Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Наномагнетизм

Збірник задач

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»
спеціальності 104 Фізика та астрономія

Укладач: О.Ю. Горобець

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2024

УДК 537.6 (537)
Г11

Укладач: *Горобець Оксана Юріївна,* д.ф.-м.н., проф. кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів фізико-математичного факультету, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Рецензент *Куліш Володимир Вікторович,* д.ф.-м.н., професор кафедри загальної фізики фізико-математичного факультету, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Савченко Дарина Вікторівна,* д.ф.-м.н., завідувач кафедри кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів фізико-математичного факультету, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 1 від 26.09.2024 р.)
за поданням вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 10 від 11.09.2024 р.)

Г11 **Наномагнетизм :** збірник задач [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освіт. програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів» спец. 104 Фізика та астрономія / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. Ю. Горобець – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 26 с.

В навчальному посібнику викладено вимоги до підготовки до практичних робіт з дисципліни «Наномагнетизм». Подано добірку задач до практичних занять, які призначені для поглибленого вивчення квантово-механічної природи спіну електрона та магнітних властивостей магнітовпорядкованих наноструктурних матеріалів.

УДК 004.43 (004)

Реєстр. № НП 24/25-050. Обсяг 0,8 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

Зміст

ВСТУП 3
ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. Спін електрона 6
Завдання до практичної роботи 1 8
ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. Магнітний момент багатоелектронних атомів 10
Спін-орбітальна взаємодія 10
Завдання до практичної роботи 2 11
ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. Енергія феромагнетика. Доменні стінки 12
Завдання до практичної роботи 3 13
ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. Доменні структури в феромагнетиках 14
Завдання до практичної роботи 4 15
ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. Лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця в феромагнетику 16
Завдання до практичної роботи 5 16
ПРАКТИЧНА РОБОТА 6. Тензор високочастотної магнітної сприйнятливості феромагнетика 17
Завдання до практичної роботи 6 19
ПРАКТИЧНА РОБОТА 7. Спектр спінових хвиль в феромагнетику 20
Завдання до практичної роботи 7 21
ПРАКТИЧНА РОБОТА 8. Граничні умови для динамічної компоненти вектора намагніченості на інтерфейсі між двома феромагнетиками 22
Завдання до практичної роботи 8 22
ПРАКТИЧНА РОБОТА 9. Квантова теорія спінових хвиль. Процеси взаємодії між магнонами 23
Завдання до практичної роботи 9 23
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА 24

ВСТУП

Цей навчальний посібник містить добірку задач до практичних занять, які розкриють для читача захоплюючий світ наномагнетизму, галузі, яка швидко розвивається на стику фізики, матеріалознавства та нанотехнологій. Цей курс пропонує поглиблене вивчення магнітних властивостей наноструктурних матеріалів, зосереджуючись на унікальній поведінці та явищах, які виникають, коли матеріали обмежені такими малими розмірами. Вирушаючи в цю академічну подорож, ви відкриєте глибокі наслідки наномагнетизму як для фундаментальної науки, так і для передових технологічних застосувань.

Особливу увагу в навчальному посібнику приділено поняттю спіну електронів та атомів, бо в основі наномагнетизму лежить концепція спіну – фундаментальної властивості низки елементарних частинок, в тому числі електронів, яка породжує їх магнетизм. Спін електрона – це його власний обертальний момент, і він зумовлює магнітні властивості переважної більшості твердотільних наноструктур, тому що нерозривно пов’язаний з власним (іншими словами спіновим) магнітним моментом. Розуміння поведінки спінів електронів, протонів, нейтронів має важливе значення для розуміння принципів наномагнетизму. Цей курс заглибиться в квантово-механічну природу спіну, як спіни взаємодіють один з одним, а також у макроскопічні магнітні властивості магнітовпорядкованих наноструктурних матеріалів.

Ще одна важлива тема, яка вивчається в рамках навчальної дисципліни «Наномагнетизм» – це спін-залежні ефекти в твердотільних наноструктурах. Коли створюються матеріали з просторово модульованими магнітними властивостями на наномасштабах, вони виявляють унікальні спін-залежні ефекти, яких немає в їх об’ємних аналогах. Ці ефекти виникають через квантове обмеження та співвідношення поверхні та об’єму, які стають значними в

нанометровому масштабі. Ви досліджуватимете такі явища, як гігантський магнітоопір (GMR) і тунельний магнітоопір (TMR), які зробили революцію в технологіях зберігання даних. Ці спін-залежні ефекти є основоположними для розробки спінтронних пристроїв, які використовують спін електронів на додаток до їхнього заряду для обробки та зберігання інформації.

