

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Кафедра фізичної оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан фізичного факультету



Руслан БОВК

30 *серпня* 2024 р.

Робоча програма навчальної дисципліни
Метаматеріали та їх дисперсійні властивості

Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	10 – природничі науки
Спеціальність	104 – фізика та астрономія
Освітня програма	фізика (освітньо-наукова програма)
Спеціалізація	
Вид дисципліни	за вибором
Факультет	фізичний

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження вченою радою фізичного факультету.

Протокол від 30.08.2024 р. № 9.

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

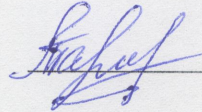
Тарапов Сергій Іванович, член-кореспондент НАНУ, професор, доктор фіз.-мат. наук, професор кафедри фізичної оптики

Маковецький Євген Дмитрович, канд. фіз.-мат. наук, доцент каф. фізичної оптики

Програму схвалено на засіданні кафедри фізичної оптики.

Протокол від 27.08.2024 р. № 1.

В. о. завідувача кафедри фізичної оптики



Сергій ТАРАПОВ

Програму погоджено з гарантом освітньо-наукової програми «Фізика».

Гарант освітньо-наукової програми

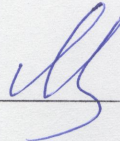


Юрій БОЙКО

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету.

Протокол від 28.08.2024 р. № .

Голова методичної комісії



Микола МАКАРОВСЬКИЙ

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Метаматеріали та їх дисперсійні властивості» складена відповідно до освітньої програми підготовки «магістр» зі спеціальності «104 – фізика та астрономія», освітньо-наукова програма «Фізика».

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Мета викладання навчальної дисципліни – оволодіти основоположними уявленнями про оптичні властивості метаматеріалів, про історію та сучасний стан експериментальних досліджень метаматеріалів та про відповідні теоретичні засади.

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни – вивчити матеріал щодо властивостей метаматеріалів у рамках робочої програми даного курсу та додаткового матеріалу, який рекомендовано вивчити самостійно.

Компетентності, що забезпечуються дисципліною:

- Здатність розв’язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії (ІК 1).
- Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності (ЗК 1).
- Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях (ЗК 2).
- Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології (ЗК 4).
- Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми (ЗК 5).
- Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями (ЗК 6).
- Здатність працювати в міжнародному контексті (ЗК 8).
- Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел (ЗК 9).
- Здатність дотримуватися принципів академічної доброчесності (ЗК 11).
- Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ (ФК 1).
- Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії (ФК 2).
- Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефаківцям (ФК 3).
- Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики та/або астрономії (ФК 4).
- Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв’язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях (ФК 5).
- Здатність встановлювати зв’язок між експериментальними і теоретичними результатами, здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних явищ, об’єктів і процесів, пов’язувати результати досліджень із сучасними фізичними та астрономічними теоріями і уявленнями (ФК 8).

- Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі в області фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси (ФК 9).
- Здатність проводити аналіз наукових результатів, отриманих в області фізики та астрономії (ФК 13).
- Здатність ефективно використовувати людські та матеріальні ресурси для вирішення фундаментальних та прикладних наукових завдань (ФК 14).

1.3. Кількість кредитів – 5.

1.4. Загальна кількість годин – 150.

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Нормативна / за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
1-й	
Семестр	
2-й	
Лекції	
36 год.	
Практичні, семінарські заняття	
24 год.	
Лабораторні заняття	
не передбачено навчальним планом	
Самостійна робота	
90 год.	
в тому числі індивідуальні завдання	
курсова робота: 20 год.	

1.6. Заплановані результати навчання

У результаті вивчення даного курсу студент повинен знати: основні теоретичні положення для опису оптичних властивостей метаматеріалів; головні відомі експериментальні результати досліджень метаматеріалів.

вміти: застосовувати здобуті знання для одержання, аналізу та пояснення експериментальних даних при дослідженнях оптичних метаматеріалів.

Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною:

- Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної і експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем (ПРН 1).
- Проводити експериментальні та/або теоретичні дослідження з фізики та астрономії, аналізувати отримані результати в контексті існуючих теорій, робити аргументовані висновки (включаючи оцінювання ступеня невизначеності) та пропозиції щодо подальших досліджень (ПРН 2).

- Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності (ПРН 4).
- Здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних фізичних та/або астрономічних явищ, об'єктів і процесів (ПРН 5).
- Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій в області фізики та/або астрономії (ПРН 6).
- Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напрямку фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді (ПРН 7).
- Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи з колегами (ПРН 9).
- Відшуковувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані (ПРН 10).
- Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач (ПРН 11).

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Штучні діелектрики та штучні магнетики

Тема 1. Штучні діелектрики та штучні магнетики.

