

СИЛАБУС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

1. Загальна інформація про навчальну дисципліну

| | |
|--|--|
| Повна назва навчальної дисципліни | Фізичні та інформаційні основи наноелектроніки і спінтроніки |
| Повна офіційна назва закладу вищої освіти | Сумський державний університет |
| Повна назва структурного підрозділу | Факультет електроніки та інформаційних технологій. Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики |
| Розробник(и) | Денисов Станіслав Іванович |
| Рівень вищої освіти | Другий рівень вищої освіти, НРК – 7 рівень, QF-LLL – 7 рівень, FQ-EHEA – другий цикл |
| Семестр вивчення навчальної дисципліни | 20 тижнів протягом 3-го семестру |
| Обсяг навчальної дисципліни | Обсяг становить 5 кредитів ЄКТС, 150 годин, з яких 20 годин лекції, 20 годин практичні заняття та 110 годин самостійна робота. |
| Мова викладання | Українська |

2. Місце навчальної дисципліни в освітній програмі

| | |
|---|--|
| Статус дисципліни | Вибіркова навчальна дисципліна для всіх освітніх програм |
| Передумови для вивчення дисципліни | Передумови для вивчення відсутні |
| Додаткові умови | Додаткові умови відсутні |
| Обмеження | Обмеження відсутні |

3. Мета навчальної дисципліни

Мета курсу: Підвищення професійного рівня майбутніх фахівців в галузі магнетизму та формування їх здатності до самостійного розв'язання сучасних теоретичних і практичних проблем наноманетизму.

4. Зміст навчальної дисципліни

| |
|---|
| Модуль 1. Статичні властивості феромагнетиків |
| Тема 1 Класифікація магнетиків. Діа-, пара- та феромагнетики. Класифікація магнетиків за магнітною сприйнятливістю. Петля гістерезису феромагнетиків. Диференціальна сприйнятливість. Крива Столетова. |

Тема 2 Доменна структура феромагнетиків. Однодоменні частинки. Умова однодоменності.

Магнітостатична енергія. Доменна структура феромагнітних плівок. Смугова та лабіринтна доменні структури тонких плівок. Умова однодоменності феромагнітної кулі.

Тема 3 Температурні ефекти в феромагнетиках. Молекулярне поле Вейса. Функція Ланжевена. Закон Кюрі-Вейса.

Визначення поля Вейса. Розподіл локальної намагніченості феромагнетика за напрямками. Рівняння Ланжевена для середньої намагніченості. Умова існування ненульового розв'язку рівняння Ланжевена. Закон Кюрі-Вейса (магнітна сприйнятливості феромагнетиків при високих температурах).

Тема 4 Види внутрішньої енергії феромагнетиків. Енергетичний підхід до визначення розподілу намагніченості.

Обмінна енергія та її густина. Одновісні та кубічні феромагнетики. Густина енергії анізотропії одновісних і кубічних феромагнетиків. Магнітостатичне поле у випадках феромагнітної плівки та кулі. Густина енергії феромагнетика у зовнішньому магнітному полі. Визначення розподілу намагніченості у феромагнетиці шляхом мінімізації його повної енергії.

Тема 5 Блохівські та неслівські доменні границі. Розподіл намагніченості в нерухомих доменних границях.

Граничні умови для блохівської та неслівської доменних границь. Диференційні рівняння для визначення розподілу намагніченості в цих доменних границях. Розв'язок диференційних рівнянь. Розрахунок енергії блохівської та неслівської доменних границь.

Модуль 2. Динамічні властивості феромагнетиків

Тема 6 Рівняння руху намагніченості. Урахування дисипативних процесів.

Феноменологічне отримання рівняння Ландау-Ліфшиця для вектора намагніченості. Урахування дисипативних процесів шляхом введення додаткових релаксаційних членів у формі Гільберта та Ландау-Ліфшиця. Еквівалентність зазначених релаксаційних членів.

Тема 7 Рівняння Ландау-Ліфшиця у сферичних координатах. Динаміка блохівських та неслівських доменних границь.

Процедура отримання відповідних рівнянь Ландау-Ліфшиця. Рівняння руху блохівської та неслівської доменних границь при наявності зовнішнього магнітного поля. Критична величина зовнішнього поля. Динамічна структура цих границь, їх товщина, поверхнева енергія та ефективна маса. Аналіз залежності цих характеристик від величини зовнішнього магнітного поля.

Тема 8 Прецесійний рух намагніченості в однодоменних частинках. Однорідний феромагнітний резонанс у одновісних магнетиках.