Окрім статичних властивостей, динамічна поведінка спінів – спінова динаміка – є актуальною областю дослідження наномагнетизму. Цей курс охоплюватиме фундаментальні принципи, що керують спіновою динамікою, включаючи процеси прецесії, затухання та релаксації. Крім того, ви познайомитеся з квантовою теорією спінових хвиль або магнонів, яка описує колективне збудження спінів у матеріалі. Ці концепції мають ключове значення для вдосконалення нашого розуміння магнітних явищ і розробки майбутніх технологій, таких як магнонні пристрої, які спрямовані на використання спінових хвиль для обробки інформації.

Застосування наномагнетизму є широким і характеризується швидким прогресом: від підвищення продуктивності магнітних запам'ятовуючих пристроїв до розробки нових медичних діагностичних інструментів, при цьому маніпулювання магнітними властивостями на наномасштабах сприяє інноваціям у багатьох галузях. У цьому курсі ми розглянемо поточні та потенційні застосування, включаючи зберігання даних з високою щільністю, магнітні датчики тощо. Розуміння цих застосувань дасть вам уявлення про вплив наномагнетизму на технології та суспільство.

Наномагнетизм – це захоплююча та важлива сфера, яка поєднує квантову механіку та практичні застосування, пропонуючи безліч можливостей для відкриттів та інновацій. Завдяки цьому курсу ви отримаєте міцні базові знання принципів фізики спіну, дослідите інтригуючи явища, які виникають у наноструктурах, і оцініте широке застосування наномагнетизму. Добірка практичних задач в цьому навчальному посібнику має на меті допомогти вам глибше

ознайомитися з матеріалом, оскільки знання та навички розв’язання задач з наномагнетизму, в якому квантовий світ зустрічається з викликами сучасних технологій, будуть безцінні у вашій майбутній академічній та професійній діяльності.

Підсумовуючи зазначимо, що метою навчальної дисципліни є формування та закріплення у студентів навичок та вмінь щодо теорії та експериментального дослідження магнітних властивостей наноматеріалів, особливостей магнітних явищ в наноматеріалах, статичних і динамічних магнітних властивостей тонких плівок і наночастинок, та їх залежності від структури і морфології поверхні наноматеріалів, явищ, пов'язаних із спіном і процесом перевороту спіну.

Оцінювання відповідей на практичних роботах відбувається відповідно рейтингової системи оцінювання знань, що надана в силабусі дисципліни «Наномагнетизм».

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. Спін електрона

Задачі першого практичного заняття призначені для поглиблення вашого розуміння фундаментальних принципів і явищ, які відносяться до спінів та магнітних моментів електронів. Розв'язуючи ці задачі вправами, ви не тільки зміцните свої теоретичні знання, але й розвинете критичне мислення та навички вирішення проблем, які є важливими для академічного та професійного успіху в галузі наномагнетизму. Давайте розберемося зі значенням кожної задачі першого практичного заняття проблеми і чому опанування цих є вирішальним для засвоєння матеріалу навчальної дисципліни «Наномагнетизм».

Перша задача спрямована на обчислення різниці енергій електрона зі спіном вниз і спіном вгору в магнітному полі. Розуміння різниці енергії між спіновими станами в магнітному полі є фундаментальним для наномагнетизму. Ця задача познайомить вас з концепцією розщеплення Зеемана, яка є ключовою в різних застосуваннях, таких як магнітно-резонансна томографія (МРТ) і квантові обчислення.

Друга задача потребує здійснення розрахунку індукції магнітного поля, створеного спіновим магнітним моментом електрона. Ця задача допоможе вам зрозуміти концепцію магнітних моментів та їхній внесок у загальне магнітне поле в речовині. Розуміння того, як спіни електронів створюють магнітні поля, має важливе значення для розробки та оптимізації нанорозмірних магнітних матеріалів і пристроїв. Ці знання особливо актуальні при розробці рішень для зберігання даних високої щільності та магнітних датчиків.

Третя задача присвячена порівнянню енергії магнітної диполь-дипольної взаємодії з енергією кулонівської взаємодії. Порівняння цих двох типів взаємодії – це перший крок до повного розуміння взаємодій у магнітовпорядкованих матеріалах. Енергія магнітної диполь-дипольної взаємодії на декілька порядків величини менша за енергію

кулонівської взаємодії. Це порівняння ілюструє той факт, що магнітна диполь-дипольна взаємодія є занадто слабкою, щоб бути відповідальною за феро-, фери- або антиферомагнітне впорядкування.