Розділ 2. Рівняння Максвелла. Матеріальні параметри природних та штучних середовищ

Тема 1. Рівняння Максвелла. Матеріальні параметри природних та штучних середовищ.

Розділ 3. Фізична природа магнітної та діелектричної проникності

Тема 1. Магнітна проникність, її дисперсія. Джерела дисперсії. Магнітна проникність поблизу електронного спінового резонансу. Феноменологічне рівняння Блоха для магнітного моменту (спіну). Розв'язання рівняння Блоха.

Тема 2. Фізична природа діелектричної проникності. Дисперсія діелектричної проникності. Закон Друде для природних провідників і діелектриків. Закон Друде для природних матеріалів з урахуванням втрат та без їх урахування. Закон Друде для метаматеріалів.

Розділ 4. Дисперсія магнітної та діелектричної проникності метаматеріалів

Тема 1. Частотна та просторова дисперсія магнітної та діелектричної проникності метаматеріалів.

Тема 2. Області негативних та позитивних значень діелектричної та магнітної проникності.

Розділ 5. Фотонні кристали

Тема 1. Поняття зонної структури спектра у фотонних та природних кристалах. Формування зонної структури енергетичного спектра природного матеріалу. Задача Кроніга–Пенні. Дисперсійне рівняння для хвилі де Бройля.

- Тема 2.* Формування зонної структури частотного спектра фотонного кристала. Просторово обмежений та необмежений фотонний кристал.
- Тема 3.* Метод матриць передачі. Хвиля Блоха в одновимірному фотонному кристалі. Дисперсійне рівняння для фотонного кристала як аналог дисперсійного рівняння для хвилі де Бройля.
- Тема 4.* Магнітофотонний кристал. Звичайні та незвичайні хвилі.
- Тема 5.* Стан Тамма, його природа. Задача Ліфшиця–Пекара. Поверхневі стани (як найзагальніший випадок стану Тамма) у спектрі природного кристала.
- Тема 6.* Поверхневі стани у спектрі фотонного кристала як електродинамічний аналог станів Тамма у природному кристалі.
- Тема 7.* Вісесиметричний фотонний кристал. Збільшення ефекту Фарадея.
- Тема 8.* Дефекти у фотонному кристалі. Спотворення спектра, дефектні моди. Керування дефектними модами у магнітоактивному (електроактивному) фотонному кристалі.
- Тема 9.* Явище проходження світла крізь структуру поза межних отворів. Поза межний хвилевід. Принципи металооптики (проходження крізь тонкі пластини, явище просвітлення).
- Тема 10.* Планарні фотонні кристали
- Тема 11.* Аналітичне рішення задачі про планарні фотонні кристали
- Тема 12.* Чисельне рішення задачі про планарні фотонні кристали. Умови обмеження рішення
- Тема 13.* Неоднорідні та однорідні планарні фотонні кристали

Розділ 6. Лівобічні метаматеріали

- Тема 1.* Загальні уявлення про природу від'ємної рефракції. Граничний перехід від фотонного кристала до метаматеріалу у вигляді «суцільного середовища».
- Тема 2.* Від'ємна діелектрична проникність і її природа у: а) природних середовищах; б) штучних середовищах.
- Тема 3.* Від'ємна магнітна проникність і її природа у: а) природних середовищах; б) штучних середовищах.
- Тема 4.* Формування зворотної хвилі в одновимірному шаруватому метаматеріалі.
- Тема 5.* Фізичне обґрунтування появи зворотної хвилі в одновимірному метаматеріалі.
- Тема 6.* Приклади чисельного розв'язання задачі про формування зворотної хвилі.
- Тема 7.* Лівобічні середовища та перехід фотонних кристалів у такі середовища.
- Тема 8.* Негативна рефракція.

