

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізичної оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Декан фізичного факультету

Руслан БОВК

2024 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Оптика тонких плівок

Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	10 – природничі науки
Спеціальність	104 – фізика та астрономія
Освітня програма	фізика (освітньо-професійна 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.

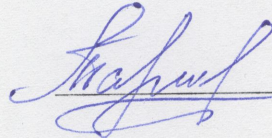
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

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.

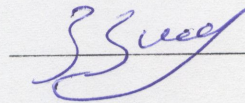
В. о. завідувача кафедри фізичної оптики



Сергій ТАРАПОВ

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

Гарант освітньо-професійної програми

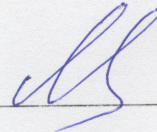


Золтан ЗИМАН

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету.

Протокол від 28.08.2024 р. № 1.

Голова методичної комісії



Микола МАКАРОВСЬКИЙ

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни «Оптика тонких плівок» складена відповідно до освітньої програми підготовки «магістр» зі спеціальності «104 – фізика та астрономія», освітньо-професійна програма «Фізика».

1. Опис навчальної дисципліни

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

1.2. Основні завдання вивчення дисципліни – вивчити матеріал щодо оптичних властивостей тонких плівок 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 проведення досліджень на відповідному рівні (ЗК 3).
- 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 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 планувати й здійснювати теоретичні та/або експериментальні дослідження фізичних або астрономічних об'єктів, явищ і процесів на основі розуміння і навичок практичного використання спеціалізованих знань фізики, астрономії та астрофізики, відповідно до обраної спеціалізації, а також спеціальних математичних методів та інформаційних технологій (ФК 7).
- 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 робити наукові узагальнення та осмислення результатів наукових досліджень, співвідносити висновки із положеннями сучасних фізичних або астрономічних теорій (ФК 9).
- Здатність представляти результати досліджень професійній та непрофесійній аудиторії (ФК 10).

1.3. Кількість кредитів – 3.

1.4. Загальна кількість годин – 90.

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

1.6. Заплановані результати навчання

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

вміти: застосовувати здобуті знання для проведення експериментальних і теоретичних досліджень оптичних властивостей тонких плівок.

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).
- Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємокорисно спілкуючись із колегами (ПРН 9).
- Відшукувати 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. Вступ. Основи феноменологічної теорії оптичних властивостей тонких плівок

Тема 1. Роль оптичних методів дослідження. Тонкі плівки у науці і техніці. Відбивання і заломлення світла на межі розділу двох середовищ. Нормальне та похиле падіння світла. Прозорі та поглинаючі середовища. Формули Френеля. Формула Бера. Фазові зсуви, що виникають при відбиванні світла від середовища, що поглинає. Різниця фаз. Неоднорідні хвилі, структура електромагнітної хвилі при повному внутрішньому відбиванні і при входженні до середовища, що поглинає.

Розділ 2. Інтерференція світла в тонких плівках

Тема 1. Багатопротенева інтерференція. Формули Ейрі. Застосування формул Ейрі до тонких плівок. Прозорі плівки на прозорій підкладці і на підкладці, що поглинає. Формули Мурмана. Формули для фазових зсувів, що виникають при відбиванні від тонких плівок. Наближення формули для дуже тонких плівок. Співвідношення Вольтера.

Розділ 3. Методи визначення оптичних констант і товщин тонких плівок

Тема 1. Вимірювання товщин тонких плівок за допомогою ліній Фізо. Лінії рівного хроматичного порядку. Вимірювання товщин тонких плівок за допомогою ліній рівного хроматичного порядку. Графічний метод вимірювань. «Ноніусний» ефект. Вимірювання дисперсії показника заломлення діелектричних плівок. Величина та знак стрибка фази, який виникає при відбиванні світла від металу. Дисперсія фазового зсуву. Розщеплення ліній рівного хроматичного порядку при похилому падінні світла. Інтерференція світла в пелюстку слюди. Вимірювання дисперсії подвійного променезаломлення.

Тема 2. Вимірювання коефіцієнтів відбивання і пропускання. Устрій і принцип роботи спектрофотометрів. Спеціальні приставки. Підвищення точності визначення коефіцієнтів відбивання та пропускання. Багаторазове відбивання світла від двох ідентичних зразків. Пропускання стопи тонких ідентичних плівок. Графічні методи визначення товщин і дисперсії оптичних сталих тонких

прозорих і поглинаючих плівок на прозорій підкладці. Формули для коефіцієнтів відбивання в мінімумі від системи діелектрична плівка–метал. Визначення фактора заповнення пористих діелектричних плівок.

Тема 3. Основні співвідношення металооптики. Схеми вимірювань по Друде. Методи вимірювань оптичних сталей по відбиванню. Метод Евері. Вимірювання R при двох кутах падіння. Метод Носкова кіл, які перетинаються. Межі застосування методів Евері і Носкова. Методика вимірювань. Метод Бітті. Метод вимірювання оптичних сталей, заснований на аналізі еліптично поляризованого світла. Метод Друде. Метод Обрайенна. Метод відновлення лінійної поляризації при багатокутному відбиванні. Метод відновлення лінійної поляризації з використанням у якості компенсатора призм повного внутрішнього відбивання. Еліпсометричний метод вимірювань показників заломлення і товщин тонких плівок на металевій підкладці. Багатокутна еліпсометрія. Точні інтерференційні формули для різниці фаз і азимута відновлення поляризації.