Четверта задача присвячена перевірці виконання антикомутаційних співвідношень. Антикомутаційні співвідношення є ключовим аспектом квантової механіки, особливо в контексті ферміонів, таких як електрони. Оволодіння цією проблемою гарантує розуміння математичних основ квантової теорії, які є важливими для вивчення та моделювання поведінки електронів на квантовому рівні.

В п’ятій задачі доведення того, що оператор орбітального моменту не є інтегралом руху, підкреслює складності, пов’язані з релятивістськими ефектами в квантовій механіці. Ця задача покращує ваше розуміння того, як класичні концепції модифікуються в релятивістському режимі, що є критичним для поглиблених досліджень теоретичної фізики.

В шостій задачі необхідно показати, що оператор повного моменту кількості руху комутує з гамільтоніаном у теорії Дірака. Розуміння того, чому оператор повного імпульсу комутує з гамільтоніаном і є інтегралом руху в теорії Дірака, дає змогу зрозуміти закони збереження в релятивістській квантовій механіці. Ця проблема має важливе значення для розуміння симетрії та інваріантів у фізичних системах, які є фундаментальними поняттями.

В сьомій задачі необхідно довести, що проекція оператора спінового моменту не комутує з гамільтоніаном Дірака. Ця задача має таке ж значення, що ї п’ята задача.

У восьмій задачі вам запропоновано проаналізувати причини хибності класичних інтерпретацій поняття спіну електрона. Вивчення класичних інтерпретацій спіна електрона та їх обмежень допоможе вам зрозуміти необхідність квантової механіки. Ця проблема підкреслює труднощі класичних моделей у поясненні квантових явищ, підкреслюючи важливість квантово-механічного підходу до розуміння поведінки електронів.

У дев'ятій задачі необхідно довести неможливість постановки експерименту Штерна-Герлаха з вільними електронами. Експеримент Штерна-Герлаха є основоположним експериментом у квантовій механіці. Аналіз, чому не можна виміряти магнітний момент вільного електрона, дає глибоке розуміння принципів квантового вимірювання та ролі взаємодій у квантових системах. Ця проблема є важливою для розуміння експериментальних методів і фундаментальних обмежень вимірювання квантових властивостей.

Вирішення цих практичних завдань дасть вам ґрунтовне розуміння як теоретичних, так і практичних аспектів спіну та спінового магнітного моменту електронів. Кожна задача ретельно підібрана для закріплення ключових понять і принципів, що забезпечує комплексний досвід навчання. Опанувавши ці проблеми, ви будете добре підготовлені для вирішення передових задач у наномагнетизмі та зможете здійснювати інноваційні дослідженням і розробки у цій захоплюючій галузі.

Завдання до практичної роботи 1

1. Розрахувати різницю енергій електрона зі спіном вниз та зі спіном вгору в магнітному полі напруженістю H. Здійснити графічну візуалізацію отриманих результатів, наприклад, з застосуванням мови програмування python.
2. Розрахувати напруженість магнітного поля, створеного спіновим магнітним моментом електрона.
3. Порівняти енергію магнітної диполь-дипольної взаємодії двох електронів з енергією їх кулонівської взаємодії.
4. Переконатися, що виконуються антикомутаційні співвідношення $\hat{\alpha}_i\hat{\alpha}_j + \hat{\alpha}_j\hat{\alpha}_i = 2\delta_{ij}, \quad i, j = 1,2,3,4.$
5. Довести, що оператор орбітального моменту не є інтегралом руху в теорії Дірака:

6. Показати, що в релятивістській теорії Дірака оператор повного моменту кількості руху комутує з гамільтоніаном і є інтегралом руху.
7. Довести, що в релятивістській теорії Дірака проекція оператора спінового моменту не комутує з гамільтоніаном і не є інтегралом руху.

   $\hat{H} = c(\hat{\alpha}\vec{p}) + \beta mc^2 + e\varphi(r).$

   $\hat{s}_x = -\frac{1}{2}\hbar\hat{\alpha}_y\hat{\alpha}_z$

   $\hat{s}_y = -\frac{1}{2}\hbar\hat{\alpha}_z\hat{\alpha}_x$

   $\hat{s}_z = -\frac{1}{2}\hbar\hat{\alpha}_x\hat{\alpha}_y$
8. З класичної погляду спин електрона намагалися витлумачити як момент кількості руху, що виникає через обертання електрона навколо своєї осі. Електрон вважався кулькою, його маса визначалася за релятивістською формулою $\varepsilon = \mu c^2$, причому вважалося, що власна енергія електрона має суто електростатичне походження. Проаналізувати труднощі, що виникають за такого класичного тлумачення спина.
9. Показати, що методом Штерна і Герлаха виміряти магнітний момент електрона неможливо, якщо дослід проводиться з вільним електроном, а не з електроном в складі атома.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. Магнітний момент багатоелектронних атомів.

