

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**  
**Фізичний факультет**  
**Кафедра фізики твердого тіла**

**Затверджено**

На засіданні кафедри фізики твердого тіла  
фізичного факультету  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
(протокол №1 від 25 серпня 2023 р.)

Завідувач кафедри  проф. Капустяник В. Б.

**Силабус**

**з навчальної дисципліни «Фізика і технологія тонких плівок»,  
що викладається в межах ОПН «Прикладна фізика та наноматеріали»  
другого (магістерського) рівня вищої освіти  
для здобувачів з спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»**

**Львів 2023 р.**

<b>Назва дисципліни</b>	<b>Фізика і технологія тонких плівок</b>
<b>Адреса викладання дисципліни</b>	вул. Драгоманова, 50, 79005, м. Львів
<b>Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна</b>	фізичний факультет, кафедра фізики твердого тіла
<b>Галузь знань, шифр та назва спеціальності</b>	10 Природничі науки / 105 Прикладна фізика та наноматеріали
<b>Викладачі дисципліни</b>	доцент кафедри фізики твердого тіла, к. ф.-м. н. Турко Борис Ігорович
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:borys.turko@lnu.edu.ua">borys.turko@lnu.edu.ua</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/turko-b-i">https://physics.lnu.edu.ua/employee/turko-b-i</a>
<b>Консультації по дисципліні відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та практичних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі консультації через електронну пошту або он-лайн засобами Microsoft Teams, Skype.
<b>Сторінка дисципліни</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/fizyka-i-tekhnohiiia-tonkykh-pliesok-prykladna-fizyka-ta-nanomaterialy">https://physics.lnu.edu.ua/course/fizyka-i-tekhnohiiia-tonkykh-pliesok-prykladna-fizyka-ta-nanomaterialy</a>
<b>Інформація про дисципліну</b>	Дисципліна «Фізика і технологія тонких плівок» є вибірковою дисципліною для підготовки магістра зі спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», яка викладається в 1 семестрі в обсязі 4 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS)
<b>Коротка анотація дисципліни</b>	Дисципліна «Фізика і технологія тонких плівок» є наступною частиною матеріалу, що стосується технології отримання та методів дослідження низькорозмірних об'єктів.
<b>Мета та цілі курсу</b>	Метою вивчення дисципліни «Фізика і технологія тонких плівок» є формування у майбутнього фізика-науковця необхідних теоретичних знань і практичних навиків, які дозволять створювати та інтерпретувати якісні і кількісні характеристики тонкопліткових матеріалів, виводити закономірності взаємозв'язків між їхнім хімічним складом, кристалічною та електронною структурою і фізичними властивостями, розширення науково-технічного світогляду студентів. Ціль курсу: навчити студентів створювати плівкові матеріали з наперед заданою кристалічною структурою, хімічним складом і товщиною. Освітньою ціллю курсу є формування вміння у студентів самостійно розбиратися і неупереджено орієнтуватися в передових ідеях та найновіших досягненнях сучасної експериментальної фізики; розширення наукового кругозору початківців-дослідників.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sulabha K. Kulkarni. Nanotechnology: Principles and Practices. 3rd Ed. –New Delhi : Co-published by Springer International Publishing, Cham, Switzerland, with Capital Publishing Company, 2015 – 403 p.</li> <li>2. Фізика і технологія тонких плівок : навчальний посібник. У 2-х т. – Т. 1. Технологія тонких плівок / Прокопів В. В. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. – 92 с.</li> <li>3. Фізика і технологія тонких плівок : навчальний посібник. У 2-х т. – Т. 2. Фізика тонких плівок / Прокопів В. В. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2010. – 84 с.</li> <li>4. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури: Навч. посібник. – Львів: В-во «Львівська політехніка», 2009. – 580 с.</li> <li>5. Технологія одержання і застосування плівкових матеріалів: Навчальний посібник / Проценко І. Ю., Шумакова Н. І. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 198 с.</li> </ol>