Система рівнянь, що описує прецесійний рух намагніченості в однодоменних частинках. Частота прецесії. Лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця в обертовому магнітному полі. Однорідний феромагнітний резонанс. Частота резонансу.

| |
|--|
| <p>Тема 9 Спінові хвилі. Закони дисперсії спінових хвиль.</p> <p>Базове лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця для спінових хвиль в одновісних феромагнетиках. Закони дисперсії при відсутності та наявності зовнішнього магнітного поля. Роль параметра загасання.</p> |
| <p>Тема 10 Обертання ізотропних наночастинок в однорідному магнітному полі.</p> <p>Рівняння для механічного обертання сферичної наночастинок. Рівняння Ландау-Ліфшиця для намагніченості у випадку ізотропних наночастинок. Кутова швидкість обертання таких частинок.</p> |
| <p>Тема 11 Варіаційний метод в феромагнетизмі.</p> <p>Варіаційний метод визначення розподілу намагніченості в феромагнетиках.</p> |
| <p>Тема 12 Методи розв'язання базових рівнянь феромагнетизму.</p> <p>Методи розв'язання базових рівнянь, що описують статичні та динамічні властивості феромагнетиків.</p> |

5. Очікувані результати навчання навчальної дисципліни

Після успішного вивчення навчальної дисципліни здобувач вищої освіти зможе:

| | |
|-----|---|
| PH1 | Класифікувати магнітні матеріали за магнітною сприйнятливістю та використовувати поняття диференціальної сприйнятливості. |
| PH2 | Використовувати теорію Ланжевена для опису температурних ефектів в феромагнетиках. |
| PH3 | Сформулювати фізичні причини існування доменної структури феромагнетиків та описати їх типи. |
| PH4 | Описати енергетичний підхід до визначення розподілу намагніченості в доменній границі, провести відповідні розрахунки для блохівської та неелівської доменних границь. |
| PH5 | Отримати на феноменологічному рівні динамічне рівняння Ландау-Ліфшиця та описати за його допомогою динаміку блохівських та неелівських доменних границь. |
| PH6 | Проаналізувати за допомогою рівняння Ландау-Ліфшиця прецесійний рух намагніченості та явище однорідного феромагнітного резонансу, а також визначити закон дисперсії спінових хвиль. |
| PH7 | Визначити кутову швидкість обертання ізотропних наночастинок в обертовому магнітному полі. |
| PH8 | Використовувати варіаційний метод для визначення розподілу намагніченості в простіших доменних границях. |
| PH9 | Знаходити аналітичні розв'язки основних диференціальних рівнянь, що описують статичні та динамічні властивості феромагнетиків. |

7. Види навчальних занять та навчальної діяльності

7.1 Види навчальних занять

| |
|---|
| <p>Тема 1. Класифікація магнетиків. Діа-, пара- та феромагнетики.</p> |
| <p>Лк1 "Класифікація магнетиків" (денна) Класифікація магнетиків за магнітною сприйнятливістю. Петля гістерезису феромагнетиків. Диференційна сприйнятливість. Крива Столетова.</p> |
| <p>Тема 2. Доменна структура феромагнетиків. Однодоменні частинки. Умова однодоменності.</p> |
| <p>Лк2 "Доменна структура феромагнетиків." (денна) Магнітостатична енергія. Доменна структура феромагнітних плівок. Смогова та лабіринтна доменні структури тонких плівок. Умова однодоменності феромагнітної кулі.</p> |
| <p>Тема 3. Температурні ефекти в феромагнетиках. Молекулярне поле Вейса. Функція Ланжевена. Закон Кюрі-Вейса.</p> |
| <p>Лк3 "Температурні ефекти в феромагнетиках." (денна) Визначення поля Вейса. Розподіл локальної намагніченості феромагнетика за напрямками. Рівняння Ланжевена для середньої намагніченості. Умова існування ненульового розв'язку рівняння Ланжевена. Закон Кюрі-Вейса (магнітна сприйнятливість феромагнетиків при високих температурах).</p> |
| <p>Тема 4. Види внутрішньої енергії феромагнетиків. Енергетичний підхід до визначення розподілу намагніченості.</p> |
| <p>Лк4 "Види внутрішньої енергії феромагнетиків." (денна) Обмінна енергія та її густина. Одновісні та кубічні феромагнетики. Густина енергії анізотропії одновісних і кубічних феромагнетиків. Магнітостатичне поле у випадках феромагнітної плівки та кулі. Густина енергії феромагнетика у зовнішньому магнітному полі. Визначення розподілу намагніченості у феромагнетиці шляхом мінімізації його повної енергії.</p> |
| <p>Тема 5. Блохівські та неєлівські доменні границі. Розподіл намагніченості в нерухомих доменних границях.</p> |
| <p>Лк5 "Розподіл намагніченості в нерухомих доменних границях." (денна) Граничні умови для блохівської та неєлівської доменних границь. Диференціальні рівняння для визначення розподілу намагніченості в цих доменних границях. Розрахунок енергії блохівської та неєлівської доменних границь.</p> |
| <p>Тема 6. Рівняння руху намагніченості. Урахування дисипативних процесів.</p> |
| <p>Лк6 "Форми рівняння Ландау-Ліфшиця." (денна) Отримання рівняння Ландау-Ліфшиця для вектора намагніченості. Урахування дисипативних процесів шляхом введення додаткових релаксаційних членів у формі Гільберта та Ландау-Ліфшиця.</p> |
| <p>Пр1 "Урахування дисипативних процесів." (денна) Доведення еквівалентності рівнянь Ландау-Ліфшиця з релаксаційними членами у формі Гільберта та Ландау-Ліфшиця.</p> |

