

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЗАГАЛЬНОЇ ТА ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ А.П.
Поліщук
“ ____ ” _____ 2020р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТР
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ 105 "ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ТА
НАНОМАТЕРІАЛИ"

**Тема: « Магнітна анізотропія двійникових мезомасштабних
тонких плівок Ni-Mn-Ga »**

Виконавець: студент групи ПФ-219М, Тихоненко Владислав
Олександрович

Керівник: доктор фізико-математичних наук Голуб Володимир
Олегович

Нормоконтролер: _____ Бородій Ірина
Олексіївна

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет: Аерокосмічний

Кафедра: загальної та прикладної фізики

Спеціальність 105 "Прикладна фізика та наноматеріали"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Поліщук А.П

« ___ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Тихоненка Владислава Олександровича

1. Тема роботи «Магнітна анізотропія двійникових мезомасштабних тонких плівок Ni-Mn-Ga» затверджена наказом ректора від від «25.09.2020» №1166/ст.

2. Термін виконання роботи «01» вересня 2020р. по «18» грудня 2020р.
3. Вихідні данні до роботи: магнітні та магніторезонансні характеристики епітаксіальних плівок NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладинки MgO (001).

4. Зміст пояснювальної записки: 1) Огляд літератури з питань структурних та магнітних властивостей Гейслерівських сплавів з магнітним ефектом пам'яті форми 2) Методика експериментальних досліджень структурних, магнітних та магніторезонансних властивостей тонких плівок 3) Аналіз результатів досліджень структурних, магнітних та магніторезонансних епітаксіальних плівок NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладинки MgO (001).

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстрованого) матеріалу: Графіки температурних та кутових залежностей магніторезонансних полів, структурні та магнітні данні.

6.Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Оглянути інформацію про епітаксіальні плівки NiMnGa	01.09.20-10.09.20	
2	Підготувати опис методики впливу мезоскопічної двійникової структури на магнітні та магніторезонансні характеристики епітаксіальних плівок NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладинки MgO (001).	11.09.20-29.09.20	
3	Провести дослідження методики впливу мезоскопічної двійникової структури на магнітні та магніторезонансні характеристики епітаксіальних плівок NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладинки MgO (001).	30.09.20-29.10.20	
4	Виконати аналіз даних впливу мезоскопічної двійникової структури на магнітні та магніторезонансні характеристики епітаксіальних плівок NiMnGa.	30.10.20-01.12.20	
5	Оформити дипломну роботу	02.12.20-09.12.20	

7. Консультація з окремого розділу:

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

8. Дата видачі завдання: «__» _____ 20__ р.

Керівник дипломної роботи _____

Завдання прийняв до виконання _____ Тихоненко Владислав

Олександрович

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Магнітна анізотропія двійникових мезомасштабних тонких плівок Ni-Mn-Ga»:

Об'єкт дослідження: епітаксціальні плівки NiMnGa, осаджені на монокристалічні підкладинки MgO (001), з мезоскопічною двійниковою структурою

Предмет дослідження: Вплив мезоскопічної двійникової структури на магнітні та магніторезонансні характеристики епітаксціальних плівок NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладинки MgO (001).

Мета дослідження: Встановити вплив мезоскопічної двійникової структури на магнітні та магніторезонансні характеристики епітаксціальних плівок NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладинки MgO (001).

Методи дослідження: Атомна силова та електронна скануюча мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз, магнітометрія, електронний спіновий магнітний резонанс.

Отримані результати та їх новизна: Вперше показано, що наявність нанодвійникової структур призводить до суттєвої модифікації магнітної анізотропію тонких плівок сплаву NiMnGa.

Значеність виконаної роботи та висновки: Одержані данні щодо до магнітних властивостей плівок Гейслерівських сплавів з ефектом пам'яті форми можуть бути використані для створення наноактуаторів, елементів систем твердотільних охолоджувачів, систем зберігання та обробки інформації. За результатами роботи можна зробити такі висновки:

1. Встановлено що коефіцієнт теплопровідності приймає різні значення від зміни масової частки наповнювач.
2. Встановлено що метод отримання полімерних мікро і – нанокомпозитів впливає на коефіцієнт теплопровідності.

Рекомендації по використанню: Результати магістерської роботи рекомендується використовувати під час проведення наукових досліджень та в практичній діяльності фахівців-фізиків.

Галузь застосування та ступінь впровадження матеріалів: Галуззю застосування результатів даної роботи є теплотехніка. Одержані дані можуть застосовуватися спеціалістами в сфері інженерії.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. Сплави з магнітним ефектом пам'яті форми.....	12
Висновки.....	16
РОЗДІЛ 2. Тонкі плівки та методи їх дослідження.....	17
Висновки.....	25
РОЗДІЛ 3. Методи отримання тонких плівок.....	26
3.1 Фізичні методи отримання тонких плівок.....	26
3.2 Хімічні методи отримання тонких плівок.....	31
Висновки.....	34
Розділ 4. Спектрометр.....	35
4.1. Блок генератора НВЧ.....	36
4.2 Резонаторна система.....	37
4.3 Магніт.....	37
4.4 Блок живлення резистивного магніту.....	38
4.5 Блок охолодження резистивного магніту і блоку живлення.....	39
4.6 Системний блок.....	40
4.7 Персональний комп'ютер.....	41

РОЗДІЛ 5 Магнітна анізотропія двійникових мезомасштабних тонких плівок Ni-Mn-Ga.....	41
5.1 Модель формування просторово-періодичної двійникової структури в епітаксціальних плівках.....	41
5.2 Експеримент.....	44
Висновки.....	56
Список використаної літератури.....	57

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

- FSMAs – сплави з феромагнітним ефектом пам'яті форми
- MetaMSMA – сплави з метамагнітним ефектом пам'яті форми
- АТМ – атомна силова мікроскопія
- ЕПР – електронний парамагнітний резонанс
- PVD – фізичне осадження пари
- CVD – хімічне осадження пари
- MBE – епітаксія молекулярного пучка
- ARE – активоване реактивне випаровування
- PMS – імпульсне магнетронне напилення
- LCVD – лазерне хімічне осадження пари
- PECVD – підсилене плазмою хімічне осадження пари
- ALD – імпульсне хімічне осадження пари
- EDX – енергодисперсна рентгенівська спектроскопія
- МП - магнітне поле
- ЯМР - ядерно-магнітний резонанс
- ЗМП - змінне магнітне поле
- ПМП - постійне магнітне поле
- ЕМП - електромагнітне поле
- РА - рентгеноструктурний аналіз
- РК - рентгенівські камери

ВСТУП

Сплави на основі NiMnGa з феромагнітним ефектом пам'яті форми типу Гейслера(FSMAs) знаходяться під інтенсивним дослідженням завдяки їх досить незвичним фізичним властивостям та потенційним застосуванням [1]. Історично інтерес до цих матеріалів був викликаний завдяки виявленню магнітного ефекту пам'яті форми, що полягає у різкій зміні розміру (до 12%) під впливом магнітного поля, внаслідок подвійного граничного руху в мартенситному стані [2, 3]. З того часу в цих матеріалах було виявлено ряд цікавих фізичних ефектів, таких як надпружність, звичайний та зворотний магнітокалоричний ефект, зміна зміщення тощо [4–7]. Деякі FSMAs матеріали мають високу спінову поляризацію електронів та найвужчу лінію магнітного резонансу серед магнітних металів, що робить їх дуже привабливими для застосування у спінтроніці та магноніці [7,8].

Сплави з феромагнітним ефектом пам'яті форми цікаві тим, що вони можуть демонструвати послідовності структурних перетворень (домартенситні, мартенситні та міжмартенситні), які можуть бути реалізовані в магнітно різних станах. Температура мартенситного перетворення першого порядку в деяких FSMAs сплавах може збігатися з температурою Кюрі аустеніту і, як наслідок, відбувається магнітоструктурне фазове перетворення першого порядку з парамагнітного аустеніту в феромагнітний мартенсит [9]. Такі магнітоструктурні фазові перетворення першого порядку

супроводжуються зміною намагніченості, завдяки чому їх можна легко викликати зовнішнім магнітним полем, що спричиняє гігантський магнітокалоричний ефект та аномальний ефект Холла [9, 10].

Порівняно з FSMA, сплави NiMn (Sn, In, Sb) з ефектом пам'яті форми, які іноді називаються сплавами з метамагнітним ефектом пам'яті форми (MetaMSMA), демонструють зовсім іншу магнітоструктурну фазову трансформацію з феромагнітного аустеніту в слабомагнітний або немагнітний мартенсит, який супроводжується величезною і різкою зміною намагніченості та ентропії [9]. Вони виявляють гігантський зворотний магнітокалоричний ефект при мартенситній трансформації, що робить їх перспективними для магнітного охолодження [2, 4, 11, 12]. Розрахунки з перших принципів продемонстрували, що між магнітними іонами в цих сплавах є взаємний вплив антиферомагнітних та феромагнітних обмінних взаємодій, що призводить до різких змін магнітних властивостей під час магнітоструктурного фазового переходу [13, 14]. Зокрема, мартенситна трансформація призводить до придушення феромагнетизму та зменшення намагніченості насичення. Нещодавно було показано, що в таких сплавах двійникова структура породжує нетривіальний магнітний стан, при якому співіснують феромагнітний обмін всередині компонентів-двійників та антиферомагнітний обмін через двійникові межі [15].

Структурні та магнітні властивості тонких плівок на основі NiMn з магнітним ефектом пам'яті форми можуть різко відрізнятись від властивостей об'ємних матеріалів. В основному це пов'язано зі взаємодією між плівкою та підкладкою. Ця взаємодія проявляється через внутрішні напруження, які з'являються внаслідок невідповідності між параметрами решіток плівки та підкладки (для епітаксціальних плівок) та / або через шорсткість поверхні або невідповідність термоеластичності (температурних коефіцієнтів розширення), тоді як у в об'ємному стані ці сплави зазвичай утворюються практично без

внутрішніх напружень. Вплив підкладки викликає значну якісну та кількісну модифікацію магнітної анізотропії у плівках [16-18]. Мартенситне перетворення (від кубічної аустенітної фази до мартенситного стану з нижчою кристалічною симетрією) у тонких плівках не може відбуватися без двійникування через необхідність збереження площі поверхні. Не всі варіанти двійників можуть бути сформовані у плівці. Типи варіантів, які можуть формуватися у плівках, їх розміри та концентрація, диктуються параметрами плівки та підкладки. У об'ємних матеріалах всі варіанти двійників можуть бути сформовані. Їх концентрація та розміри здебільшого залежать від передісторії зразка.

З іншого боку, двійники в плівках з магнітним ефектом пам'яті форми можуть використовуватися для формування макроскопічної періодичної структури, яка може бути використана, наприклад, в якості магнетного кристалу. Субмікронна періодична структура може бути створена без будь-якої літографії. Задавати період цієї структури можна, регулюючи склад та товщину плівки, а також матеріал підкладки.

РОЗДІЛ 1. Сплави з магнітним ефектом пам'яті форми

Усі сплави з ефектом пам'яті форми мають дві дуже чіткі кристалічні структури. Яка фаза присутня залежить від температури та величини напруги, що застосовується до цих зразків сплаву. Ці фази називаються мартенситом і існують при більш низьких температурах, тоді як аустеніт існує при більш високих температурах. Ефективність сплавів пам'яті фігур залежить від кількості кожної присутньої кристалічної фази. Дві унікальні властивості, описані нижче, стають можливими завдяки зміні фази твердого стану, яка є молекулярною перебудовою, що відбувається в сплаві з ефектом пам'яті форми.

Мартензит є відносно м'якою і легко деформується фазою сплаву і має ефект пам'яті форми, який існує при більш низьких температурах. На цій стадії молекулярна структура двійникується. Аустеніт - це сильніша фаза, яка відбувається при більш високих температурах. Структура фази аустеніту має кубічну форму. На макроскопічному рівні недеформована фаза мартенситу та кубічна фаза аустеніту мають однакову форму і розмір, тому до форми деформації мартенситної фази немає різниці у формі та розмірах структури.