Спін-орбітальна взаємодія

Перша задача спрямована на надання наочної ілюстрації спін-орбітальної взаємодії в рамках класичної фізики. Розуміння спін-орбітальної взаємодії має важливе значення для розуміння того, як спін електрона поєднується з його орбітальним рухом навколо ядра. Хоча спін-орбітальна взаємодія за своєю суттю є квантово-механічним явищем, проілюструвавши її в класичних рамках, можна отримати інтуїтивне розуміння. Ця задача допоможе вам візуалізувати, як електрон, що рухається в електричному полі, створеному ядром, відчуває магнітне поле в системі спокою, яке потім взаємодіє з його магнітним моментом. Ця класична аналогія служить сходинкою для більш складних квантово-механічних процедур і допомагає вам зрозуміти значення спін-орбітального зв'язку у визначенні рівнів енергії та магнітних властивостей атомів та іонів.

Друга задача пропонує вам оцінити значення енергії спін-орбітальної взаємодії в атомі водню. Оцінка значення спін-орбітальної взаємодії передбачає розуміння зв'язку між кутовим моментом електрона та його магнітним моментом. Ця задача познайомить вас із кількісними аспектами спін-орбітального зв'язку, дозволяючи розрахувати його величину для різних атомних систем. Розв'язавши цю задачу, ви дізнаєтеся, як спін-орбітальна взаємодія впливає на тонку структуру спектральних ліній і магнітну поведінку матеріалів. Ці знання особливо важливі в таких галузях, як спектроскопія, фізика твердого тіла та матеріалознавство, де точний контроль і розуміння магнітних взаємодій на атомному рівні є вирішальними.

В третій задачі необхідно розрахувати магнітні моменти іонів. Розрахунок магнітних моментів іонів є фундаментальною проблемою,

яка поєднує теоретичні концепції з практичними застосуваннями. Магнітний момент іона визначається його електронною конфігурацією, зокрема кількістю неспарених електронів і їх спінами. Розв'язавши цю задачу, ви навчитеся визначати магнітні властивості різних іонів, що є важливим для прогнозування поведінки магнітних матеріалів.

Розв'язання завдань другого практичного заняття покращить ваше розуміння складних взаємодій, які керують магнітними властивостями матеріалів на наномасштабах. Проілюструвавши спін-орбітальну взаємодію, оцінивши її значення та розрахувавши магнітні моменти іонів, ви розвинете комплексний набір навичок, який є важливим як для теоретичних досліджень, так і для експериментальних досліджень наномагнетизму.

Завдання до практичної роботи 2

1. Надати ілюстрацію спін-орбітальної взаємодії в рамках класичної фізики.
2. Зробити оцінку величини спін-орбітальної взаємодії.
3. Розрахувати магнітні моменти іонів:

			$p(\text{calc}) = g[J(J+1)]^{1/2}$	$p(\text{exp})$,
Ce^{3+}	$4f^1 5s^2 p^6$	$^2F_{5/2}$	2.54	2.4
Pr^{3+}	$4f^2 5s^2 p^6$	$^3H_4$	3.58	3.5
Nd^{3+}	$4f^3 5s^2 p^6$	$^4I_{9/2}$	3.62	3.5
Pm^{3+}	$4f^4 5s^2 p^6$	$^5I_4$	2.68	—
Sm^{3+}	$4f^5 5s^2 p^6$	$^6H_{5/2}$	0.84	1.5
Eu^{3+}	$4f^6 5s^2 p^6$	$^7F_0$	0	3.4
Gd^{3+}	$4f^7 5s^2 p^6$	$^8S_{7/2}$	7.94	8.0
Tb^{3+}	$4f^8 5s^2 p^6$	$^7F_6$	9.72	9.5
Dy^{3+}	$4f^9 5s^2 p^6$	$^6H_{15/2}$	10.63	10.6
Ho^{3+}	$4f^{10} 5s^2 p^6$	$^5I_8$	10.60	10.4
Er^{3+}	$4f^{11} 5s^2 p^6$	$^4I_{15/2}$	9.59	9.5
Tm^{3+}	$4f^{12} 5s^2 p^6$	$^3H_6$	7.57	7.3
Yb^{3+}	$4f^{13} 5s^2 p^6$	$^2F_{7/2}$	4.54	4.5

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. Енергія феромагнетика. Доменні стінки

На практичному занятті 3 завдання зосереджені на енергії феромагнетика, розподілі намагніченості в доменних стінках і щільності поверхневої енергії цих доменних стінок.