Розділ 7. Енантіоморфні / Кіральні / Гіротропні матеріали

- Тема 1.* Оптична активність у фізиці твердого тіла. Гіротропія. Плоско- та циркулярно поляризовані хвилі.
- Тема 2.* Магнітна гіротропія. Ефект Фарадея. Загальне та відмінне в ефекті Фарадея для природних середовищ та штучних (метаматеріалів).
- Тема 3.* Фотонний кристал з лівобічними елементами.
- Тема 4.* Формування зонної структури в фотонному кристалі з лівобічними елементами.
- Тема 5.* Магнітофотонний кристал з лівобічними елементами.
- Тема 6.* Формування зонної структури в магнітофотонному кристалі з лівобічними елементами.
- Тема 7.* Способи підвищення ефекту Фарадея в лівобічному киральному метаматеріалі.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
л		п	лаб.	інд.	с. р.	л		п	лаб.	інд.	с. р.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Штучні діелектрики та штучні магнетики												
Тема 1	5	1				4						
Разом за розділом 1	5	1				4						
Розділ 2. Рівняння Максвелла. Матеріальні параметри природних та штучних середовищ												
Тема 1	5	1				4						
Разом за розділом 2	5	1				4						
Розділ 3. Фізична природа магнітної та діелектричної проникності												
Тема 1	5	1				4						
Тема 2	5	1				4						
Разом за розділом 3	10	2				8						
Розділ 4. Дисперсія магнітної та діелектричної проникності метаматеріалів												
Тема 1	11	2	2			7						
Тема 2	1	1										
Разом за розділом 4	12	3	2			7						
Розділ 5. Фотонні кристали												
Тема 1	5	1				4						
Тема 2	7	1	2			4						
Тема 3	5	1				4						
Тема 4	5	1				4						
Тема 5	3	1	2									
Тема 6	1	1										
Тема 7	1	1										
Тема 8	3	1	2									
Тема 9	1	1										
Тема 10	1	1										
Тема 11	3	1	2									
Тема 12	3	1	2									
Тема 13	3	1	2									
Разом за розділом 5	41	13	12			16						
Розділ 6. Лівобічні метаматеріали												
Тема 1	5	1				4						
Тема 2	5	1				4						
Тема 3	7	1	2			4						
Тема 4	5	1				4						
Тема 5	1	1										
Тема 6	3	1	2									
Тема 7	3	1	2									
Тема 8	3	1	2									
Разом за розділом 6	32	8	8			16						
Розділ 7. Енантіоморфні / Кіральні / Гіротропні матеріали												
Тема 1	5	1				4						

Тема 2	7	1	2			4					
Тема 3	9	2				7					
Тема 4	1	1									
Тема 5	1	1									
Тема 6	1	1									
Тема 7	1	1									
Разом за розділом 7	25	8	2			15					
Індивідуальні завдання											
Курсова робота	20					20					
Усього годин	150	36	24			90					

4. Теми семінарських занять

№ з/п	Теми	Кільк. годин
1	Діапазони негативних та позитивних значень діелектричної та магнітної проникності	2
2	Формування зонної структури частотного спектра фотонного кристала	2
3	Поверхневі стани (як випадок стану Тамма) у спектрах кристалів	2
4	Дефекти у фотонному кристалі	2
5	Від'ємна діелектрична проникність	2
6	Магнітна гіротропія	2
7	Дефектні моди у фотонному кристалі	2
8	Від'ємна магнітна проникність	2
9	Стани Тама у спектрах кристалів	2
10	Від'ємна магнітна гіротропія	2
11	Керування від'ємною магнітною гіротропією магнітним полем	2
12	Поверхневі хвилі	2
	Разом	24

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Ознайомитись із типами штучних діелектриків та штучних магнетиків	4
2	Ознайомитись із впливом матеріальних параметрів середовищ на розв'язання рівнянь Максвелла	4
3	Ознайомитись із розв'язанням рівняння Блоха для магнітного моменту.	4
4	Ознайомитись із законом Друде для природних провідників, діелектриків та метаматеріалів	4
5	Ознайомитись із діапазонами негативних та позитивних значень діелектричної та магнітної проникності	7
6	Ознайомитись із засадами формування зонної структури частотного спектра фотонного кристала	8
7	Ознайомитись із методом матриць передачі	4
8	Ознайомитись із звичайними та незвичайними хвилями у магнітофотонному кристалі	4
9	Ознайомитись із станами Тамма та їхньою природою	8
10	Ознайомитись із ефектом Фарадея у фотонному кристалі	4

11	Ознайомитись із спотвореннями спектра та дефектними модами у фотонному кристалі	4
12	Ознайомитись із явищами оптичної активності, гіротропії	8
13	Ознайомитись із властивостями лівобічних кіральних метаматеріалів	7
14	Індивідуальне завдання (курсова робота)	20
	Разом	90

6. Індивідуальні завдання

№ з/п	Теми курсових робіт
1	Закон Друде для природних провідників і діелектриків
2	Закон Друде для метаматеріалів
3	Зонна структура частотного спектра фотонного кристала
4	Дисперсійне рівняння для фотонного кристала
5	Магнітофотонний кристал
6	Поверхневі стани у спектрі фотонного кристала
7	Проходження світла крізь структуру поза межних отворів і поза межні хвилеводи
8	Від'ємна рефракція
9	Від'ємні діелектрична та магнітна проникність
10	Формування зворотної хвилі в одновимірному шаруватому метаматеріалі
11	Ефект Фарадея для природних середовищ та метаматеріалів
12	Лівобічний кіральний метаматеріал

7. Методи навчання

1. Проведення лекційних занять
2. Проведення семінарських занять
3. Самостійна робота студентів з вивчення додаткових матеріалів з курсу

8. Методи контролю

1. Поточний контроль при проведенні семінарських занять
2. Дві контрольні роботи на протязі семестру
3. Індивідуальне завдання: курсова робота
4. Екзамен

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання					Екзамен	Сума
Поточний контроль на заняттях	Контроль-на робота 1	Контроль-на робота 2	Індивідуальне завдання (курсова робота)	Разом		
24	10	10	16	60	40	100

Досягнення студентів з навчальної дисципліни «Метаматеріали та їх дисперсійні властивості» оцінюються в балах, загальна сума яких становить 100. Вона складається з 60 балів, які студент може отримати протягом семестру, та 40 балів, які може отримати при проходженні підсумкового контролю у вигляді екзамену.

