

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Кафедра фізичної оптики

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Декан фізичного факультету



Руслан ВОВК

30 вересня 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-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.

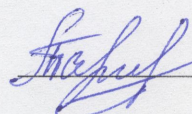
РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

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

Програму схвалено на засіданні кафедри фізичної оптики.

Протокол від 27.08.2024 р. № 1.

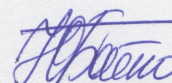
В. о. завідувача кафедри фізичної оптики



Сергій ТАРАПОВ

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

Гарант освітньо-наукової програми

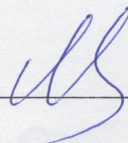


Юрій БОЙКО

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету.

Протокол від 28.08.2024 р. № 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-наукова 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 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 – 4.

1.4. Загальна кількість годин – 120.

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	
60 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).
- 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).
- 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. Багатопротена 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. Схема вимірювань по Друде. Методи вимірювань оптичних сталих 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 сталих, заснований на аналізі еліптично поляризованого світла. Метод Друде. Метод Обрайенна. Метод відновлення лінійної поляризації при багатокутковому 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. Багатокуткова 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 показник заломлення і товщина хвилеводів. Ортогональність мод. Моди плоского планарного хвилеводу. Смужкуваті хвилеводи прямокутного перерізу. Метод виготовлення хвилеводів. Інтегрально-оптичні елементи зв'язку.

Розділ 5. Багат шарові 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 багат шарових 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 багат шаровика як добуток матриць компонент. Обернення порядку шарів у багат шаровику. Симетричні багат шаровики. Коефіцієнт відбивання і пропускання багат шаровика. Однорідні й неоднорідні плівки. Багат шаровики з періодичною структурою. Степінь унімодулярної матриці. Структура спектра відбивання періодичного покриття. Области 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 багат шаровиків при похилому падінні світла і їхнього опису за допомогою ефективних параметрів.

Тема 3. Високівідбиваючі чвертьхвильові багат шаровики. 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, багат шаровики 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.* Вузкосмугові інтерференційні світлофільтри типу Фабрі–Перо, їхні оптичні характеристики. Напівширина смуги пропускання і максимальне пропускання в смугі. 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 вузкосмугових, 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 Максвел-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 р-складову при похилому падінні світла. Вплив смуг міжзонного поглинання на плазмовий резонанс. Поверхневі плазмони, 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	8	3				5						
Разом за розділом 1	8	3				5						
Розділ 2. Інтерференція світла в тонких плівках												
Тема 1	8	3				5						
Разом за розділом 2	8	3				5						

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 3. Методи визначення оптичних констант і товщин тонких плівок												
Тема 1	11	3	4			4						
Тема 2	8	3				5						
Тема 3	11	3	4			4						
Разом за розділом 3	30	9	8			13						
Розділ 4. Елементи інтегральної оптики												
Тема 1	11	3	4			4						
Разом за розділом 4	11	3	4			4						
Розділ 5. Багатошарові інтерференційні покриття												
Тема 1	9	3	2			4						
Тема 2	10	3	2			5						
Тема 3	9	2	2			5						
Тема 4	7	2				5						
Тема 5	9	2	2			5						
Тема 6	8	3				5						
Разом за розділом 5	52	15	8			29						
Розділ 6. Оптичні властивості острівкових металевих плівок												
Тема 1	11	3	4			4						
Разом за розділом 6	11	3	4			4						
Усього годин	120	36	24			60						

4. Теми семінарських занять

№ з/п	Теми	Кільк. годин
1	Вимірювання товщин тонких плівок за допомогою ліній рівного хроматичного порядку	4
2	Металооптичні методи вимірювань оптичних констант	4
3	Обчислення характеристик хвилеводних мод у планарних хвилеводах	4
4	Обчислення оптичних характеристик просвітленої поверхні	2
5	Матричний метод обчислення оптичних характеристик шаруватого середовища	2
6	Обчислення оптичних характеристик широкосмугових діелектричних багатошарових дзеркал	2
7	Обчислення оптичних характеристик вузькосмугових інтерференційних світлофільтрів	2
8	Обчислення характеристик смуги поглинання при плазмовому резонансі у гранулярних плівках	4
	Разом	24

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	2
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	2
8	Ознайомитись із еліпсометричними методами вимірювань показників заломлення і товщин тонких плівок	2
9	Ознайомитись із теоретичним описом хвилеводних мод планарного хвилеводу	4
10	Ознайомитись із оптичними властивостями просвітленої поверхні при використанні одношарових та двошарових покриттів, що просвітлюють	4
11	Ознайомитись із матричним методом обчислення оптичних характеристик багатошарових покриттів	2
12	Ознайомитись із оптичними характеристиками багатошарових періодичних покриттів	3
13	Ознайомитись із теорією та характеристиками високовідбиваючих багатошарових інтерференційних покриттів на основі чвертьхвильових діелектричних шарів	5
14	Ознайомитись із методами мінімізації коефіцієнтів відбивання вторинних максимумів	2
15	Ознайомитись із будовою багатошарових інтерференційних фільтрів, що відрізають	3
16	Ознайомитись із будовою та характеристиками вузькосмугових інтерференційних світлофільтрів	5
17	Ознайомитись із методами контролю товщин шарів багатошарових покриттів у процесі їхнього осадження у вакуумі	5
18	Ознайомитись із оптичними властивостями тонких острівкових плівок металів	2
19	Ознайомитись із теорією поверхневих плазмонів, збуджених фотонами в гранулярних плівках срібла і золота	2
	Разом	60

6. Індивідуальні завдання

Навчальним планом не передбачені.

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. Залік

9. Схема нарахування балів

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання				Залік	Сума
Поточний контроль на заняттях	Контрольна робота 1	Контрольна робота 2	Разом		
24	18	18	60	40	100

Досягнення студентів з навчальної дисципліни «Оптика тонких плівок» 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 заліку.

60 балів протягом семестру – це 24 бали, що нараховуються при проведенні семінарських занять, та 36 за контрольні роботи (по 18 за кожно).

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 кожен годину семінарських занять, тобто 24 бали загалом.

Залік проводиться у письмовому вигляді шляхом написання студентами відповідей на поставлені запитання. Максимальною оцінкою за залікову 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. 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. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир. – 1986. – 664 с.