	<p><b>Допоміжна:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pelliccione M. and Lu T.-M. Evolution of Thin Film Morphology. Modeling and Simulations. – N. Y. : Springer, 2008. – 206 p.</li> <li>2. Handbook of Thin-Film Deposition Processes and Techniques. 2nd Ed. / Ed. by Krishna Seshan. – N. Y.: William Andrew Publishing, 2002. – 656 p.</li> <li>3. Wasa K. Thin Film Materials Technology: Sputtering of Compound Materials / Ed. by K. Wasa, M. Kitabatake, H. Adachi. – N. Y. : William Andrew, Inc., 2004. – 518 p.</li> <li>4. Handbook of Semiconductor Interconnection Technology. 2nd Ed. / Ed. by G. C. Schwartz and K. V. Srikrishnan. – Boca Raton : Taylor &amp; Francis Group, LLC, 2006. – 506 p.</li> <li>5. Handbook of Thin-Film Technology / Ed. by H. Frey and H. R. Khan. – Berlin : Springer, 2015. – 379 p.</li> </ol> <p>Додаткові матеріали також буде запропоновано для кожної теми окремо.</p> <p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <a href="https://physics.lnu.edu.ua/jps/">https://physics.lnu.edu.ua/jps/</a></li> <li>2. <a href="https://physics.lnu.edu.ua/research/publications/our-publisher">https://physics.lnu.edu.ua/research/publications/our-publisher</a></li> <li>3. <a href="https://www.journals.elsevier.com/thin-solid-films">https://www.journals.elsevier.com/thin-solid-films</a></li> </ol>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	120 годин, з яких 32 години аудиторних занять, з них 16 годин лекцій, 16 годин лабораторних занять, та 88 годин самостійної роботи.
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен <b>знати:</b> технології отримання тонких плівок; фізичні основи формування тонкопліткових покриттів; методи дослідження структури, складу і фізичних властивостей тонких плівок.</p> <p><b>вміти:</b> створювати плівкові матеріали з наперед заданою кристалічною структурою, хімічним складом і товщиною; вимірювати товщину, величину макронапружень і адгезію та критичну температуру конденсації; розраховувати енергію активації заліковування дефектів кристалічної будови.</p>
<b>Ключові слова</b>	Тонкі плівки, технологія тонких плівок, епітаксія, фізика тонких плівок, вакуумна техніка.
<b>Формат курсу</b>	Очний
	проведення лекцій, лабораторних занять і консультації для кращого розуміння тем
<b>Теми</b>	Наведено у табл.1 і табл. 2
<b>Підсумковий контроль, форма</b>	Підсумковий контроль: залік в кінці семестру. Форма: усна.
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення курсу необхідні знання з електрики і магнетизму, молекулярної фізики, оптики, атомної фізики, фізики і техніки низьких температур.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Використовуються такі методи навчання: а) <i>словесні</i> – лекція, пояснення, бесіда; б) <i>наочні</i> – ілюстрування лекційного матеріалу презентаціями, що включають в себе таблиці, схеми та графіки; в) <i>лабораторні роботи</i> – виконання лабораторних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань та формування вмінь і практичних навичок.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп'ютер, загальнонавчальні комп'ютерні програми й операційні системи, проєктор
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного)</b>	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:

<p><b>виду навчальної діяльності)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• лабораторні заняття: 80% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 80 (лабораторні роботи № 1, 2 по 10 балів, №3-6 – 15 балів);</li> <li>• контрольна робота 20% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів 20 (2 контрольні роботи по 10 балів).</li> </ul> <p>Підсумкова максимальна кількість балів 100.</p> <p><b>Академічна доброчесність</b> здобувачами вищої освіти передбачає самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного та підсумкового контролю результатів навчання. Списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій чи усній роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів обману.</p> <p><b>Відвідання занять</b> є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні заняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків, визначених для виконання усіх видів робіт, передбачених курсом.</p> <p><b>Література.</b> Усю література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надано викладачами виключно в освітніх цілях без права її передавання третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p><b>Політика виставлення балів.</b> Враховуються бали, набрані на лабораторних та поточному тестуванні. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час заняття; недопустимість пропусків та запізнень на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях, не пов'язаних із навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін.</p> <p>Жодні форми академічної недоброчесності не толеруються.</p>
<p><b>Питання до контрольної роботи</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Тонкі плівки: визначення. Класифікація методів отримання тонких плівок.</li> <li>2. Теорії зародкоутворення у тонких плівках. Капілярна та атомна моделі.</li> <li>3. Стадії росту плівки. Утворення дефектів у процесі росту плівки.</li> <li>4. Вакуумна техніка. Вакуумні насоси.</li> <li>5. Методи вимірювання тиску розріджених газів.</li> <li>6. Вакуумне випаровування. Конструкції випарників.</li> <li>7. Розподіл осаджених вакуумним випаровуванням плівок за товщиною. Апаратура і методи контролю процесу осадження.</li> <li>8. Самостійний тліючий розряд. Тліючий розряд, що підтримується термоелектронною емісією і магнітним полем. Обладнання для розпилення і фактори, які впливають на швидкість нанесення плівок.</li> <li>9. Катодне розпилення.</li> <li>10. Магнетронне розпилення.</li> <li>11. Високочастотне розпилення.</li> <li>12. Реактивне розпилення.</li> <li>13. Іонне розпилення багатокомпонентних матеріалів.</li> <li>14. Епітаксія тонких плівок з газової фази. Епітаксія і характер межі розділу “плівка-підкладка”.</li> <li>15. Режими гетероепітаксійного росту.</li> <li>16. Молекулярно-променева епітаксія.</li> <li>17. Газофазна епітаксія з металорганічних сполук (МОС гідридна епітаксія).</li> </ol>