| |
|--|
| <p>Тема 7. Рівняння Ландау-Ліфшиця у сферичних координатах. Динаміка блохівських та неслівських доменних границь.</p> |
| <p>Лк7 "Рівняння Ландау-Ліфшиця у сферичних координатах." (денна) Процедура переходу від векторного рівняння Ландау-Ліфшиця до системи диференціальних рівнянь для азимутального та полярного кутів вектора намагніченості.</p> |
| <p>Пр2 "Динаміка блохівських та неслівських доменних границь." (денна) Рівняння руху блохівської та неслівської доменних границь при наявності зовнішнього магнітного поля. Критична величина зовнішнього поля. Динамічна структура цих границь, їх товщина, поверхнева енергія та ефективна маса. Аналіз залежності цих характеристик від величини зовнішнього магнітного поля.</p> |
| <p>Тема 8. Прецесійний рух намагніченості в однодомених частинках. Однорідний феромагнітний резонанс у одновісних магнетиках.</p> |
| <p>Лк8 "Прецесійний рух намагніченості в однодомених частинках." (денна) Система рівнянь, що описують прецесійний рух намагніченості в однодомених частинках. Частота прецесії.</p> |
| <p>Пр3 "Однорідний феромагнітний резонанс у одновісних магнетиках." (денна) Лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця в обертовому магнітному полі. Однорідний феромагнітний резонанс. Частота резонансу.</p> |
| <p>Тема 9. Спінові хвилі. Закони дисперсії спінових хвиль.</p> |
| <p>Лк9 "Спінові хвилі." (денна) Базове лінеаризоване рівняння Ландау-Ліфшиця для спінових хвиль в одновісних феромагнетиках.</p> |
| <p>Пр4 "Закони дисперсії спінових хвиль." (денна) Закони дисперсії при відсутності та наявності зовнішнього магнітного поля. Роль параметра загасання.</p> |
| <p>Тема 10. Обертання ізотропних наночастинок в однорідному магнітному полі.</p> |
| <p>Лк10 "Магнето-механічна динаміка наночастинок." (денна) Рівняння для механічного обертання сферичної наночастинок. Рівняння Ландау-Ліфшиця для намагніченості у випадку ізотропних наночастинок.</p> |
| <p>Пр5 "Вимушене обертання наночастинок." (денна) Визначення кутової швидкості обертання ізотропних частинок в обертовому магнітному полі.</p> |
| <p>Пр6 "Вимушене обертання наночастинок." (денна) Аналіз залежності кутової швидкості обертання ізотропних наночастинок від параметрів моделі.</p> |

| |
|---|
| Тема 11. Варіаційний метод в феромагнетизмі. |
| Пр7 "Блохівська доменна границя." (денна) Математична процедура отримання рівняння для розподілу намагніченості в блохівській доменній границі. |
| Пр8 "Неслівська доменна границя." (денна) Математична процедура отримання рівняння для розподілу намагніченості в неслівській доменній границі. |
| Тема 12. Методи розв'язання базових рівнянь феромагнетизму. |
| Пр9 "Методи розв'язання рівнянь теорії феромагнетизму 1." (денна) Класичний метод розв'язання диференціальних рівнянь. Метод розділення змінних (метод Фур'є). Приклади. |
| Пр10 "Методи розв'язання рівнянь теорії феромагнетизму 2." (денна) Метод інтегруючого множника. Метод підстановки. Приклади. |