60 балів протягом семестру – це 24 бали, що нараховуються при проведенні семінарських занять, 20 за контрольні роботи (по 10 за кожену) та 16 за виконання індивідуального завдання (курсової роботи).

Бали при проведенні семінарських занять нараховуються за успішне виконання поставлених завдань: або це коректні відповіді на усні запитання, поставлені викладачем за темою даного семінарського заняття чи попередніх лекцій, або це успішне розв'язання поставленої задачі. Передбачається по 1 балу за кожену годину семінарського заняття, тобто 24 бали загалом.

Курсова робота є індивідуальним завданням, яке студент виконує на протязі семестру і надає для оцінювання перед екзаменом. Курсові роботи оцінюються за шкалою 0–16 балів виходячи з їх відповідності завданням і повноти виконання.

Екзамен проводиться у письмовому вигляді шляхом написання студентами відповідей на запитання екзаменаційного білету. Максимальною оцінкою за екзаменаційну роботу є 40 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка	
	для чотирирівневої шкали оцінювання	для дворівневої шкали оцінювання
90–100	відмінно	зараховано
70–89	добре	
50–69	задовільно	
1–49	незадовільно	не зараховано

10. Рекомендована література

Основна література

1. Introduction to Solid State Physics, Ch. Kittel, J.Wiley& Sons, 8th ed. (2005).
2. Classical Electrodynamics, J. Jackson, (1962).
3. Nonlinear, Tunable and Active Metamaterials, I.Shadrivov, M.Lapine, Yu.Kivshar, Springer (2015).
4. An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics, C.Simovski, S.Tretyakov, Cambridge Univ, (2020).
5. Introduction to Photonic and Phononic Crystals and Metamaterials , Arthur R. McGurn, by Morgan & Claypool, (2020).
6. Chiral Nanophotonics. Chiral Optical Properties of Plasmonic, M.Schäferling, Springer, (2017).
7. Course of theoretical physics, v5, Landau–Lifshitz. Electrodynamics of continuous media. Pergamon, (1984).
8. S.Serdukiyov, I Senchenko, S Tretyakov, A Sihvola Electromagenitic of Bi-anisotropic Materials: Theory and Applications A, Gordon and Breach Science Publishers, 2001, 312 p.

9. Ricardo Marques, Ferran Martin, Mario Sorolla *Metamaterials with Negative Parameters, Theory, Design, and Microwave Applications*, – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2008. – 315 p.

Допоміжна література

1. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J. // *J. Phys.: Condens Matter*. - 1998. - V.10. - P. 4785-4809.
2. *Optical Metamaterials Fundamentals and Applications*, Wenshan Cai, Vladimir Shalaev, Springer Science+Business Media, LLC 2010, 206P.
3. *Microwaves in Dispersive Magnetic Composite Media (Review Article)*, S.I. Tarapov, and D.P. Belozorov, *Low Temperature Physics (AIP Publ.)*, 2012, v.38, p.603-625.
4. Resonant features of planar Faraday metamaterial with high structural symmetry. Study of properties of a 4-fold array of planar chiral rosettes placed on a ferrite substrate, Sergey Y. Polevoy, Sergey L. Prosvirnin, Sergey I. Tarapov, and Vladimir R. Tuz, *The European Physical Journal Applied Physics*, 2013, v.61, N 03, pp.30501(1-7).
5. Pendry J.B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. // *Phys. Rev. Lett.* - 2000.-V.85.- P.3966-3969.
6. Pendry J. A chiral route to negative refraction // *Science*. 2004. - V. 306. - P. 1353- 1955.
7. *Nonlinearities in Periodic Structures and Metamaterials*, C.Denz, S.Flach, Yu.Kivshar, Springer (2010).
8. *Theory and Phenomena of Metamaterials*, Edited by F. Capolino, by Taylor and Francis Group, LLC, (2009).
9. *Magnetic Resonance for Optoelectronic Materials Investigating*, S.I. Tarapov, Yu.P. Machekhin, and A.S. Zamkovoy, Collegium, Kharkov (2008).