Ефект пам'яті форми - це унікальна властивість деяких сплавів, які демонструють мартенситне перетворення. Хоча сплав деформується в низькотемпературній фазі, він все одно може набути початкової форми при нагріванні до критичної температури, званої температурою зворотного фазового переходу. Як правило, цей тип сплаву використовує комбінацію

нітинолу або нікелю титану. Сплави пам'яті форми мають ще одну унікальну особливість - надзвичайно еластичність при високих температурах. Це великий нелінійний регенеративний натяг, коли є навантаження, і початкова форма відновлюється, коли навантаження припиняється.

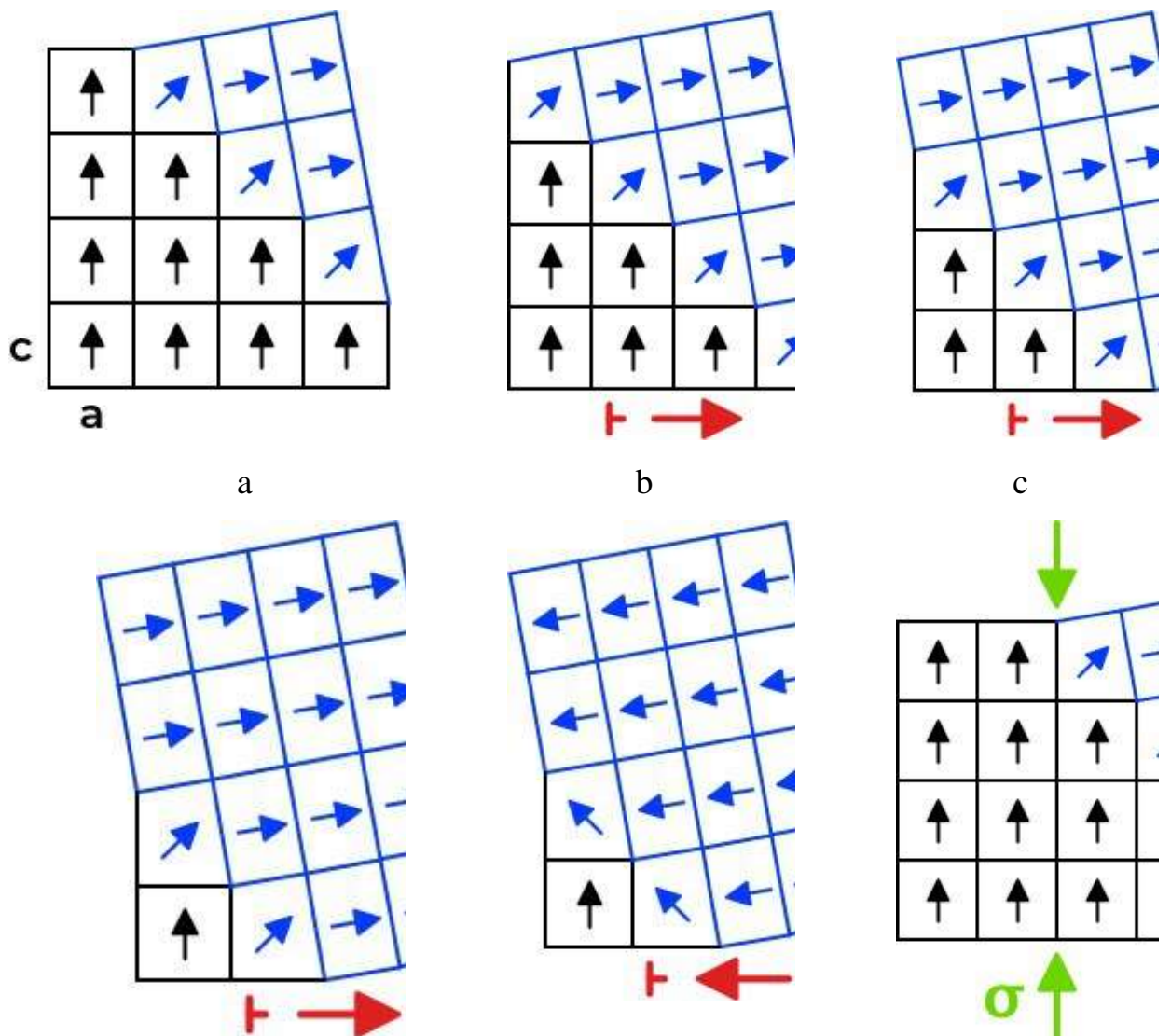
Фактичний механізм ефекту пам'яті фігури можна описати як оборотний, термоеластичний фазовий перехід між фазою аустеніту та фазою мартенситу. Коли матеріал у фазі аустеніту охолоджується нижче температури початку мартенситу (дві фази співіснують), відбувається зміна фази. Потім матеріал містить дві фази без зміни форми за допомогою механізму, який називається двійковим. У цей час, поки існує оригінальна кристалічна решітка аустеніту, утворюється решітчасте дзеркало. Після досягнення кінцевої температури мартенситу фазове перетворення завершується. Потім матеріал можна пластично деформувати в іншу форму. У цьому процесі деформації здвоєний мартенсит стає деформованим мартенситом. Матеріал залишається деформованим, поки не нагріється до температури, при якій починається аустеніт, після чого мартенсит починає перетворюватися назад в аустеніт. Нагрівання вище кінцевої температури аустеніту може повернути матеріалу первісну форму.

Сплави з ефектом пам'яті магнітної форми займають унікальне місце в розумних матеріалах. Завдяки їх використанню можна створювати пристрої, що мають ефект пам'яті форми при використанні традиційних немагнітних сплавів, робоча частота яких не може бути досягнута.

Розглянемо магнітно-індуковану переорієнтацію та магнітно-індукований мартенсит.

Вплив орієнтації магнітної індукції вимагає некубічних кристалічних структур та кристалографічних варіантів (здвоєні кристали) з різною орієнтацією, які з'єднані між собою високо рухливими подвійними межами. Сплав із ефектом запам'ятовування форми у фазі мартенситу з низькою температурою може відповідати цим двом вимогам. Крім того, матеріал повинен бути магнітним і мати високу магнітокристалічну

анізотропію. Коли застосовується зовнішнє магнітне поле, напрям намагнічування, паралельний зовнішньому магнітному полю, є енергетично вигідним. Однак висока магнітокристалічна анізотропія заважає намагнічуванню обертатися, що зазвичай відбувається в м'яких магнітних матеріалах. Натомість відбувається інший процес: зразок з оптичною віссю, орієнтованою паралельно зовнішньому полю, зростає завдяки сусіднім зразкам, що мають вісь намагніченості, орієнтовану перпендикулярно магнітному полю. Отже, намагніченість зразка вирівнюється паралельно зовнішньому магнітному полю, а загальна енергія системи у зовнішньому магнітному полі зменшується. Цей ефект називається переспрямуванням магнітної індукції . переорієнтацію (рис. 1).



d

e

f

Рисунок 1.1 Схематичне зображення ефекту магнітно-індукованої переорієнтації в сплаві з магнітним ефектом пам'яті форми. а) Два варіанти мартенситу розділені двійниковою межею. b-d) Зростання варіанту з легкою віссю, орієнтованою паралельно зовнішньому полю, за рахунок переміщення двійникової межі. е) Повернення поля від d до e змінило лише напрямок намагнічування без необхідності переорієнтації варіанту. f) Стискаюче напруження вирівнює коротку вісь і може бути використане для відновлення початкового стану а.

Макроскопічно спостережуваний подвійний межовий рух не вимагає колективного руху всіх атомів уздовж межі одночасно. Подібно до переміщення переміщення, основні кроки подвійного руху кордону можна описати комбінованим переміщенням ступенів та гвинт-дислокаціями, так званим "відключення".[19]

Під час переорієнтації магнітної індукції кристалічна структура не змінюється. Рух подвійного кордону лише частково впливає на напрямок кристала (текстуру). На відміну від сплавів з термічно активованим ефектом пам'яті форми, зміни фази не відбувається, тому ефект перенаправлення магнітної індукції може бути досягнутий на більш високих частотах до діапазону кГц .[20] В принципі, ефект перенаправлення магнітної індукції може бути використаний у всьому діапазоні температур магнітної мартенситної фази. Однак при дуже низьких температурах рухливість межі двійників може бути занадто низькою.

Висновки

Усі сплави з ефектом пам'яті форми мають дві дуже чіткі кристалічні структури. Яка фаза присутня залежить від температури та величини напруги, що застосовується до цих зразків сплаву. Ці фази називають мартенситом, який існує при нижчих температурах, і аустенітом, який існує при більш високих температурах. Ефективність сплавів пам'яті фігур залежить від кількості кожної присутньої кристалічної фази.

Фактичний механізм ефекту пам'яті фігури можна описати як оборотний, термоеластичний фазовий перехід між фазою аустеніту та фазою мартенситу.

Сплави з ефектом пам'яті магнітної форми займають унікальне місце в розумних матеріалах. Завдяки їх використанню ви можете створювати пристрої, що мають ефект пам'яті фігури при використанні традиційних немагнітних сплавів, робоча частота яких не може бути досягнута.

Сплави з ефектом пам'яті магнітної форми характеризуються впливом магнітно-індукованої переорієнтації та магнітно-індукованого мартенситу.

Дослідження та аналіз властивостей сплавів з магнітними ефектами пам'яті форми є важливими і сьогодні.

РОЗДІЛ 2. Тонкі плівки та методи їх дослідження

Плівка - це шар матеріалу, нанесений на тривимірну підкладку для надання їй властивостей, яких неможливо легко досягти (або зовсім неможливо) за допомогою твердих матеріалів.

У дуже тонких плівках поверхні плівки і підкладки настільки близькі одна до одної, що можуть суттєво впливати на внутрішні фізичні властивості та процеси в речовині. Зменшення відстані між поверхнями та зменшення взаємодії між плівкою та основою може призвести до абсолютно нових явищ. Зменшення розміру матеріалу до кількох атомних шарів може створити проміжну систему між макроскопічною системою та молекулярною системою, тим самим надаючи можливість вивчати мікроскопічні фізичні властивості різних процесів.

Є кілька причин, чому тонкі плівки привернули увагу фізиків, чому створена вся галузь фізики, яка спеціалізується на тонких плівках, і чому потрібно розробляти відповідні технічні галузі.

Неможливо конкретно відповісти на питання, якою є межа, в рамках якої плівки слід вважати «тонкими». Можна взагалі сказати, що межа визначається товщиною, при якій проявляються описані аномалії, але вона відрізняється для різних фізичних явищ. На практиці фізика та технологія тонких плівок мають справу з плівками розміром від десятих частин нанометра та декількох мікрометрів.

Отримання тонких плівок методом вакуумного осадження, тобто розпиленням катодів та вакуумним випаровуванням, є ще однією одиницею фізики та технології тонких плівок, яка з'явилася в середині XIX століття, але до недавнього часу не отримала значного розвитку.

У цей же період входили роботи Джаміна і Магнуса щодо конденсації пари і газу на твердих поверхнях, які продемонстрували важливість адсорбційної плівки та її взаємозв'язок з хімічними поверхневими процесами (такими як каталіз), а також роботи Фарадея та Юнга, які вивчали форму плівки хімічні та електрохімічні методи.

З початку цього століття, від вимірювання електропровідності до вивчення надпровідності та випромінювання тонкоплівкових електронів, активно вивчались електричні властивості тонких плівок. За останні роки ці дослідження досягли значного прогресу.

Під час і після Другої світової війни бурхливий розвиток електронних продуктів призвів до постійного зменшення розмірів електронного обладнання. Дослідження космосу стимулювало це, попит на складні електронні пристрої з високою надійністю, малими розмірами та невеликою вагою. У той же час відбулися значні зрушення в галузі медичної електроніки. Для цієї галузі електронних продуктів потрібні електронні пристрої, які можна розміщувати на поверхні тварин або людей, або електронні пристрої, які можна імплантувати для вимірювання, стимулювання та контролю різних життєвих процесів, коли це необхідно.