В першій задачі потрібно записати повну енергію феромагнетика в сферичній системі координат для вектора намагніченості. Розуміння повної енергії феромагнетика є фундаментальним для вивчення магнітних матеріалів. Виразивши повну енергію в сферичних координатах, ви отримаєте уявлення про те, як орієнтація вектора намагніченості впливає на енергетичний стан системи. Ця задача допоможе вам оцінити роль анізотропії, обмінної взаємодії і зовнішніх магнітних полів у формуванні основного стану феромагнітних матеріалів. Оволодіння цією концепцією має вирішальне значення для проектування та оптимізації магнітних пристроїв і для розуміння таких явищ, як магнітний гістерезис і формування доменної структури феромагнетика.

В другій задачі необхідно розрахувати просторовий розподіл намагніченості в доменних стінках типу Блоха та Нееля у феромагнетику. Доменні стінки – це області, де змінюється напрямок намагніченості між сусідніми магнітними доменами. Доменні стінки типу Блоха та типу Нееля представляють дві різні конфігурації цих перехідних областей і відрізняються по енергії, а також мають різну товщину. Вирішивши цю проблему, ви навчитеся визначати розподіл намагніченості в цих доменних стінках, забезпечуючи глибше розуміння мікромагнітних структур. Ці знання необхідні для застосування в технологіях магнітного зберігання даних, де динаміка доменної стінки використовується для запису інформації.

В третій задачі потрібно розрахувати поверхневу густину енергії доменних стінок типу Блоха та Нееля у феромагнетику. Поверхнева

щільність енергії доменних стінок є вирішальним параметром, який впливає на розміри магнітних доменів. Розрахувавши щільність поверхневої енергії для доменних стінок типу Блоха та Нееля, ви отримаєте уявлення про витрати енергії, пов'язані з утворенням і рухом цих стінок. Ця проблема покращить ваше розуміння факторів, які визначають ширину доменної стінки та їх енергію, які важливі у пристроях магнітної пам'яті та спінтронних технологіях.

Завдання до практичної роботи 3

1. Записати повну енергію феромагнетика в сферичній системі координат для вектора намагніченості.
2. Отримати розподіл намагніченості в доменній стінці типу Блоха і типу Нееля в феромагнетику. Здійснити графічну візуалізацію отриманих результатів, наприклад, з застосуванням мови програмування python.
3. Розрахувати поверхневу густину енергії доменних стінок Блоха і типу Нееля в феромагнетику.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. Доменні структури в феромагнетиках

Практична робота 4 зосереджена на отриманні та застосуванні теоретичних концепцій для вирішення реальних задач феромагнетизму. Завдяки цим вправам ви покращите своє розуміння динамічних і статичних властивостей магнітних матеріалів.

В першій задачі необхідно розрахувати магнітостатичну енергію смугової доменної структури. Магнітостатична енергія – це енергія, що виникає внаслідок взаємодії магнітного поля, створеного намагніченістю в деякій частині зразка, з намагніченістю інших частин того самого зразка. Простими словами – це просто об'ємний інтеграл від виразу, пропорційного квадрату напруженості магнітостатичного поля, по всьому простору. Магнітостатична енергія може бути зменшена приблизно вдвічі, якщо намагнічений однодоменний зразок розділяється на два домени, намагнічені в протилежних напрямках.

В другій задачі потрібно обчислити рівноважний розмір магнітного домену для смугової доменної структури. Рівноважний розмір магнітних доменів визначається балансом між різними енергетичними вкладами, включаючи енергію доменних границь (яка складається з обмінної енергії, енергію магнітної анізотропії анізотропії) та магнітостатичну енергію доменної структури. Розрахувавши рівноважний розмір доменів у смуговій доменній структурі, ви дізнаєтеся, як ці енергії залежать від розміру домену, в результаті чого формується рівноважний розмір доменів. Це важливо для задач, де керування розміром домену може впливати на продуктивність магнітних пристроїв, наприклад у системах зберігання даних з високою щільністю.