Розділ 4. Елементи інтегральної оптики

Тема 1. Геометрична оптика плоских планарних хвилеводів. Заломлення, відбивання і фазові зсуви для ТЕ- та ТМ-поляризації. Хвилеводні моди. Ефективні показники заломлення і товщина хвилеводів. Ортогональність мод. Моди плоского планарного хвилеводу. Смушковаті хвилеводи прямокутного перерізу. Метод виготовлення хвилеводів. Інтегрально-оптичні елементи зв'язку.

Розділ 5. Багатошарові інтерференційні покриття

Тема 1. Фізичні основи просвітлення. Спектральні та товщинні залежності коефіцієнтів відбивання. Вплив показника заломлення плівки на коефіцієнт відбивання просвітленої поверхні. Залежність оптичних властивостей просвітленої поверхні від кута падіння світла. Фізичні властивості просвітлених поверхонь. Рекурентні формули Власова для коефіцієнтів відбивання, пропускання і фазових зсувів багатошарових інтерференційних покриттів. Просвітлення нанесенням двошарових плівок. Діаграма Шустера. Ахроматичні покриття.

Тема 2. Матриці для шаруватого середовища (матриця показників, фазова матриця, матриці заломлення й інтерференції). Матриця багатошаровика як добуток матриць компонент. Обернення порядку шарів у багатошаровику. Симетричні багатошаровики. Коефіцієнт відбивання і пропускання багатошаровика. Однорідні й неоднорідні плівки. Багатошаровики з періодичною структурою. Степінь унімодулярної матриці. Структура спектра відбивання періодичного покриття. Області високого відбивання і прозорості. Огинаючі побічних екстремумів. Еквівалентні параметри симетричних і несиметричних систем. Ефективні границі. Двокомпонентні періодичні покриття і їх зв'язок із сумарною оптичною товщиною покриття. Особливості поведінки оптичних характеристик багатошаровиків при похилому падінні світла і їхнього опису за допомогою ефективних параметрів.

Тема 3. Високівідбиваючі чвертьхвильові багатошаровики. Ширина області високого відбивання, її залежність від співвідношення показників заломлення шарів. Значення коефіцієнтів відбивання і стрибків фази для резонансної довжини хвилі. Збільшення і зменшення ширини області високого відбивання, багатошаровики з вибіркою відбивною здатністю. Розщеплення смуги високого відбивання при похилому падінні світла.

- Тема 4.* Вторинні максимуми відбивання. Методи мінімізації коефіцієнтів відбивання вторинних максимумів. Метод еквівалентних шарів. Метод ефективних меж. Машинні методи синтезу. Поєднання аналітичних і машинних методів синтезу покриттів. Короткохвильові і довгохвильові фільтри, що відрізають. Спектророздільник. Смогові фільтри.
- Тема 5.* Вузькосмугові інтерференційні світлофільтри типу Фабрі–Перо, їхні оптичні характеристики. Напівширина смуги пропускання і максимальне пропускання в смузі. Форма смуги пропускання і методи зменшення її напівширини. Фільтри зі смугою пропускання, яка не розщеплюється при похилому падінні світла. Контрастні фільтри Широкозмугові фільтри з П-подібною смугою пропускання.
- Тема 6.* Методи контролю товщин шарів багат шаровиків у процесі їхнього осадження у вакуумі. Наскрізний екстремальний фотометричний метод контролю оптичних товщин шарів. Підвищення відтворюваності спектральних залежностей. Моделювання процесу фотометричного контролю. Розподіл оптичних товщин шарів для різних типів покриттів. Особливості контролю при осадженні вузькосмугових, контрастних, відрізаючих фільтрів і спектророзподільників.

Розділ 6. Оптичні властивості острівкових металевих плівок

- Тема 1.* Оптичні властивості тонких острівкових плівок благородних металів, осаджених на діелектричні підкладки при кімнатній і високій температурі. Коефіцієнти відбивання і пропускання, фазові зсуви. Спектральна залежність дійсної та уявної частини комплексної діелектричної проникності. Аномальне поглинання – плазмовий резонанс у гранулярних плівках. Мікротеорія Максвелл-Гарнета, Давида–Шопена, Хампе і їх модифікація. Залежність сил осциляторів смуг плазмового поглинання від діелектричної сталої навколишнього середовища. Розщеплення смуги плазмового поглинання на s- і p-складову при похилому падінні світла. Вплив смуг міжзонного поглинання на плазмовий резонанс. Поверхневі плаزمони, збуджені фотонами в гранулярних плівках срібла і золота.