Розвиток технології виробництва активних напівпровідникових компонентів (тобто транзисторів, виготовлених з монокристалів германію та кремнію) призвело до виробництва інтегральних схем. Вони виробляються двома способами. Спочатку окремі компоненти виготовляються за допомогою загальної напівпровідникової технології, а потім вони з'єднуються між собою шляхом випаровування. У другому способі всі компоненти виготовлені з кристалів і з'єднані між собою через кристалічні матеріали із відповідно зміненою провідністю. На кристалічній поверхні є лише вихід і вхід системи.

Система може бути двоступеневим підсилювачем, ланцюгом відкидання тощо.

Використовуючи тонкі плівки, можна з'єднати не тільки окремі компоненти, але й самі активні та пасивні компоненти, що відкриває нові можливості для мініатюризації. Ці елементи використовують той факт, що один з розмірів майже дорівнює нулю (з макроскопічної точки зору), а товщина елемента визначається лише товщиною основи, на яку наноситься плівка.

Швидкий розвиток технології тонкої плівки та суворі вимоги до стабільності та відтворюваності в електронних додатках стимулювали розвиток основних досліджень у галузі фізики тонких плівок. Очевидно, що якщо розуміння основних законів формування плівок недостатнє, а взаємозв'язок з різними фізичними параметрами в процесі виробництва плівки та взаємозв'язок між їх механічними та електричними властивостями недостатні, він не зможе надійно задовольнити вимоги галузі навчання.

Електронний мікроскоп може не тільки вивчати морфологію плівки, але і безпосередньо спостерігати процес утворення плівки шляхом випаровування в полі зору. Девіссон і Гермер відкрили в 1927 р. Дифракцію електронів через хвильову природу електронів, що проходять через кристалічну решітку. Електронні хвилі послаблюють або посилюють одна одну відповідно до напрямку розповсюдження, тому, коли електрони потрапляють на екран або світлочутливу пластину, вони утворюють ряд світлих (якщо це чорна пластинка) плям. За їх положенням і міцністю можна визначити, чи є речовина аморфною, полікристалічною чи монокристалічною, а за необхідності можна визначити кристалічну решітку, яку вона має, та орієнтацію кристалічної решітки. Особливим випадком дифракції є дифракція електронів з низькою енергією. Основа двох явищ однакова. Єдина відмінність полягає в тому, що електрони з низькою енергією проникають лише через кілька атомних шарів глибини, тому вони лише надають інформацію про стан і структуру дуже

тонкого шару на поверхні зразка, тому він підходить для вивчення поверхневих процесів та характеристик.

Плівки мають ряд характеристик, на основі цих характеристик різні типи плівок можуть використовуватися в різних областях. Наприклад, оптичні плівки використовуються для виробництва відбивних або антивідбивних покриттів, сонячних панелей, дисплеїв, хвилеводів, фотодетекторних решіток і накопичувальних дисків; електричні або електронні плівки, що використовуються для виготовлення ізоляторів або провідників, напівпровідникових приладів, інтегральних схем, сонячних батарей Пластини та фотодетектори; хімічні плівки протистоять легуванню, дифузії, окисленню або корозії, а також датчики для газів і рідин; термоплівки утворюють бар'єри та радіатори.

Тому предмет фізико-технічних досліджень тонких плівок є і буде актуальним.

Розглянемо сучасний метод, за допомогою якого можна побачити поверхневу структуру плівки у трьох вимірах. Цей метод називається атомно-силовою мікроскопією (АТМ).

Атомно-силова мікроскопія (АТМ) - метод, за допомогою якого люди можуть бачити нанорозмірні форми поверхні в тривимірному просторі. За допомогою банкомату ви можете відображати всі матеріали - тверді або м'які, синтетичні або природні матеріали, незалежно від їх непрозорості або провідності. Зразок може знаходитись на повітрі або рідкому середовищі, іноді у вакуумі. Інформацію про морфологію поверхні неможливо отримати звичайним способом, а саме шляхом прямолінійного огляду, відбиття або тіні. У кожній точці або пікселі у двовимірному масиві над поверхнею використовується силовий зонд для вимірювання висоти поверхні. Отже, можна сказати, що атомно-силовий мікроскоп є своєрідним «сліпим мікроскопом», який у порівнянні з оптичним або електронним мікроскопом, по суті, використовує дотик для зображення поверхні. Коли зразок рухається

під зондом, силовий зонд може рухатися вище нерухомого зразка або залишатися нерухомим.

Оскільки зображення складається з чисел, що відповідають висоті, ви також можете виміряти відстань між вершинами, розрахувати стандартне відхилення висоти, побудувати графік висоти або розподілу нахилу та використовувати аналіз Фур'є для аналізу поверхні для виявлення періодичних компонентів (пульсація або решітка) або основна шкала довжини. Ці топографічні показники можуть відповідати технічним особливостям або біологічним функціям, будь то в мікроелектроніці (наприклад, шорсткість шару або розмір зерен під час осадження), трибології (наприклад, тертя головки зчитування жорсткого диска та стирання), полімерні медичні покриття (наприклад, площа поверхні контуру, що впливає на швидкість вивільнення препарату), медичні вироби в організмі (наприклад, форма поверхонь, що контактують з клітинами та тканинами), клітинні мембрани та поверхневі компоненти (наприклад, фосфоліпідні бішари, тіло) тощо.

Як атомно-силовий мікроскоп точно визначає локальну висоту поверхні? Торкніться поверхні гострим предметом і виміряйте необхідне для цього вертикальне або "Z" зміщення. Цей "контакт" може бути дуже тонким. Висота вимірюється опосередковано. У більшості конструкцій банкоматів гострий зонд прикріплений до гнучкого мікроконсолі (мікроплати), який згинається під дією сили. Мікроконсоль, яка згинається вгору або вниз, - це пружина, яка стискається або розтягується. Зазвичай вигин вимірюють, відбиваючи лазерний промінь від мікрокантилевера на окремий фотодіод (горизонтальний "край ножа"), і вихідний показник є мірою положення лазерної плями. Вертикальний рух зонда кількісно визначається вигином мікроконсолі. Горизонтальний рух лазерної плями (у вертикальному «краю ножа») можна використовувати для вимірювання бічної сили обертового зонда (для скручування мікроконсолі).

Ми також розглянемо рентгенівсько-дифракційний аналіз (РА), який використовується для вивчення структури різних типів об'єктів, включаючи тонкі плівки.

За допомогою РА можна ідентифікувати кристалічні речовини (фази речовин), щоб визначити розмір нанокристалів вимірюваної речовини та ступінь деформації кристалічної структури.

Рентгенівські зображення - це зображення предметів, які з'являються на світлочутливих матеріалах при взаємодії рентгенівських променів з речовиною. Коли об'єкт висвітлюється рентгенівським відбиттям, може відбутися поглинання або дифракція рентгенівських променів, а просторовий розподіл інтенсивності рентгенівського випромінювання також фіксується на рентгенівському знімку після взаємодії.

Основою рентгенівського дифракційного аналізу є явище дифракції рентгенівських променів на кристалічній решітці. Рентгенівський дифракційний аналіз проводиться за допомогою рентгенівського дифрактометра або рентгенівської камери, що дозволяє отримати швидкі та точні результати.

Рентгенівська камера (рентгенівська камера) використовується для вивчення або управління атомною структурою зразка шляхом запису зображення, яке з'являється під час дифракції рентгенівських променів на досліджуваному зразку на фотоплівці. РК-екран повинен забезпечувати умови рентгенівської дифракції (умови Брегга-Вольфа) та рентгенівські знімки.

Рентгенівський дифрактометр використовується для вимірювання інтенсивності та напрямку рентгенівських променів, дифракційних на кристалічному об'єкті. За допомогою рентгенівського дифрактометра ви можете: провести фазовий аналіз полікристалічних зразків; визначити орієнтацію монокристалічних блоків; дослідити текстури; отримати повний набір інтенсивності відбиття від монокристалів; вивчити структуру багатьох речовин за різних зовнішніх умов тощо.

Основним методом дифракційного аналізу рентгенівських променів є метод Дебая-Шеррера, при якому монохроматичний рентгенівський промінь направляється в полікристалічний зразок. Внаслідок інтерференції різних кристалів досліджуваної речовини або світла, відбитого від поверхні кристала, утворюється оглядовий конус, а оглядовий конус утворює на фотоплівці систему максимального дифракційного максимуму з різною інтенсивністю. Потім отримані таким чином рентгенограми обчислюються для отримання інформації про відстань між кристалічними площинами в кристалі. Значення відстані до кристалічної площини кожної речовини суворо незалежне, отже, рентгенографія може чітко характеризувати речовину, яку потрібно перевірити.

Рентгеноструктурний аналіз має багато переваг, серед яких: точність методу висока; можливість вивчати структуру речовини без руйнування зразка; метод є прямим, що дозволяє безпосередньо отримувати дані про структуру речовини.

Далі розглянемо технологію феромагнітного резонансу, яка може бути використана для тривимірного аналізу зразків та визначення динамічних властивостей магнітних матеріалів.

Основними типами резонансу є: ядерний магнітний резонанс, ядерний квадрупольний резонанс, електронний парамагнітний / спіновий резонанс, спін-хвильовий резонанс, феромагнітний резонанс, антиферомагнітний резонанс та електронно-спіновий резонанс. Феромагнітний резонанс є аналогом електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) та ядерно-магнітного резонансу (ЯМР).

Різниця між феромагнетиками та парамагнетиками полягає в тому, що вони мають спонтанне намагнічування, а при низьких температурах тильні сторони магнітних іонів орієнтовані паралельно в одному напрямку.

Різниця між феромагнітним резонансом та електронним парамагнітним резонансом полягає в тому, що у феромагнетиках загальний магнітний момент усіх магнітних іонів перетворюється навколо зовнішнього магнітного поля. У

цьому випадку, коли його власна частота дорівнює частоті прецесії, енергія зовнішнього магнітного поля, прикладена перпендикулярно до поверхні зразка, буде значно поглинена. Враховуючи, що відстань між енергетичними рівнями системи відповідає частоті Зеемана, для розгляду цього ефекту можна використовувати кількісні знання макровектору повного спіна S ферромагнетика в постійному магнітному полі. В області низьких температур ФМР квантові ефекти проявляються також у макроскопічному діапазоні.

Оскільки звичайні ферромагнетики мають велике спонтанне намагнічування, їх магнітно-резонансне поглинання не дуже велике. У цьому випадку поглинання магнітного резонансу прямо пропорційне магнітній сприйнятливості. У ферромагнетиках через обмінну взаємодію між електронами утворюється сильна магнітна анізотропія внутрішнього поля. Існує також анізотропія, яка пов'язана з формою зразка, оскільки магнітне поле ферромагнітного зразка порівнянне із зовнішнім магнітним полем за розміром.

- Основні особливості ферромагнітного резонансу включають:
- Поперечна складова магнітної сприйнятливості дуже велика;
- Важливість форми зразка;
- Резонансний спектр залежить від факторів розмагнічування;
- Через сильну обмінну взаємодію між електронами лінія ферромагнітного резонансу буде звужена, тим самим пригнічуючи взаємодію між спіном та коливанням решітки;
- Ефекти насичення спостерігаються при відносно низьких зовнішніх рівнях ЕРС;
- Спінова система ферромагнетиків дуже стійка.

Для вимірювання ферромагнітного резонансу можна використовувати наступні методи: 1) система на основі резонатора, в якій зразок поміщається в резонаторну порожнину, а мікрохвильове випромінювання опромінюється з фіксованою частотою під час сканування прикладеного постійного магнітного

поля в резонансному стані; 2) електричні вимірювання на основі смугових ліній та компланарних хвилеводів.