Завдання до практичної роботи 4

1. Розрахувати магнітостатичну енергію смугової доменної структури.
2. Розрахувати рівноважний розмір магнітного домену для смугової доменної структури. Здійснити графічну візуалізацію енергії смугової доменної структури як функцію розміру домену, наприклад, з застосуванням мови програмування python.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. Лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця в феромагнетику

В задачі практичного заняття 5 необхідно вивести лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшица у феромагнетику. Рівняння Ландау-Ліфшица – це основне рівняння, яке описує динаміку намагніченості феромагнітних матеріалів. Лінеаризація цього рівняння дозволяє аналізувати невеликі відхилення вектору намагніченості від стану рівноваги, що важливо для розуміння збуджень лінійних спінових хвиль та динаміки намагніченості. Отримавши лінеаризовану форму рівняння Ландау-Ліфшиця, ви отримаєте уявлення про поведінку магнітних систем під впливом збурень, що має вирішальне значення для розробки пристроїв спінтроніки та магнітних датчиків.

Завдання до практичної роботи 5

1. Вивести лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця в феромагнетику.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 6. Тензор високочастотної магнітної сприйнятливості феромагнетика

Практична робота 6 зосереджена на обчисленні тензора високочастотної магнітної сприйнятливості феромагнетика, важливого поняття для розуміння динамічної магнітної реакції матеріалів. Це практичне завдання розширить ваші теоретичні знання та аналітичні навички, забезпечить вам глибше розуміння магнітної поведінки феромагнетиків в умовах впливу високочастотного магнітного поля.

Тензор високочастотної магнітної сприйнятливості описує, як феромагнітний матеріал реагує на прикладене магнітне поле, яке змінюється з часом. Ця відповідь має вирішальне значення для розуміння динамічних властивостей феромагнетиків, особливо в умовах впливу високочастотних магнітних полів.

Обчислення цього тензора передбачає розуміння основних фізичних механізмів, які керують динамікою намагніченості, зокрема:

- Прецесія Лармора: прецесія вектора намагніченості навколо зовнішнього магнітного поля (в феромагнетику навколо ефективного магнітного поля), яка є фундаментальною для динамічної поведінки магнітних матеріалів.
- Механізми демпфування: процеси, за допомогою яких енергія магнітної системи розсіюється, впливаючи на те, як швидко намагніченість повертається до рівноваги після збурення основного стану.
- Явище резонансу: умова (тобто частота), за якої намагніченість резонує в осцилюючому магнітному полі, що призводить до посиленого магнітного відгуку на певних частотах.

Розв’язавши цю задачу, ви отримаєте цінну інформацію про анізотропну природу магнітної сприйнятливості феромагнетиків. Ви навчитеся отримувати та інтерпретувати компоненти тензора високочастотної магнітної сприйнятливості, які змінюються залежно від орієнтації намагніченості та частоти прикладеного магнітного поля.

Ці знання мають вирішальне значення для розробки та оптимізації магнітних матеріалів і пристроїв, які працюють на високих частотах.

Розуміння та обчислення тензора високочастотної магнітної сприйнятливості є важливим з кількох причин:

- Застосування: багато сучасних технологій покладаються на матеріали зі специфічними магнітними властивостями. Знання тензора магнітної сприйнятливості допомагає розробляти матеріали, які відповідають вимогам цих застосувань.
- Характеристика матеріалу: тензор магнітної сприйнятливості надає важливу інформацію про внутрішні властивості феромагнітних матеріалів, такі як анізотропія та параметри затухання. Ця інформація має вирішальне значення для характеристики та вибору матеріалів для різних застосувань.
- Фундаментальні дослідження: вивчення високочастотного магнітного відгуку сприяє нашому розумінню фундаментальних фізичних процесів у феромагнетиках. Це допомагає досліджувати нові явища та розробляти теоретичні моделі, які описують динамічну поведінку магнітних систем.
- Інновації в спінтроніці: пристрої спінтроніки використовують спін електронів і їх спіновий магнітний момент для обробки та зберігання інформації. Розуміння високочастотної характеристики феромагнетиків життєво важливе для розробки спінтронних пристроїв, які ефективно працюють на високих швидкостях.

Обчислення тензора високочастотної магнітної сприйнятливості феромагнетика є складним, але корисним завданням, яке значно покращить ваше розуміння динамічних магнітних явищ. Опанувавши цю проблему, ви отримаєте необхідні навички та знання, які можна застосувати до широкого спектру передових технологій і дослідницьких напрямків у наномагнетизмі. Ця практична робота призначена для подолання розриву між теоретичними концепціями та практичним застосуванням, готуючи вас до інноваційної роботи в галузі магнітних матеріалів і пристроїв.

