволяющий с единой точки зрения описывать как спонтанные и индуцируемые полем фазовые переходы в квазирегулярных доменных структурах, так и эволюцию нерегулярных структур одноосных магнитных пленок.

*Ключевые слова:* тонкая магнитная пленка, доменная структура, намагниченность, температура, термодинамический потенциал, условия устойчивости, давление, дефект, зародыш новой фазы, фазовые переходы, гистерезис.

Zablotskii V.A. Spontaneous phase transitions in domain structures of thin uniaxial magnetic films. A thesis in the form of manuscript for the Doctor's Degree in Physics and Mathematics; the speciality 01.04.11 - Physics of Magnetic Phenomena. Donetsk Physical and Technical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk, 1996.

The thesis is based on 39 scientific printed works which contain experimental and theoretical studies of spontaneous phase transitions in domain structures of magnetic uniaxial films. In regular domain structures of ferrite-garnet films the spontaneous phase transitions were observed; their mechanisms and moving forces are investigated. A thermodynamical approach that allows one to describe spontaneous and field-induced phase transitions in regular domain structures as well as the evolution of disordered domain structures has been elaborated.

*Key words:* thin magnetic film, domain structure, magnetization, temperature, thermodynamic potential, stability conditions, pressure, nucleation centers, phase transition, hysteresis.

*Заблоцкий В.А.*

*Спонтанные фазовые переходы в доменных структурах  
тонких одноосных магнитных пленок*

01.04.11- магнетизм

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Подп. в печ. 21.02.96  
формат 60x84/16  
Усл. печ. л.

Бум. тип. №3  
Уч.-изд. л.

Офс. печ.  
Тираж 100 экз.  
Заказ 17/2

Отпечатано типография ПО " Чайка"  
Донецк, пр-т Театральный, 13.