Висновки

Тонка плівка - це шар матеріалу, нанесений на тривимірну підкладку, щоб надати їй властивостей, яких нелегко досягти (або зовсім неможливо досягти) за допомогою твердих матеріалів.

У дуже тонких плівках поверхні плівки і підкладки настільки близькі одна до одної, що можуть суттєво впливати на внутрішні фізичні властивості та процеси в речовині. Зменшення відстані між поверхнями та зменшення взаємодії між плівкою та основою може призвести до абсолютно нових явищ. Зменшення розміру матеріалу лише до декількох атомних шарів може створити проміжну систему між макроскопічною системою та молекулярною системою, що дає можливість вивчати мікроскопічні фізичні властивості різних процесів.

РОЗДІЛ 3. Методи отримання тонких плівок

Спосіб отримання плівки визначає майже всі її характеристики, а також може бути використаний для зміни існуючих характеристик. Комбінація різних методів може бути використана для формування гібридного процесу осадження тонкої плівки.

Основною підгрупою методів опадів є фізичне осадження паром (PVD) та хімічне осадження паром (CVD). Ця пара є відмінною рисою між PVD та CVD. У PVD пара складається з атомів і молекул, просто конденсованих на підкладці, тоді як при CVD пара піддається хімічній реакції на підкладці, утворюючи тонку плівку.

3.1 Фізичні методи отримання тонких плівок

Фізичне осадження паром (PVD) - загальний термін, що використовується для кількісної оцінки процесу осадження тонкої плівки, який вимагає випаровування твердих речовин, які конденсуються на поверхні твердих матеріалів під частковим вакуумом.[25,26] PVD - це процес атомного

осадження, при якому атоми або молекули фізично розряджаються, і ці атоми конденсуються і зароджуються на підкладці через середовище низького тиску, газоподібне або плазмове середовище. Плазма або іони зазвичай є частиною газової фази. Іноді реактивні гази потрапляють у пари в процесі осадження. Цей процес називається реактивним осадженням. Атоми або молекули рухаються по поверхні підкладки у формі пари через вакуум, газоподібне середовище або плазму низького тиску для конденсації. Як правило, PVD-процес використовується для нанесення тонких плівок товщиною від декількох нанометрів до декількох тисяч нанометрів. Вони також можуть використовуватися в багат шарових покриттях.[27]

Кожен процес PVD проходить кілька основних етапів :

- Виробляють речовини в газовій фазі. Це вимагає випаровування, розпилення або випалювання іонів для перетворення матеріалу, що використовується для осадження, з твердої фази в газу.

- Рух або транспортування атомів (або молекул) від джерела до субстрату. Атоми або молекули, що викидаються з мішені, будуть транспортуватися через умови молекулярного потоку та процеси теплового розсіювання. Крім того, якщо парціальний тиск пари металу або газу в пароподібному стані достатньо високий, щоб деякі з цих речовин були іонізовані, у газовій фазі відбудеться велика кількість зіткнень під час руху до основи.

- Розростання плівки на поверхні підкладки. Замінені атоми або молекули почнуть розширюватися навколо субстрату і рости в результаті ряду процесів. Початковий ріст плівки визначає тип межі розділу між підкладкою та атомами або молекулами. Склад і мікроструктуру плівки можна змінити, бомбардуючи зростаючу плівку іонами з газової фази, що спричинить розпилення, реконденсацію та зародження атомів плівки та збільшить рух атомної поверхні навколо поверхні плівки.[28,29]

Основні процеси PVD включають: вакуумне або термічне випаровування, іонне покриття та розпилення. Під час процесу випаровування теплові ефекти спричиняють викид атомів з джерела, тоді як у випадку іонного покриття зростаюча плівка одночасно бомбардується іонами. У процесі розпилення атоми викидаються з поверхні твердої мішені під дією газоподібних іонів, а потім осідають на поверхні підкладки.

Теплове (або вакуумне) випаровування - це давній процес осадження, який використовувався для утворення та вирощування тонких плівок на поверхні твердих матеріалів. Цей спосіб все ще вигідний в сучасних умовах і широко використовується в лабораторіях та різних галузях промисловості для нанесення тонких плівок. Нижче наведені основні послідовні етапи термічного випаровування або випаровування у вакуумі:

- При дуже високих температурах сублімація або кипіння утворюють пар
- Пара від цільового матеріалу переноситься на підкладку за допомогою вакууму
- Конденсація пари відбувається, коли на поверхні підкладки утворюється тверда тонка плівка, і подальше повторення циклу осадження призведе до росту та зародження тонкої плівки.

У процесі термічного випаровування цільовий матеріал, який випаровується від джерела термообробки, потрапляє в підкладку з мінімальними перешкодами. Цей процес зазвичай здійснюється під високим вакуумним тиском. Потік пари генерується нагріванням поверхні вихідного матеріалу до досить високої температури у вакуумі. Вакуумне середовище створює безпечну зону, яка зменшує газоподібні забруднюючі речовини в процесі осадження до найнижчого допустимого рівня і робить випаровувані атоми від джерела до основи в основному не зіткненням і переходом. Порівняно з іншими процесами PVD, швидкість теплового випаровування може бути дуже високою.[30,31]

Використовують різні конфігурації для виконання процесу випаровування. Це молекулярно-променева епітаксія, реактивне випаровування та активація реактивного випаровування. Молекулярно-променева епітаксія (МВЕ) була відкрита Дж. Артуром та Альфредом Чо приблизно в 1960 році. Завдяки активній взаємодії поодиноких або великої кількості атомних або молекулярних променів на поверхні нагрітого матеріалу кристалічної матриці, МВЕ використовується для епітаксійної культури. Випаровування здійснюється в надвисокому вакуумі для осадження контрольованих компонентів з рівномірною товщиною плівки. Цей процес використовується для виготовлення напівпровідникових приладів, таких як телефони та транзисторні провідники. Реактивне випаровування передбачає випаровування атомів металу з цільового матеріалу в камері в присутності реакційноздатного газу під парціальним тиском.

В процесі випаровування атоми та газу хімічно реагують, утворюючи складну плівку на поверхні підкладки. Іншою формою технології випаровування є активація реактивного випаровування (ARE). Випаровуючи атоми з поверхні цільового матеріалу в присутності плазми та реагуючи з реакційноздатним газом у камері, утворюється з'єднання з більш високою швидкістю осадження та покращеними адгезійними характеристиками, створюючи тим самим ARE. Поліпшення плазми: збільшується швидкість реакції між мішенню і підкладкою, іонізація покриття атома металу та газу в газовій фазі, перетворення нейтральних атомів в іони або енергетично нейтральні іони, тим самим збільшуючи можливість реакції та з'єднання швидкість осадження сполук.

Розпилення є важливим процесом у PVD. У багатьох випадках його функція та продуктивність перевищують інші процеси. Це нетермічний процес випаровування, при якому окремий атом виривається з поверхні через каскади атомного зіткнення за допомогою відповідних високоенергетичних бомбардувань іонами. Осадження розпилення стало загальною назвою для різних процесів розпилення. Ці процеси називаються відповідно до їх джерела

та спрямованості процесу. До видів розпилення належать: діодне розпилення (катодне або радіочастотне), струменеве розпилення, зсувне розпилення, магнетронне розпилення та розпилення іонного пучка.

Радіочастотне розпилення - це ще одна форма розпилення, яка передбачає зміну електричного потенціалу струму на радіочастоті у вакуумному середовищі, щоб уникнути накопичення зарядів на певних типах розпилювальних цілей. При радіочастотному розпиленні катод (мішень) і анод, що є тонкоплівковим покриттям, послідовно з'єднані ізольованим конденсатором. Конденсатор є частиною мережі і забезпечує передачу потужності від джерела живлення до плазмового розряду. Катод бомбардується під високим тиском у вакуумній камері, що змушує іони високої енергії розсіювати атоми у вигляді тонкої плівки, що покриває підкладку з фіксованою частотою. Конденсатор покращує оптимізацію передачі енергії цільового матеріалу до генерованої плазми. Радіочастотне напилення має багато переваг, таких як здатність наносити ізолюючі матеріали, витримувати плазму низького тиску, дифузувати РЧ-плазму по всій камері та видаляти цільовий матеріал із цільового заряду після кожного циклу, щоб зменшити ефект дуги.

Порівняно недавно був винайдений ще один варіант магнетронного розпилення, який називається імпульсним магнетронним розпиленням (ПМС), який вважається новою технологією. Цей метод вирішує складні проблеми, такі як низька швидкість осадження радіочастотного магнетронного розпилення. Концепція технології базується на коротких імпульсах або переривчастих імпульсах із середнім діапазоном частот 10-200 кГц для розряду магнетрона в малому круговому режимі, що триває десятки мікросекунд. Технологія має два режими роботи: однополярний та біполярний. Імпульсний процес може утворити надцільну плазму з чудовими характеристиками, яка може отримати більш однорідну плівку і має здатність плавно покривати складні підкладки неправильної форми.

Через обмеження процесу розпилення в даний час використовується новий метод нанесення розпиленням, який називається подвійним розпиленням, який використовує два або більше методів нанесення для отримання функціонально класифікованих матеріалів із широким застосуванням та покращеними характеристиками.

Осадження паром дуги - це процес осадження, який використовує дугу високого струму та низької напруги для випаровування катодного електрода (катодна дуга) або анодного електрода (анодної дуги) та осадження випареного матеріалу на підкладці. Як правило, випаровується матеріал сильно іонізований. Потік повітря генерується шляхом створення дуги, яка рухається вздовж цільової поверхні. Удар дугою змушує атоми викидатися з матеріалу-мішені і конденсуватися на підкладці у вигляді тонкоплівкового покриття. Багато атомів металів є іонізованими, що відрізняє цей метод від вакуумного або термічного випаровування.

3.1 Хімічні методи отримання тонких плівок

Хімічне осадження пари (CVD) - загальний термін осадження тонких плівок за допомогою хімічних реакцій. Коли компоненти мішені в газовій фазі реагують поблизу або на поверхні підкладки за допомогою хімічного процесу, відбувається процес синтезу матеріалу, що призводить до зростання тонкої плівки. У PVD утворення тонкої плівки викликане конденсацією атомів або молекул на поверхні підкладки внаслідок випаровування, виділення іонів або розпилення. CVD - це термодинамічно складний процес, що включає хімічні реакції за певних умов, таких як температура, тиск, швидкість реакції, імпульс, маса та енергія. Кілька факторів процесу та хімічна реакція між реагентом та основою визначають якість плівки, що утворюється під час процесу CVD. Відповідна комбінація параметрів процесу (таких як витрата, тиск, температура тощо) може бути використана для контролю та зміни якості мембрани. Головною унікальною особливістю хімічного осадження парів є

здатність відносно легко отримувати прості та складні сполуки при нормальних низьких температурах та здатність отримувати покриття однорідної товщини. CVD може забезпечити покриття з однаковими або майже подібними механічними, оптичними, хімічними та фізичними властивостями. Крім того, CVD може бути використаний для депонування матеріалів, які важко випаровуються. Під час CVD можуть відбуватися різні типи хімічних реакцій: піроліз, відновлення, окислення, утворення сполук та оборотний перенос. Хімічна реакція, що відбувається, залежить від реагенту (попередника) та побічного газу.