7.2 Види навчальної діяльності

| | |
|-----|---|
| НД1 | Конспектування та опрацювання теоретичного матеріалу з наданими джерелами |
| НД2 | Розв'язання типових задач на практичних заняттях |
| НД3 | Робота з підручниками та релевантними інформаційними джерелами |

8. Методи викладання, навчання

Дисципліна передбачає навчання через:

| | |
|-----|---|
| МН1 | Інтерактивні лекції |
| МН2 | Навчальна дискусія / дебати |
| МН3 | Репродуктивний метод: розв'язання типових задач за зразком |
| МН4 | Евристичний метод: розв'язання нетипових задач шляхом додаткового опрацювання літератури та консультацій з викладачем |

1. Словесні методи (розповідь, пояснення, бесіда, дискусія). 2. Наочні методи (ілюстрування, демонстрування). 3. Практичні методи (вправи поточні та контрольні).

1. Комунікаційні навички, що розвиваються у процесі дискусій на заняттях. 2. Креативність, що розвивається розв'язанням нестандартних задач. 3. Абстрактне мислення, що розвивається через конкретику математичної об'єктивізації магнітних явищ.

9. Методи та критерії оцінювання

9.1. Критерії оцінювання

| Визначення | Чотирибальна національна шкала оцінювання | Рейтингова бальна шкала оцінювання |
|---|---|------------------------------------|
| Відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок | 5 (відмінно) | $90 \leq RD \leq 100$ |
| Вище середнього рівня з кількома помилками | 4 (добре) | $82 \leq RD < 89$ |
| Загалом правильна робота з певною кількістю помилок | 4 (добре) | $74 \leq RD < 81$ |
| Непогано, але зі значною кількістю недоліків | 3 (задовільно) | $64 \leq RD < 73$ |
| Виконання задовольняє мінімальні критерії | 3 (задовільно) | $60 \leq RD < 63$ |
| Можливе повторне складання | 2 (незадовільно) | $35 \leq RD < 59$ |
| Необхідний повторний курс з навчальної дисципліни | 2 (незадовільно) | $0 \leq RD < 34$ |

9.2 Методи поточного формативного оцінювання

| | |
|------|---|
| МФО1 | Опитування та усні коментарі викладача за його результатами |
| МФО2 | Обговорення та самокорекція виконаної роботи студентами |

9.3 Методи підсумкового сумативного оцінювання

| | |
|------|--|
| МСО1 | Поточні контрольні роботи (проміжний модульний контроль) |
| МСО2 | Оцінювання письмових робіт |

Контрольні заходи:

| 3 семестр | | 100 балів |
|--|------|-----------|
| МСО1. Поточні контрольні роботи (проміжний модульний контроль) | | 100 |
| | 2x50 | 100 |

Контрольні заходи в особливому випадку:

Якщо сумарний бал за дві модульні контрольні роботи менше 60, проводиться додаткова комплексна контрольна робота.

10. Ресурсне забезпечення навчальної дисципліни

10.1 Засоби навчання

| | |
|-----|---|
| ЗН1 | Мультимедіа, відео- і звуковідтворювальна, проєкційна апаратура (відеокамери, проєктори, екрани, смартдошки тощо) |
|-----|---|

10.2 Інформаційне та навчально-методичне забезпечення

| Основна література | |
|--------------------|--|
| 1 | Coeu J. M. D. and Parkin Stuart S. P. Handbook of Magnetism and Magnetic Materials / Springer, 2021. – 1648 p. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-63210-6) |

| | |
|-----------------------------|---|
| 2 | Поплавко Ю. М., Борисов О. В., Голубева І. П., Діденко Ю. В. Магнетики в електроніці. Курс лекцій. Навчальний посібник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 365 с. (https://ela.kpi.ua/handle/123456789/42341) |
| Допоміжна література | |
| 1 | Tsymbal E. Y. and Zutic I. Spintronics Handbook, Second Edition: Spin Transport and Magnetism (Three volume set) / CRC Press, 2019. – 2168 p. (https://www.bol.com/nl/nl/p/spintronics-handbook-second-edition-spin-transport-and-magnetism/9200000084886035/?bltgh=qz2inrp8ZsPO-HLYBgtGCA.2_22.25.ProductTitle) |
| 2 | Atxitia U., Hinzke D., and Nowak U. Fundamentals and applications of the Landau–Lifshitz–Bloch equation (Topical Review) / J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 50, 033003. (https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6463/50/3/033003) |