Завдання до практичної роботи 6

1. Розрахувати тензор високочастотної магнітної сприйнятливості феромагнетика. Здійснити графічну візуалізацію компонент тензора високочастотної магнітної сприйнятливості феромагнетика як функцію частоти динамічної компоненти магнітного поля, наприклад, з застосуванням мови програмування python.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 7. Спектр спінових хвиль в феромагнетику

Розуміння магнітних властивостей матеріалів є важливим як для фундаментальних досліджень, так і для технологічних застосувань. Як вже зазначалося, одним із ключових явищ у феромагнітних матеріалах є існування спінових хвиль, або магнонів, які є колективними збудженнями спінів електронів. Спінові хвилі є не лише ключовими для розуміння внутрішньої магнітної поведінки феромагнетиків, але також мають значний вплив на розвиток передових технологій, таких як спінтроніка та магнітна пам'ять. Метою даної практичної роботи є вивчення розрахунку спектра лінійних спінових хвиль у феромагнетику. Це завдання має вирішальне значення з кількох причин:

Технологічні застосування: контроль динаміки спінової хвилі в нанорозмірних магнітних елементах дуже важливий для реалізації широкого спектру нових магнонних пристроїв. Спінові хвилі мають потенційне застосування в галузі спінтроніки, де спін електронів, а не їх заряд, використовується для обробки та зберігання інформації. Розуміння динаміки спінових хвиль є вирішальним для проектування та оптимізації пристроїв, таких як магнонні кристали, які можуть маніпулювати спіновими хвилями для передових обчислювальних систем.

Розвиток дослідницьких навичок: участь у цій практичній задачі покращує аналітичні та обчислювальні навички студентів.

У цій практичній роботі ви розрахуєте спектр спінових хвиль за допомогою теоретичних моделей і візуалізуєте отримані результати з застосуванням обчислювальних засобів. Це включатиме вирішення рівнянь магнітостатики для спінових хвиль і аналіз результуючого спектру. До кінця цієї практичної роботи ви матимете більш чітке розуміння того, як спінові хвилі впливають на магнітні властивості феромагнетиків і як ці властивості можна використовувати в різних

технологічних застосуваннях. Цей практичний досвід озброїть вас знаннями та навичками, необхідними для вирішення більш складних проблем у сфері магнетизму та не тільки.

Завдання до практичної роботи 7

1. Розрахувати спектр спінових хвиль в феромагнетику. Здійснити графічну візуалізацію отриманих результатів, наприклад, з застосуванням мови програмування python.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 8. Граничні умови для динамічної компоненти вектора намагніченості на інтерфейсі між двома феромагнетиками

Завдання до практичної роботи 8

1. Вивести граничні умови для вектора намагніченості на інтерфейсі між двома феромагнетиками.
2. Записати граничні умови на інтерфейсі між двома феромагнетиками для динамічної компоненти вектора намагніченості лінійної спінової хвилі.
3. Розрахувати коефіцієнти проходження та відбиття спінової хвилі на інтерфейсі між двома феромагнетиками.
4. Довести неперервність нормальної компоненти густини потоку енергії спінової хвилі на інтерфейсі між двома феромагнетиками.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 9. Квантова теорія спінових хвиль. Процеси взаємодії між магнонами

Завдання до практичної роботи 9

1. Розрахувати форму третього порядку відносно бозевських операторів в гамільтоніані феромагнетика.
2. Розрахувати форму четвертого порядку відносно бозевських операторів в гамільтоніані феромагнетика.
3. Форма якого порядку відносно бозевських операторів в гамільтоніані феромагнетика описує ідеальний газ магнонів?
4. Форма якого порядку відносно бозевських операторів в гамільтоніані феромагнетика описує процеси злиття двох магнонів і розпаду магнона на 2 магнона?
5. Форма якого порядку відносно бозевських операторів в гамільтоніані феромагнетика описує процеси розсіяння двох магнонів?
6. Розрахувати ймовірності розпаду магнонів та ймовірності зворотного процесу.
7. Показати, що інтеграл зіткнень обертається в нуль для планківського розподілу магнонів.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

[1] Ю. М. Поплавко, О. В. Борисов, І. П. Голубєва, and Ю. В. Діденко, Магнетики в Електроніці: Курс Лекцій [Електронний Ресурс]: Навч. Посіб. Для Студ. Спеціальності 153 «Мікро- Та Наносистемна Техніка» Освітньої Програми «Мікро- Та Наноелектроніка» (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2021).

[2] Скіцько І.Ф. Вивчення магнітних властивостей феромагнетика у змінних магнітних полях Інструкція до лабораторної роботи [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спец. 125 “Кібербезпека”, 172 “Телекомунікації та радіотехніка” / І. Ф. Скіцько,; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,272 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 48 с.