Основні послідовні кроки, які відбуваються в кожному процесі CVD:

- Конвекція або дифузія реагентів у газовій фазі в реакційну камеру
- Хімічні та газозфазні реакції, що ведуть до утворення реакційноздатних речовин та побічних продуктів
- Перемістити реагент через прикордонний шар до поверхні підкладки
- Хімічна та фізична адсорбція реагентів на поверхні підкладки
- Неоднорідні поверхневі реакції призводять до утворення твердих плівок
- поглинання побічних продуктів в основний потік газу шляхом дифузії через прикордонний шар
- Видалення газоподібних побічних продуктів з реактора конвекцією та дифузією

Термічний CVD - це процес нанесення тонких плівок на різні матеріали. У цьому процесі використовуються теплові лампи або інші методи для швидкого нагрівання основи та активації енергії, необхідної для реакції. Для отримання тонкої плівки поверхня зростання тонкої плівки піддається впливу теплової енергії від атомів конденсації або нагрівача підкладки. Ця гаряча поверхнева енергія відповідає за рух атомів, в результаті чого утворюється

тонка плівка з рівномірною товщиною і хорошим покриттям поверхні. Оскільки енергія гарячої поверхні залежить від робочої температури, підвищення температури також призводить до кращого розподілу плівки на поверхні підкладки.[32,33]

Лазерне CVD (LCVD) також є варіантом процесу CVD. Він включає фокусування випромінювання лазерного променя для локального нагрівання підкладки, що викликає реакцію на поверхні для отримання осадження тонкої плівки. Лазери можуть бути ефективно використані для живлення CVD-реакторів для осадження тонких плівок.

Фотонні CVD - це ще один тип CVD. У цьому випадку хімічна реакція спричинена ультрафіолетовим випромінюванням фотонів, яке має необхідну енергію для розриву хімічного зв'язку між молекулами реагенту, що використовується для осадження плівки.[40]

На основі самообмежувальної реакції між двома газоподібними попередниками імпульсний CVD (ALD) дозволяє осаджувати тонкі плівки шарами. Цей метод застосовується для отримання надтонких плівок і має наступні переваги: він може наносити конформну плівку на більш високу площу на структуру з високим співвідношенням сторін (при відносно меншій температурі та нижчому тиску) і має контрольну плівку товстої здатності. Цей метод використовує лише поверхневі хімічні реакції для отримання надтонких плівок і має можливість точно контролювати товщину плівки до атомного рівня.

Інші відомі методи осадження з використанням принципів реакції CVD включають епітаксію органічної парової фази металу, CVD металу, піроліз, відновлення, окислення, утворення сполук, диспропорціонування та оборотний перенос.[34,35]

Висновки

Спосіб отримання плівки визначає майже всі її характеристики, а також може бути використаний для зміни існуючих характеристик. Основними методами отримання тонких плівок є: фізичне осадження паром (PVD) та хімічне осадження паром (CVD).

Відмінною особливістю процесів PVD та CVD є те, що у PVD пара складається з атомів та молекул, які просто конденсуються на підкладці. При CVD пара хімічно реагує на підкладку, утворюючи тонку плівку.

До основних видів PVD належать: вакуумне або термічне випаровування, іонне покриття та розпилення. Кожен процес PVD проходить кілька основних етапів: утворення газофазних видів, перенесення атомів або молекул від джерела до підкладки та зростання тонких плівок на поверхні підкладки. Процес PVD може бути використаний для багат шарових покриттів.

Розділ 4. Спектрометр

Більшість спектрометрів ЕПР фірми Брукер побудовані на модульному принципі конструкції, що зумовлює велику гнучкість у створенні спектрометрів ЕПР для самих різних завдань.

Спектрометр можна умовно розбити на ряд блоків, що виконують різні функції.

4.1. Блок генератора НВЧ



Рис. 4.1 Блок НВЧ генератора «SuperX FT Bridge»

Блок здійснює генерацію електромагнітних коливань Х-діапазону і формує СВЧ імпульси.

Блок СВЧ можна поділити на дві частини. Перша частина - основна і містить:

- 1) Блок генератора змінної частоти, який генерує НВЧ коливання потужністю більше 200 мВт
- 2) Схему стабілізації потужності на рівні 200 мВт, яка може бути відключена кнопкою «leveler». Вона необхідна з причини зниження вихідної потужності СВЧ генераторів типу клистрона та діода Гана з часом.
- 3) Атенюатор 1, який регулює потужність, яка подається на зразок.
- 4) Циркулятор – який пропускає НВЧ від атенюатора 1 до резонатора, а відбитий від резонатора сигнал подає на детектор.
- 5) Детектор, струм через який залежить від падаючої на нього СВЧ потужності.

Проблема полягає в тому, що кремінний НВЧ діод, використовуваний в детекторі, ефективно «випрямляє» мікрохвильові коливання тільки при струмі через нього близько 200 мкА. Цей струм відповідає найбільш

нелінійній ділянці його ВАХ. При повному узгодженні резонатора з НВЧ трактом, відбита від нього потужність вкрай мала і не може створити необхідний струм діода.

Тому схема НВЧ блоку будується по мостовій схемі і в схему додано додаткове опорне плече «reference arm». Воно складається з двох блоків:

- 1) Блоку атенюатора 2, який задає необхідну потужність для відкриття діода.
- 2) Блок фазообертача, що міняє фазу в опорному плечі щодо основного сигналу.

4.2 Резонаторна система

Резонатор необхідний для посилення слабкого сигналу ЕПР. Сигнал в резонаторі посилюється пропорційно добротності, тому для СВ режимів спектрометра використовують резонатори з високою добротністю. Для імпульсних режимів добротність резонатора зменшують, так як після імпульсу в резонаторі виникають власні коливання, тривалість яких прямо пропорційна добротності. Ці коливання перевантажують вхідні кола підсилювачів спектрометра і призводять до неможливості вимірювати сигнал спаду вільної в перебігу деякого часу, званим часом паралізації («dead time»).



Рис. 4.2 Діелектричний резонатор з блоком азотного проточного кріостата

4.3 Магніт

Магніт створює необхідну напруженість магнітного поля для спостереження спектрів ЕПР. Магніти випускаються фірмою Брукер підрозділяються на резистивні і надпровідні. Резистивні магніти поділяються за максимальним значенням створюваних ними напруженостей магнітного поля. Також магніти відрізняються зазорами між полюсами. Чим більше зазор і максимальне магнітне поле, тим складніше і більше за вагою й обсягом буде магніт і потужніший потрібно для нього блок живлення. При значеннях магнітного поля вище 3Т використовують надпровідні магніти.



Рис. 4.3. Резистивний магніт з максимальним магнітним полем 1.4Т.

4.4 Блок живлення резистивного магніту



Рис. 4.4 Блок живлення резистивного магніту

Магнітне поле всередині між полюсами магніту створюється при протіканні через котушки магніту постійного електричного струму. Амплітуда струму досягає сотень ампер, а значення струму в котушках повинно підтримуватися з точністю не гірше

У верхній частині блоку живлення є ряд елементів управління. Зліва направо:

А. Кнопка включення електронної схеми блоку живлення.

Б. Кнопки включення і виключення струму через магніт.

В. Кнопка перемикання режимів індикації.

Г. Індикатор, який показує в залежності від положення кнопки зліва від нього або струм через магніт, або падіння напруги на магніті.

Д. Потенціометр який регулює струм, який видає блок живлення при відключеному спектрометрі. Потрібен для вибору найбільш сприятливого

режиму включення і виключення блоку живлення, так як при включенні з нульовим струмом падіння напруги на транзисторах блоку

живлення максимально, а при виключенні з максимальним струмом створюється велика напруга само ЕРС за рахунок індуктивності магніту.

Е. Ряд індикаторів показують неполадки в блоці живлення і приєднаних до нього блоків, такі як «неполадки у внутрішній схемі блоку живлення », «перевищення температури магніту », « перевищення температури блоку живлення », « не включений блок охолодження », «Перевищення максимального стабільного струму».

4.5 Блок охолодження резистивного магніту і блоку живлення

Потужність споживана блоком живлення резистивного магніту від електричної мережі в піку може досягати 10кВт для звичайного блоку живлення магніту X-діапазону. Вся ця потужність розсіюється на котушках магніту і керуючих елементах блоку живлення. Тому важливо організувати правильне охолодження цих пристроїв.



Рис. 4.5.1 Блок живлення резистивного магніту

В якості системи охолодження обрана двоконтурна система охолодження. Внутрішній контур містить дистильовану воду, яка охолоджує котушки магніту і блок живлення. Її в свою чергу охолоджує проточна водопровідна вода в зовнішньому контурі. Потік води в зовнішньому контурі, а отже і температура води у внутрішньому контурі, регулюються за допомогою термостата.



Рис. 4.5.2 Водомірна трубка для вимірювання рівня дистильованої води

Раз на півроку потрібно відкривати кришку блоку і перевіряти рівень дистильованої води (рис. 4.5.2) в системі і в міру необхідності додавати дистильовану воду. Рівень води повинен знаходитися вище відмітки «Level» і нижче чорної відмітки на водомірній трубці (мал. 4.5.2).

Також невелика частина потоку дистильованої води витрачається на охолодження генератора в НВЧ блоці спектрометра. Тому необхідно повністю включати систему охолодження перед включенням спектрометра, навіть у випадку якщо блок живлення магніту не буде включатися.

4.6 Системний блок

Системний блок містить електронні блоки управління спектрометром, а також блок живлення електронних схем. Залежно від завдань спектрометра, комплектація консолі може відрізнятися. Зв'язок між блоками управління здійснюється по витій парі. У кожного роз'єму RG45 (з'єднувача 8P8C) розташовані 4 світлодіоди, що показують стан зв'язку блоку. У випадку світіння червоного світлодіода, відповідний блок вимагається перезавантажити.



Рис. 4.6 Системний блок

Системний блок на задній стінці має ряд вентиляторів, що забезпечують охолодження блоків всередині консолі. Тому забороняється включати консоль без задньої стінки або встановлювати консоль впритул до стіни.



4.7 Персональний комп'ютер

Рис. 4.5.7 Персональний комп'ютер із запущеною програмою Bruker X-EPR

Все управління спектрометром здійснюється за допомогою персонального комп'ютера, який з'єднаний з системним блоком за допомогою

витої пари мережі Ethernet. Управління здійснюється через програму Bruker X-EPR.

РОЗДІЛ 5.

5.1 Модель формування просторово-періодичної двійникової структури в епітаксіальних плівках

У об'ємних матеріалах зазвичай немає факторів, які можуть призвести до утворення просторово-періодичної двійникової структури. Формування просторово-періодичної двійникової структури в епітаксіальних плівках можна пояснити, використовуючи наступні прості міркування. Припустимо, що:

- плівка епітаксіально вирощена на монокристалічній масивній підкладці;
- температура осадження досить висока для утворення плівки в аустенітному стані;
- характеристики матеріалів плівки та підкладки близькі до досліджуваних тут, зокрема, перехід від кубічного аустенітного стану до орторомбічного мартенситного стану відбувається за температури нижче точки Кюрі;
- для спрощення, напруженням, що виникає внаслідок невідповідності решіток плівки-підкладки, і напруженням, що виникають при охолодженні плівок через різні коефіцієнти розширення температури плівки та підкладки, нехтують.

Перехід від аустенітного до мартенситного стану в епітаксіальних плівках не може відбутися без двійкування через потребу збереження площі поверхні.

Напруження, що виникають на орторомбічній поверхні плівки/ кубічної підкладки, слід враховувати для аналізу мартенситної трансформації. Їх вплив особливо критичний для тонких плівок, для яких внеском поверхневої пружної енергії у загальну енергію плівки не можна нехтувати. У таких тонких плівках

ця енергія повинна збільшувати енергію мартенситної фази, зміщуючи перехід відносно об'ємних матеріалів або навіть блокуючи мартенситну трансформацію (рис.5.1.1).

У епітаксціальних плівках зменшення ширини варіантів двійників L призводить до зменшення напружень на межі плівки / підкладки, але в той же час призводить до збільшення концентрації двійникових меж і відповідної пружної енергії (рис. 5.1.2). На відміну від об'ємних матеріалів, енергія, пов'язана з інтерфейсами двійників в плівках, може бути досить високою, оскільки двійникові варіанти фіксуються жорсткою підкладкою. Завдяки цій взаємодії завжди існує відповідність між товщиною плівки та шириною двійникових варіантів (вкладка на рис. 5.1.1). Вклад енергії інтерфейсу плівки / підкладки зменшується зі збільшенням товщини плівки, в той час як енергія, пов'язана з подвійними інтерфейсами, збільшується зі збільшенням товщини плівки.