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. Вступ. Основи феноменологічної теорії оптичних властивостей тонких плівок												
Тема 1	7	2				5						
Разом за розділом 1	7	2				5						
Розділ 2. Інтерференція світла в тонких плівках												
Тема 1	7	2				5						
Разом за розділом 2	7	2				5						
Розділ 3. Методи визначення оптичних констант і товщин тонких плівок												
Тема 1	7	2				5						
Тема 2	7	2				5						
Тема 3	7	2				5						
Разом за розділом 3	21	6				15						

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 4. Елементи інтегральної оптики												
Тема 1	7	2				5						
Разом за розділом 4	7	2				5						
Розділ 5. Багатошарові інтерференційні покриття												
Тема 1	7	2				5						
Тема 2	7	2				5						
Тема 3	6	1				5						
Тема 4	6	1				5						
Тема 5	7	2				5						
Тема 6	7	2				5						
Разом за розділом 5	40	10				30						
Розділ 6. Оптичні властивості острівкових металевих плівок												
Тема 1	8	2				6						
Разом за розділом 6	8	2				6						
Усього годин	90	24				66						

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

Семінарські (практичні, лабораторні) заняття навчальним планом не передбачені.

5. Завдання для самостійної роботи

№ з/п	Види, зміст самостійної роботи	Кількість годин
1	Ознайомитись із теоретичним описом структури електромагнітної хвилі при повному внутрішньому відбиванні	5
2	Ознайомитись із застосуванням формул Ейрі при обчисленні оптичних характеристик тонких плівок	5
3	Ознайомитись із методом вимірювання товщин тонких плівок за допомогою ліній рівного хроматичного порядку	3
4	Ознайомитись із розщепленням ліній рівного хроматичного порядку при похилому падінні світла	2
5	Ознайомитись із устроєм і принципом роботи спектрофотометрів	2
6	Ознайомитись із графічними методами визначення товщин і дисперсії оптичних сталих тонких прозорих і поглинаючих плівок на прозорій підкладці	3
7	Ознайомитись із методами вимірювань оптичних сталих по відбиванню. Методи Евері, Носкова, Бітті	3
8	Ознайомитись із еліпсометричними методами вимірювань показників заломлення і товщин тонких плівок	2
9	Ознайомитись із теоретичним описом хвилеводних мод планарного хвилеводу	5
10	Ознайомитись із оптичними властивостями просвітленої поверхні при використанні одношарових та двошарових покриттів, що просвітлюють	5

11	Ознайомитись із матричним методом обчислення оптичних характеристик багат шарових покритть	3
12	Ознайомитись із оптичними характеристиками багат шарових періодичних покритть	2
13	Ознайомитись із теорією та характеристиками високовідбиваючих багат шарових інтерференційних покритть на основі чвертьхвильових діелектричних шарів	5
14	Ознайомитись із методами мінімізації коефіцієнтів відбивання вторинних максимумів	3
15	Ознайомитись із будовою багат шарових інтерференційних фільтрів, що відрізають	2
16	Ознайомитись із будовою та характеристиками вузькосмугових інтерференційних світлофільтрів	5
17	Ознайомитись із методами контролю товщин шарів багат шарових покритть у процесі їхнього осадження у вакуумі	5
18	Ознайомитись із оптичними властивостями тонких острівкових плівок металів	3
19	Ознайомитись із теорією поверхневих плазмонів, збуджених фотонами в гранулярних плівках срібла і золота	3
	Разом	66

6. Індивідуальні завдання

Навчальним планом не передбачені.

7. Методи навчання

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

8. Методи контролю

1. Дві контрольні роботи на протязі семестру
2. Залік

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання			Залік	Сума
Контрольна робота 1	Контрольна робота 2	Разом		
15	15	30	70	100

Досягнення студентів з навчальної дисципліни «Оптика тонких плівок» оцінюються в балах, загальна сума яких становить 100. Вона складається з 30 балів, які студент може отримати протягом семестру, та 70 балів, які може отримати при проходженні підсумкового контролю у вигляді заліку.

30 балів протягом семестру – це бали за контрольні роботи (по 15 за кожен).

Залік проводиться у письмовому вигляді шляхом написання студентами відповідей на поставлені запитання. Максимальною оцінкою за залікову роботу є 70 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. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука. – 1973. – 719 с.
2. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. – М.: Гос. Изд-во физ.-мат. лит. – 1958. – 570 с.
3. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностр. – 1973. – 224 с.
4. Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л.: Машиностр. – 1978. – 264 с.
5. Джеррард А., Берч Дж. Введение в матричную оптику. – М.: Мир. – 1978. – 342 с.
6. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. – М.: Изд-во иностранной литературы. – 1961. – 530 с.
7. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы. – М.: Мир. – 1986. – 656 с.
8. Адамс А. Введение в теорию оптических волноводов. – М.: Мир. – 1984. – 512 с.
9. Введение в интегральную оптику / под ред. Барноски М. – 1977. – 367 с.

Допоміжна література

1. Аззам Р., Башар Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. – 583 с.
2. Борн К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир. – 1986. – 664 с.