[3] Papaefthymiou, G. C. Nanomagnetism An Interdisciplinary Approach: Boca, Raton, London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2022. 436с.

[4] Coey, J. M. D., Parkin, S. S. P. Handbook of Magnetism and Magnetic Materials: Dublin: Springer, 2021. 1714с.

[5] О. Ю. Горобець, С. В. Горобець, and К. Ю. Хахно, Мова Python Для Інженерних Та Наукових Задач [Електронний Ресурс]: Підруч. Для Здобувачів Ступеня Бакалавра Та Магістра За Спеціальностями 162 «Біотехнології Та Біоінженерія» Та 104 «Фізика Та Астрономія», 1-ше вид. (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2024).

[6] T. Shinjo, Nanomagnetism and Spintronics (Amsterdam, The Netherlands, 2009).

[7] B. Lenk, H. Ulrichs, F. Garbs, and M. Münzenberg, The Building Blocks of Magnonics, Phys. Rep. 507, 107 (2011).

[8] A. Barman, G. Gubbiotti, S. Ladak, A. O. Adeyeye, M. Krawczyk, J. Gräfe, C. Adelmann, S. Cotofana, A. Naeemi, V. I. Vasyuchka, B. Hillebrands, S. A. Nikitov, H. Yu, D. Grundler, A. V Sadovnikov, A. A. Grachev, S. E. Sheshukova, J.-Y. Duquesne, M. Marangolo, G. Csaba, W.

Porod, V. E. Demidov, S. Urazhdin, S. O. Demokritov, E. Albisetti, D. Petti, R. Bertacco, H. Schultheiss, V. V Kruglyak, V. D. Poimanov, S. Sahoo, J. Sinha, H. Yang, M. Münzenberg, T. Moriyama, S. Mizukami, P. Landeros, R. A. Gallardo, G. Carlotti, J.-V. Kim, R. L. Stamps, R. E. Camley, B. Rana, Y. Otani, W. Yu, T. Yu, G. E. W. Bauer, C. Back, G. S. Uhrig, O. V Dobrovolskiy, B. Budinska, H. Qin, S. van Dijken, A. V Chumak, A. Khitun, D. E. Nikonov, I. A. Young, B. W. Zingsem, and M. Winklhofer, The 2021 Magnonics Roadmap, J. Phys. Condens. Matter 33, 413001 (2021).

[9] P. Pirro, V. I. Vasyuchka, A. A. Serga, and B. Hillebrands, Advances in Coherent Magnonics, Nat. Rev. Mater. 6, 1114 (2021).

[10] X. S. Wang and X. R. Wang, Topological Magnonics, J. Appl. Phys. 129, 151101 (2021).

[11] A. Fernández-Pacheco, R. Streubel, O. Fruchart, R. Hertel, P. Fischer, and R. P. Cowburn, Three-Dimensional Nanomagnetism, Nat. Commun. 8, 15756 (2017).

[12] S. D. Bader, Colloquium : Opportunities in Nanomagnetism, Rev. Mod. Phys. 78, 1 (2006).

[13] A. Hirohata, K. Yamada, Y. Nakatani, I.-L. Prejbeanu, B. Diény, P. Pirro, and B. Hillebrands, Review on Spintronics: Principles and Device Applications, J. Magn. Magn. Mater. 509, 166711 (2020).

[14] E. C. Ahn, 2D Materials for Spintronic Devices, Npj 2D Mater. Appl. 4, 17 (2020).

[15] О. І. Товстолиткін, М. О. Боровий, В. В. Курилюк, and Ю. А. Куницький, Фізичні Основи Спінтроніки (Нілан-ЛТД, Вінниця, 2014).

[16] A. Kurenkov, S. Fukami, and H. Ohno, Neuromorphic Computing with Antiferromagnetic Spintronics, J. Appl. Phys. 128, 010902 (2020).

[17] M. Buchner, K. Höfler, B. Henne, V. Ney, and A. Ney, Tutorial: Basic Principles, Limits of Detection, and Pitfalls of Highly Sensitive SQUID Magnetometry for Nanomagnetism and Spintronics, J. Appl. Phys. 124, 161101 (2018).

[18] S. Bandyopadhyay and M. Cahay, Introduction to Spintronics (CRC Press Taylor & Francis Group, 2008).

[19] Ю. А. Куницький, В. В. Курилюк, Л. В. Однодворець, and І. Ю. Проценко, Основи Спінтроніки: Матеріали, Прилади Та Пристрої: Навчальний Посібник (Сумський державний університет, Суми, 2013).