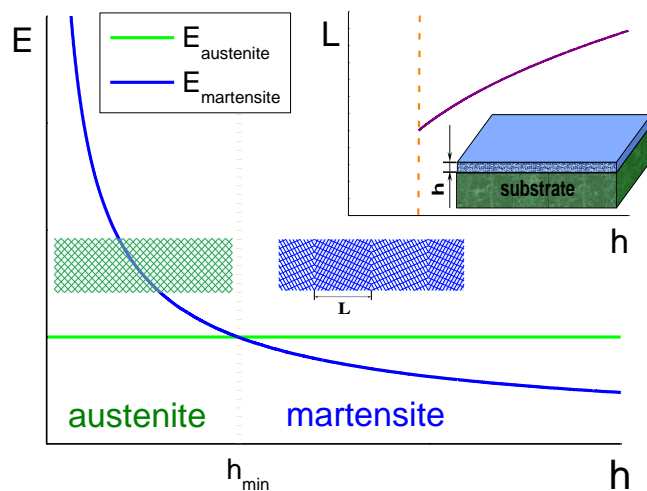


Рисунок 5.1.1 Схема зміни енергії фази мартенситу та аустеніту з товщиною плівки h . Якісна залежність оптимальної ширини подвійного варіанту від функції товщини плівки представлена у вкладці.

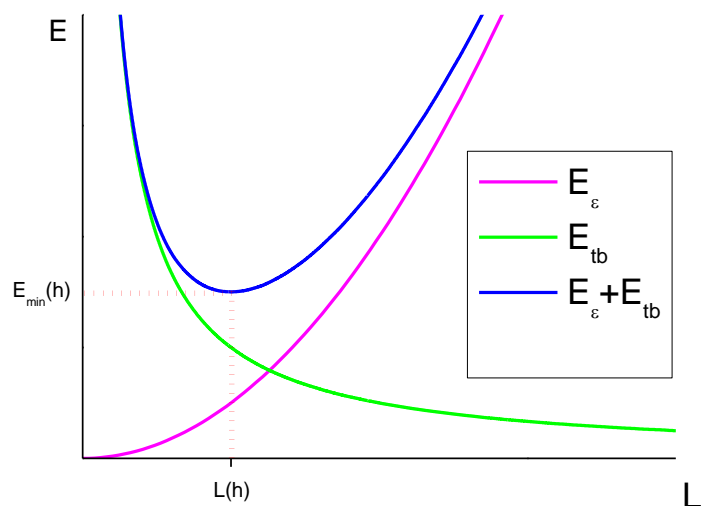


Рисунок 5.1.2 Схема зміни енергії інтерфейсу плівки / підкладки E_ε та енергії інтерфейсу двійників E_{tb} з шириною двійника варіанта L при фіксованій товщині плівки h .

Хоча запропоновані міркування є досить спрощеними і не враховують усіх фізичних факторів, зрозуміло, що ширина варіантів двійників повинна зростати зі збільшенням товщини плівок. Це повинно призвести до зміни фізичних властивостей плівок.

5.2 Експеримент

Плівки $\text{Ni}_{52.3}\text{Mn}_{26.8}\text{Ga}_{20.9}$ (ат.%) товщиною 0.5 мкм були епітаксіально осаджені на підігріту підкладку $\text{MgO}(001)$ при тиску $2.6 \cdot 10^{-2}$ мбар за допомогою магнетронного розпилення. Значення g -фактору для аналізу даних феромагнітного резонансу було отримано з вимірів парамагнітного резонансу в аустенітному стані (при температурі вище за 420 K) і становило 2.01. Склад плівок вимірювався з точністю краще ніж 0.5 ат.% за допомогою дисперсійної рентгенівської спектроскопії на скануючому електронному мікроскопі Jeol JSM-6400. Скануючий електронний мікроскоп також використовувався для спостереження мікроструктури. Структура плівок та її зміна з температурою

контролювалась за допомогою рентгенівського дифрактометра Philips X'Pert PRO, який використовує $\text{CuK}\alpha$ випромінювання. Мартенситне перетворення з кубічної структури до орторомбічної спостерігалось при 420 К.

Експериментальна кутова залежність для резонансного поля в площині плівки $H_r(\varphi)$ при 290 К показана колами на Рис.5.1. Нульовий кут ($\varphi=0$) відповідає напрямку $[100]$ підкладинки MgO. Експериментальна кутова залежність резонансного поля демонструє наявність двоосьової симетрії в площині плівки. Мінімуми резонансного поля відповідають напрямкам легкого намагнічування $\varphi = \pi/4 + \pi n/2$, $n=0,1,2,\dots$. Позаплощинна кутова залежність $H_r(\theta)$ (не показана на Рис.5.2.1) симетрична відносно нормалі до площини плівки характерна для кубічної симетрії.

Щоб прослідкувати за температурною еволюцією магнітних параметрів, магнітне поле було орієнтоване перпендикулярно до площини плівки і були виміряні температурні залежності резонансного поля (Рис.5.2). За рахунок наявності одновісної магнітокристалічної анізотропії та магнітостатичного поля, значення резонансного поля для позаплощинної конфігурації суттєво перевищує значення резонансного поля для магнітного поля в площині плівки. Важливо, що резонансне поле монотонно спадає зі зростанням температури. Така поведінка суттєво відрізняється від того, що спостерігалось раніше в тетрагональній мартенситній фазі плівок Ni–Mn–Ga з $c < a$, в яких ефективна намагніченість зменшується при зменшенні температури в результаті зростання позаплощинної анізотропії. Така поведінка говорить про те, що величина константи перпендикулярної анізотропії в наших плівках є малою або від'ємною. Це підтверджується даними ФМР та SQUID, які свідчать про формування площинної анізотропії з від'ємним значенням константи перпендикулярної анізотропії.

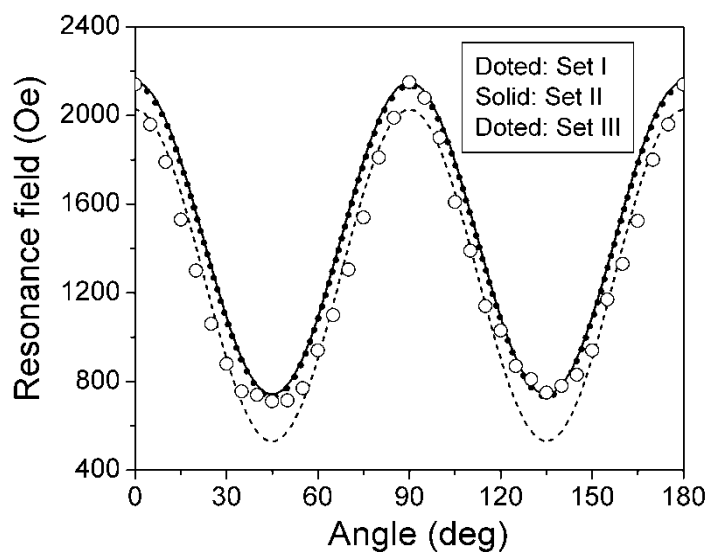


Рисунок 5.1. Експериментальна кутова залежність резонансного поля в площині плівки (кола) в порівнянні з теоретичними залежностями (точки та суцільна лінія)

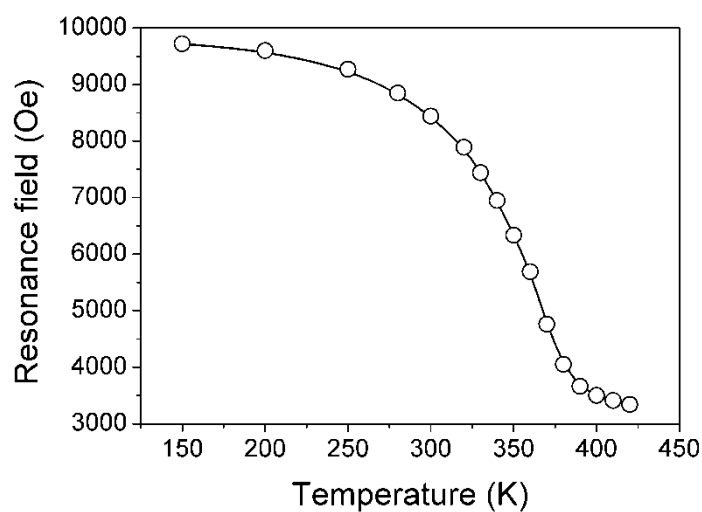


Рисунок 5.2.2. Експериментальна температурна залежність резонансного поля. Зовнішнє магнітне поле перпендикулярно до площини плівки.

При температурі вище за 370 К, резонансне поле різко спадає, що демонструє наближення до точки Кюрі. Це корелює з даними магнітних

вимірів. Однак, навіть у парамагнітному стані існує різниця між значеннями резонансного поля у площині плівки та для перпендикулярної конфігурації. Ці відмінності звичайно описуються в термінах анізотропії g-фактора, яка справедлива як нижче, так і вище температура мартенситного переходу (~ 420 К).

В мартенситному стані плівки мають періодичну двійникову мікроструктуру (Рис.5.2.3). Рентгенівський аналіз показує формування орторомбічної кристалічної структури з довгою (a) та короткою (c) осями, що лежать в площині плівки, в той час як вісь b перпендикулярна до площини плівки. Рентгенівський аналіз, скануюча електронна мікроскопія та дані ФМР дозволяють схематично представити структуру плівки у вигляді, наведеному на рис.5.2.4.

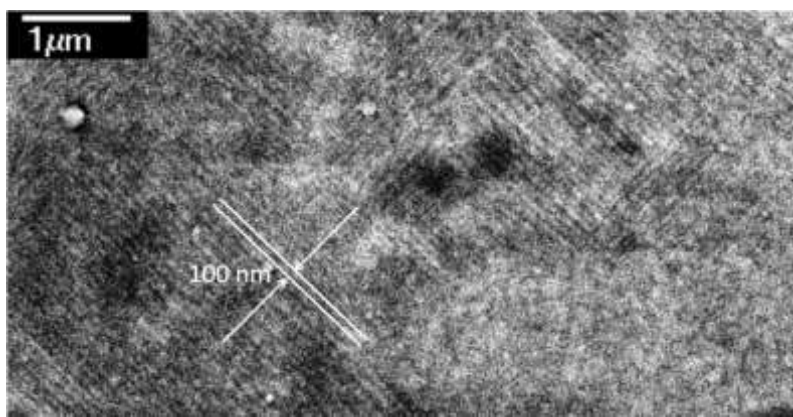


Рисунок 5.2.3. Зображення, отримане за допомогою вторинних електронів, що показує тонку двійникову структуру орторомбічного мартенситу.

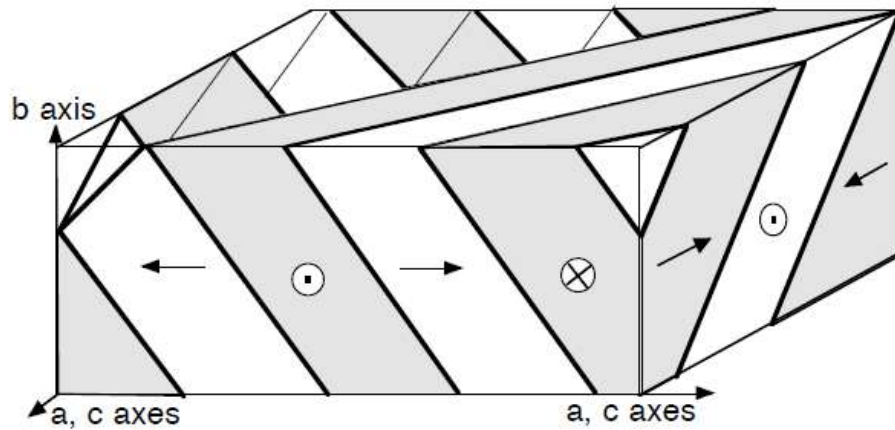


Рисунок 5.2.4. Реконструкція двійникової структури в плівці Ni-Mn-Ga.

Зображення, отримане за допомогою скануючого електронного мікроскопу, показує формування тонкої двійникової структури з характерною шириною двійників порядку кілька десятків нанометрів (Рис.5.3). Аналогічна структура двійників спостерігалась в роботах [47-50]. Для такої двійникової структури потрібно очікувати появи двох резонансних піків на спектрі ФМР. Кутова залежність резонансних полів ФМР цих піків повинна мати 180° періодичність та має бути зсунута на 90° для цих двох піків. Але, тільки один резонансний пік спостерігається в експерименті і його кутова залежність має 90° періодичність. Це явне протиріччя між даними ФМР та структурними даними може бути розв'язане, якщо прийняти до уваги обмінну взаємодію між магнітними моментами двійників.

Варто відмітити, що сигнал ФМР отриманий при температурах нижче за 340 К є типовим для систем з магнітними параметрами, які неперервно змінюються. Така зміна є результатом дисперсії резонансного поля. Цю дисперсію можна описати за допомогою параметру ΔH_p (Рис.5.2.5). Зміна експериментальних значень ΔH_p з температурою представлена на рисунку. Залежність $\Delta H_p(T)$ можна розділити на дві частини. Нижче 340 К дисперсія резонансного поля зменшується практично лінійно зі зростанням температури. Вище 340 К спостерігається різке падіння ΔH_p

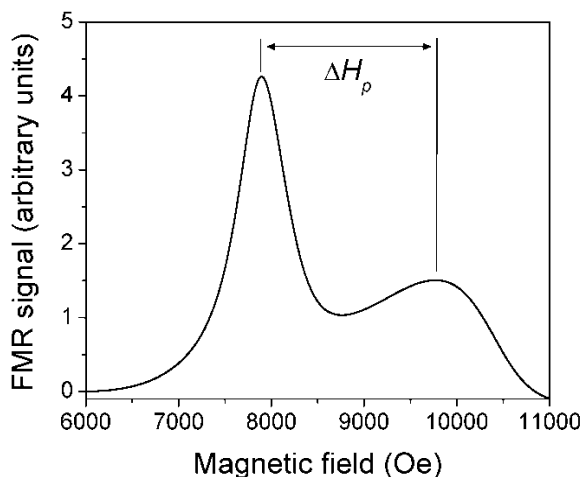


Рисунок 5.2.5. Сигнал ФМР записаний при 320 К. Магнітне поле перпендикулярне до площини плівки.

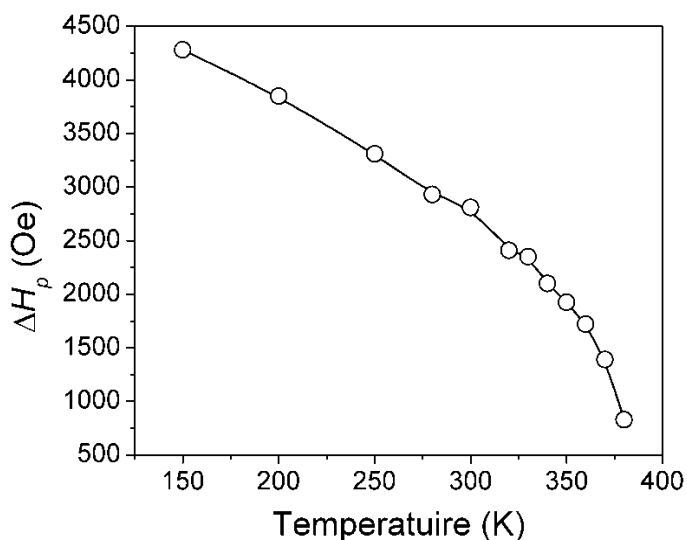


Рисунок 5.2.6. Температурна залежність дисперсії.

Експериментальні дані ФМР, отримані для магнітного поля в площині плівки, демонструють, що резонансні умови є періодичною функцією кута між кристалографічним напрямом та магнітним полем. Період зміни резонансного поля дорівнює 90° . Ця періодичність притаманна періодичній двійниковій мартенситній структурі. В той же час, одноваріантна структура мартенситного стану повинна мати періодичність 180° . Можна вважати, що 90° симетрія

виникає внаслідок якогось усереднення від варіантів орторомбічної кристалічної структури. В цьому випадку резонансні коливання атомних спінів мають бути однорідні у просторі, а енергія обміну спінів є незмінною. Таким чином, кутові залежності резонансного поля можуть бути описані з використанням магнітопружної моделі.

Нехай система координат буде прив'язана до кристалографічних напрямків $\langle 100 \rangle$. Мартенситна структура, представлена на Рис. 5.2.3, складається з кристалографічних доменів (мартенситних варіантів) з $a \parallel x$, $b \parallel z$ та $c \parallel x$, $b \parallel z$. Пари цих варіантів формують двійникові фрагменти плівки. Середня густина енергії магнітної анізотропії для ас двійникової структури, що формується варіантами а- та с- описується формулою

$$\bar{F}_A(\alpha) = \alpha F_A^{(c)} + (1 - \alpha) F_A^{(a)}, \quad (5.2.1)$$

де α - об'ємна частина $V_c / (V_a + V_c)$ с-компоненти двійникової структури, $F_A^{(c)}$ та $F_A^{(a)}$ - густина енергії магнітної анізотропії двійникових компонент. Вираз для густини енергії магнітної анізотропії можна розкласти в ряд за компонентами магнітного вектора. Згідно із розрахунками з перших принципів та магнітопружною моделлю коефіцієнти при членах другого порядку густини енергії магнітної анізотропії двійникових компонент пропорційна спонтанним деформаціям кубічної ґратки при мартенситному перетворенні. Мартенситне перетворення з кубічної на орторомбічну фазу характеризується діагональним тензором напруг, які можуть бути виражений як

$$\varepsilon_{xx}^{(a)} = (a - a_0) / a_0, \quad \varepsilon_{yy}^{(a)} = (c - a_0) / a_0, \quad \varepsilon_{zz}^{(a)} = (b - a_0) / a_0, \quad (5.2.2)$$

для т а-компоненти, та

$$\varepsilon_{xx}^{(c)} = (c - a_0)/a_0, \quad \varepsilon_{yy}^{(c)} = (c - a_0)/a_0, \quad \varepsilon_{zz}^{(c)} = (b - a_0)/a_0, \quad (5.2.3)$$

для с-компонент двійника. (Тут a_0 і- значення параметра ґратки кубічної фази).

Члени другого порядку для густини енергії магнітної анізотропії двійникових компонент зв'язані з напругами мартенситного перетворення:

$$F_{A2}^{(a,c)} = -\delta M^2 \{ \sqrt{3} u_2^{(a,c)} [(m_x^{(a,c)})^2 - (m_y^{(a,c)})^2] + u_3^{(a,c)} [2(m_z^{(a,c)})^2 - (m_y^{(a,c)})^2 - (m_x^{(a,c)})^2] \}, \quad (5.2.4)$$

де δ - безрозмірна магнітопружна константа, $\mathbf{m}^{(a,c)} = \mathbf{M}^{(a,c)} / M$ - одиничний магнітний вектор а- або с- компонент двійника, $\mathbf{M}^{(a,c)}$ - вектор намагніченості відповідної компоненти двійника, $M = |\mathbf{M}^{(a,c)}|$. Значення $u_2^{(a,c)}$ та $u_3^{(a,c)}$ є лінійними комбінаціями напруг при мартенситному перетворенні, які можна виразити як

$$u_2^{(a,c)} = \sqrt{3}(\varepsilon_{xx}^{(a,b)} - \varepsilon_{yy}^{(a,b)}), \quad u_3^{(a,c)} = 2\varepsilon_{zz}^{(a,c)} - \varepsilon_{yy}^{(a,c)} - \varepsilon_{xx}^{(a,c)}. \quad (5.2.5)$$

Максимально можливий вплив тонкого двійникування на магнітну анізотропію феромагнітного монокристалу можна отримати, якщо магнітні вектори сусідніх двійникових компонент сильно зв'язані обміном. У цьому випадку двійникові структура може бути описана за допомогою одного магнітного вектора $\mathbf{m} = \mathbf{M} / M$, і рівноважний напрям цього вектора визначається густиною енергії магнітної анізотропії двійникової орторомбічної ґратки. Оскільки густина енергії магнітної анізотропії для феромагнітного мартенситу лінійно залежить від компонент тензора напруг, усереднення густини енергії магнітної анізотропії еквівалентно усередненню напруг мартенситної трансформації. Середні напруги мартенситної трансформації характеризуються компонентами тензора напруг

$$\bar{\varepsilon}_{ii}^{(ac)} = \alpha \varepsilon_{ii}^{(c)} + (1 - \alpha) \varepsilon_{ii}^{(a)}. \quad (5.2.6)$$

Підставляючи напруги мартенситної трансформації, що задаються рівняннями (5.2.2) та (5.2.3), в рівняння (5.2.4) – (5.2.6) отримаємо

$$\bar{F}_{A2}(\alpha) = K_{\perp} m_z^2 + (1 - 2\alpha) K_{\parallel} (m_x^2 - m_y^2), \quad (5.2.7)$$

де

$$K_{\parallel} = -3\delta M^2(a - c)/a_0, \quad K_{\perp} = -3\delta M^2(2b - a - c)/a_0. \quad (5.2.8)$$

- константи магнітної анізотропії другого порядку, які притаманні одноваріантному мартенситному стану

Члени четвертого порядку густини енергії магнітної анізотропії двійникових компонент описуються як

$$\begin{aligned} F_{A4}^{(a)} &= -\frac{1}{2}(K_a m_x^4 + K_c m_y^4 + K_b m_z^4), \\ F_{A4}^{(c)} &= -\frac{1}{2}(K_c m_x^4 + K_a m_y^4 + K_b m_z^4), \end{aligned} \quad (5.2.9)$$

де K_a , K_b та K_c - константи анізотропії четвертого порядку. Відповідно до рівняння (5.2.1), члени четвертого порядку у виразі для середньої густини енергії магнітної анізотропії мають вид

$$\bar{F}_{A4}(\alpha) = -\frac{1}{2}[K_{ca}(\alpha) m_x^4 + K_{ca}(1 - \alpha) m_y^4 + K_b m_z^4] \quad (5.2.10)$$

де

$$\begin{aligned} K_{ca}(\alpha) &= \alpha K_c + (1 - \alpha) K_a, \\ K_{ca}(1 - \alpha) &= (1 - \alpha) K_c + \alpha K_a. \end{aligned} \quad (5.2.11)$$

Нехай зовнішнє магнітне поле прикладене вздовж вісі i . Тоді густина магнітної енергії

$$\bar{F}(\alpha) = \bar{F}_{A2}(\alpha) + \bar{F}_{A4}(\alpha) + 2\pi M^2 m_z^2 - m_i H_i M. \quad (5.2.12)$$

Сума першого та другого членів в правій частині рівняння (5.2.12) – середня густина енергії магнітної анізотропії. Третій та четвертий члени – густина магнітостатичної та зеєманівської енергій відповідно. Якщо зовнішнє магнітне поле дорівнює нулю, різниця між станами з $\mathbf{m} \parallel x$ та $\mathbf{m} \parallel y$ дорівнює

$$\bar{F}_{\mathbf{m} \parallel x}(\alpha) - \bar{F}_{\mathbf{m} \parallel y}(\alpha) = \frac{1}{2}(1 - 2\alpha)(4K_{\parallel} + K_c - K_a). \quad (5.2.13)$$

Для мартенситів Ni–Mn–Ga рівність $4K_{\parallel} > |K_c - K_a| > 0$ [54] має місце і тому напрямок легкого намагнічування паралельний до осі y , якщо $\alpha < 1/2$, і до осі x , якщо $\alpha > 1/2$. У випадку $\alpha = 1/2$ різниця енергій в рівнянні (5.2.13) дорівнює нулю, і рівноважний напрямок магнітного вектора в площині плівки відповідає мінімумам членів четвертого порядку густини енергії магнітної анізотропії.

Зазвичай динаміка одиничного магнітного вектора описується рівнянням

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \gamma(\mathbf{m} \times \bar{\mathbf{H}}^{(\text{eff})}) \quad (5.2.14)$$

де $\bar{\mathbf{H}}^{(\text{eff})} = -M^{-1}(\partial \bar{F} / \partial \mathbf{m})$ – середнє значення ефективного магнітного поля, яке діє на магнітний вектор. Коли магнітне поле прикладене в площині плівки, енергія, що описується рівнянням (5.2.12) відповідає значенню резонансного поля, яке задовольняє рівнянню

$$\frac{\omega^2}{\gamma^2} = (\bar{H}_{0x}^{\text{eff}})^2 + (\bar{H}_{0y}^{\text{eff}})^2 - \bar{H}_{0x}^{\text{eff}} (\bar{H}_z^{\text{eff}} + \bar{H}_{1y}^{\text{eff}}) \cos \varphi - \bar{H}_{0y}^{\text{eff}} (\bar{H}_z^{\text{eff}} + \bar{H}_{1x}^{\text{eff}}) \sin \varphi + \bar{H}_z^{\text{eff}} (\bar{H}_{1x}^{\text{eff}} \sin^2 \varphi + \bar{H}_{1y}^{\text{eff}} \cos^2 \varphi) \quad (5.2.15)$$

де

$$\bar{H}_{0x}^{\text{eff}} = H_x + 2M^{-1}[(2\alpha - 1)K_{\parallel} + K_{ca}(\alpha) \cos^2 \varphi] \cos \varphi,$$

$$\bar{H}_{0y}^{\text{eff}} = H_y + 2M^{-1}[(1 - 2\alpha)K_{\parallel} + K_{ca}(1 - \alpha) \sin^2 \varphi] \sin \varphi,$$

$$\bar{H}_{1x}^{\text{eff}} = 2M^{-1}[(2\alpha - 1)K_{\parallel} + 3K_{ca}(\alpha) \cos^2 \varphi],$$

$$\bar{H}_{1y}^{\text{eff}} = 2M^{-1}[(1 - 2\alpha)K_{\parallel} + 3K_{ca}(1 - \alpha) \sin^2 \varphi],$$

$$\bar{H}_z^{\text{eff}} = -2K_{\perp}M^{-1} - 4\pi M$$

Середні значення компонент ефективного магнітного поля, φ -кут між одиничним магнітним вектором та напрямком

Тепер, нехай магнітне поле прикладене перпендикулярно до площини плівки. Для теоретичної інтерпретації експериментальних даних ми розглянемо два крайніх випадки

$\alpha = 0$ (одно варіантний мартенситний стан) та $\alpha = 1/2$ (двійників мартенсит з однаковими об'ємними частинами двійникових компонент). Беручи до уваги $m_x^2 + m_y^2 + m_z^2 = 1$, можна отримати вираз

$$\bar{F}(\alpha) = [K_2(\alpha) + 2\pi M^2]m_z^2 - \frac{1}{2}K_4(\alpha)m_z^4 - m_z H_z M, \quad (5.2.16)$$

де для $\alpha = 0, 1/2$,

$$K_2(0) = K_{\perp} + K_{\parallel} + K_c,$$

$$K_4(0) = K_b + K_c,$$

$$K_2(1/2) = K_{\perp} + (K_a + K_c)/2,$$

$$K_4(1/2) = K_b + (K_a + K_c)/2.$$

Резонансне значення повздовжнього магнітного поля задовольняє рівнянню

$$H_r^\perp(\alpha) = \frac{\omega}{\gamma} + 4\pi M + \frac{2K_2(\alpha)}{M} - \frac{2K_4(\alpha)}{M}, \quad (5.2.17)$$

яке показує, що двійникування зменшує резонансне поле, і це зменшення дорівнює

$$H_r^\perp(0) - H_r^\perp(1/2) = \frac{2K_{\parallel}}{M}. \quad (5.2.18)$$

Рівняння (5.2.15), (5.2.17) та (5.2.18) дозволяють пряму інтерпретацію експериментальних результатів і дозволяють також оцінити величину констант другого та четвертого порядку в густині енергії магнітної анізотропії, які входять в рівняння (5.2.7) та (5.2.9).

Висновки

Виявлено, що магнітні властивості епітаксіальних плівок сплавів NiMnGa суттєво залежать від їх товщини. Проводяться теоретичні дослідження цього явища. Показано, що ширина лінії магнітного резонансу в сплавах Гейслера в аустенітній фазі становить менш ніж 20 ерстед, що перевершує найкращі результати, які на сьогодні відомі для металічних систем.

Досліджено магнітодинамічні властивості Гейслерівських сплавів з двійниковою структурою у випадку, коли розміри двійників співрозмірні з радіусом обмінної взаємодії. Показано, що обмінний зв'язок між двійниками призводить в такому випадку до суттєвої модифікації їх магнітних параметрів. Такі системи можуть вирисовуватись для створення магнітних кристалів з контрольованими параметрами.

Список використаних джерел

- 1 C. Felser, A. Hirohata, Heusler Alloys. Properties, Grows, Applications. Springer Series in Materials Science, 222 (2016).
- 2 O. Heczko, A. Sozinov, K. Ullakko, Giant field-induced reversible strain in magnetic shape memory NiMnGa alloy. IEEE Trans. Mag. 36, 3266-3268 (2000).
- 3 S. J. Murray, M. Marioni, S. M. Allen, R. C. O'Handley, T. A. Lograsso, 6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni–Mn–Ga. Appl. Phys. Lett. 77, 886-888 (2000).
- 4 M. Acet, L. Manosa, A. Planes, Magnetic-field-induced effects in martensitic Heusler-based magnetic shape-memory alloys in Handbook of Magnetic Materials. Elsevier, 19, 231–289 (2011).
- 5 A. Planes, L. Manosa, M. Acet, Magnetocaloric effect and its relation to shape-memory properties in ferromagnetic Heusler alloys. J. Phys.: Condens. Mat. 21, 233201 (2009).
- 6 T. Kakeshita, T. Fukuda, A. Saxena, A. Planes, Disorder and strain-induced complexity in functional materials. Springer Series in Material Science, Springer-Verlag, 148 (2012).
- 7 H. Zabel, M. Farle, Magnetic Nanostructures. Spin Dynamics and Spin Transport. Springer-Verlag, 2013.
- 8 Y. Sakuraba, M. Hattori, M. Oogane, Y. Ando, H. Kato, A. Sakuma, T. Miyazaki, H. Kubota, Appl. Phys. Lett. 88, 192508 (2006).
- 9 R. Y. Umetsu, X. Xu, and R. Kainuma, Scr. Mat. 116, 1 (2016).
- 10 V. N. Prudnikov, A. P. Kazakov, I. S. Titov, N. S. Perov, A. B. Granovskii, I. S. Dubenko, A. K. Pathak, N. Ali, A. P. Zhukov, and J. Gonzalez, JETP Letters, 92, 666 (2010).
- 11 T. Krenke, E. Duman, M. Acet, E. F. Wassermann, X. Moya, L. Manosa, A. Planes, Nature Mater. 4, 450 (2005).
- 12 V. A. L'vov, A. Kosogor, J. M. Barandiarán, V. A. Chernenko, J. Appl. Phys. 119, 013902 (2016).
- 13 V. D. Buchelnikov, V. V. Sokolovskiy, S. V. Taskaev, V. V. Khovaylo, A. A. Aliev, L. N. Khanov, A. B. Batdalov, P. Entel, H. Miki, T. Takagi, J. Phys. D: Appl. Phys. 44, 064012 (2011).
- 14 V. O. Golub, Antiferromagnetic coupling between martensitic twin variants observed by magnetic resonance in Ni-Mn-Sn-Co films. Phys. Rev. B 95, 024422 (2017).
- 15 I. R. Aseguinolaza, V. Golub, J. M. Barandiarán, M. Ohtsuka, P. Müllner, O. Y. Salyuk, V. A. Chernenko, Appl. Phys. Lett. 102, 182401 (2013).
- 16 V. A. Chernenko, V. A. Lvov, V. Golub, I. R. Aseguinolaza, J. M. Barandiarán, Phys. Rev. B 84, 054450 (2011).
- 17 V. A. Chernenko, V. Golub, J. M. Barandiarán, O. Y. Salyuk, F. Albertini, L. Righi, S. Fabbri, M. Ohtsuka. Appl. Phys. Lett. 96, 42502 (2010).

- 18 M. Thomas, O. Heczko, J. Buschbeck, L. Schultz, S. Fähler, *Appl. Phys. Lett.* 92, 192515 (2008).
- 19 P. Mullner, V. A. Chernenko, G. Kostorz, *J. Mag. Mat.* 267(3) (2003) 325.
- 20 O. Heczko, *J. Mag. Mat.* 290 (2005) 846.
- 21 M. Marioni, R. O'Handley, S. Allen, *Appl. Phys. Lett.* 83(19) (2003) 3966.
- 22 O. Heczko, L. Straka, *J. Appl. Phys.* 94(11) (2003) 7139.
- 23 G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber, Atomic force microscope. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, p. 56.
- 24 D. Sarid, *Scanning Force Microscopy*. New York: Oxford University Press, 1994, p. 263.
- 25 J. Stokes, Production of coated and free-standing engineering components using the HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) process [PhD thesis]. Dublin City University, 2003, p. 19.
- 26 P. Martin, *Introduction to surface engineering and functionally engineered materials*. John Wiley & Sons, 2011, pp. 35-39.
- 27 W. Andrew, *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. Mattox DM, 2010, p. 17-29.
- 28 K. Seshan, *Handbook of thin film deposition*. Mattox DM, 2012, pp. 43-47.
- 29 K. Seshan, Atomistic Film Growth and Some Growth-Related Film Properties, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. Mattox DM, 1998, pp. 66-72.
- 30 P. Kelly, R. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum* 56, 2000, 159–172.
- 31 P. Kelly, R. Arnell, W. Ahmed, Some recent applications of materials deposited by unbalanced magnetron sputtering. *Surf Eng* 9, 1993, 287–292.
- 32 K. Seshan K, *Handbook of thin-film deposition processes and Techniques, Principles, Methods, Equipment and Applications*, Noyes. William Andrew, 2001, pp. 73-78.
- 33 T. You, O. Niwa, M. Tomita, Characterization and electrochemical properties of highly dispersed copper oxide/ hydroxide nanoparticles in graphite-like carbon films prepared by RF sputtering method. *Electrochem Commun* 4, 2002, 468–471.
- 34 C. Torng, J. Sivertsen, J. Judy, Structure and bonding studies of the C: N thin films produced by rf sputtering method. *J Mater Res* 5, 1990, pp. 2490–2496.
- 35 P. Kelly, R. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum* 56, 2000, 159–172.
- 36 V. Kouznetsov, K. Macák, J. Schneider, A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. *Surf Coat Tech* 122, 1999, 290–293.

37 K. Sarakinos, J. Alami, S. Konstantinidis, High power pulsed magnetron sputtering: A review on scientific and engineering state of the art. *Surf Coat Tech* 204, 2010, 1661–1684.

38 J. Alami, S. Bolz, K. Sarakinos, High power pulsed magnetron sputtering: Fundamentals and applications. *J Alloy Compd* 483, 2009, 530–534.

39 K. Wasa, M. Kitabatake, H. Adachi H, *Thin Film Processes*, In: Wasa K, Kitabatake M, Adachi H, *Thin Film Materials Technology*. Norwich, NY: William Andrew, 2004, pp. 17–69.

40 X. Liu, P. Chu, C. Ding, Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Mat Sci Eng R* 47, 2005, 49–121.