	18. Кристалізація в процесі МОС гідридної епітаксії. Легування в процесі МОС гідридної епітаксії. 19. Рідиннофазна епітаксія (РФЕ). 20. Легування сторонніми домішками в умовах РФЕ.
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

## Схема курсу «Фізика і технологія тонких плівок»

Тиж-день	Тема	Форма діяльності та обсяг годин	Література	Термін виконання
1, 2	<b>Тема 1. Тонкі плівки: визначення, класифікація, механізми і стадії їхнього росту.</b> Вступ. Цілі і завдання курсу. Етапи досліджень поверхні і тонких плівок. Класифікація плівок і їхні основні параметри. Методи нанесення тонких плівок, їхня класифікація. <b>С. Р.</b> Вивчення матеріалу лекції. Застосування тонких плівок.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 11 год	Базова: 1, 4; Допоміжна: 2–5	2 тижні
3, 4	<b>Тема 2. Закономірності утворення і росту плівок.</b> Теорії зародкоутворення у тонких плівках. Падіння на підкладку і термічна акомодация. Капілярна модель. Атомні моделі. Часткова і повна конденсації. Експерименти зі зародкоутворення у тонких плівках. Структурні наслідки утворення зародків у тонких плівках. Стадії росту плівки. Утворення дефектів у процесі росту. <b>С. Р.</b> Вивчення матеріалу лекції. Енергетичний спектр електронів і густина їх квантових станів у випадку низькорозмірних структур.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 11 год	Базова: 1–5; Допоміжна: 1–5	2 тижні
5, 6	<b>Тема 3. Техніка високого вакууму.</b> Вакуумні насоси. Матеріали, які використовують у вакуумних системах. техніка монтажу вакуумних систем. Конструкція і робочі характеристики вакуумних систем. Виявлення натікання. Методи вимірювання тиску. Аналіз спектру залишкових газів. <b>С. Р.</b> Вакуум у тонкоплівковій технології. Вплив вакууму на процес нанесення плівок.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 11 год	Базова: 2, 5; Допоміжна: 5	2 тижні
7, 8	<b>Тема 4. Вакуумне випаровування.</b> Теорія випаровування. Швидкість випаровування. Механізми випаровування. Розподіл молекул, що випаровуються за напрямками. Конструкції випарників та їхнє використання. Розподіл осаджених плівок за товщиною. Випаровування сполук, сплавів і	Лекції – 2 год, самостійна робота – 16 год	Базова: 2, 5; Допоміжна: 5	2 тижні

	сумішей. Апаратура і методи контролю процесу осадження плівок. С. Р. Вивчення матеріалу лекції. Випаровування одноатомних систем. Випаровування багатокомпонентних систем.			
9, 10	<b>Тема 5. Фізичний механізм розпилення матеріалів під дією іонного бомбардування (іонне розпилення).</b> Методи іонного розпилення. Плазма. Іонні пучки. Коефіцієнти і порогові енергії розпилення. Швидкості розпилюваних атомів. Кутовий розподіл матеріалу, що розпилюється. Аналіз розпилених речовин. Зміни, які відбуваються на поверхні розпилюваного матеріалу. Теоретичні моделі іонного розпилення. С. Р. Вивчення матеріалу лекції. Іонне травлення.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 11 год	Базова: 1, 2, 5; Допоміжна: 2–5	2 тижні
11, 12	<b>Тема 6. Отримання плівок методом іонного розпилення.</b> Самостійний тліючий розряд. Тліючий розряд, що підтримується термоелектронною емісією і магнітним полем. Обладнання для розпилення і фактори, які впливають на швидкість нанесення плівок. Захоплення домішок у процесі нанесення плівок. Реактивне розпилення. Високочастотне розпилення. Експериментальні дані. Методики вимірювання і розрахунку товщини плівок. С. Р. Вивчення матеріалу лекції. Переваги і недоліки методу іонного розпилення.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 11 год	Базова: 1, 2, 5; Допоміжна: 2–5	2 тижні
13–16	<b>Тема 7. Епітаксійні методи отримання тонких плівок.</b> Епітаксія тонких плівок з газової фази. Епітаксія і характер межі розділу “плівка підкладка”. Епітаксія і псевдоморфізм. Режими гетероепітаксійного росту. Епітаксія і основні чинники, що її формують. Епітаксія і фонові домішки. Епітаксія і морфологія та орієнтація поверхні підкладки. Молекулярно-променева епітаксія (МПЕ). Формування і розподіл поверхнею підкладки молекулярних пучків. Ріст плівки у методі МПЕ. Підкладки у методі МПЕ. МПЕ шарів кремнію та систем АПВV. Легування і контроль параметрів у методі МПЕ. Газофазна епітаксія з металоорганічних сполук (МОС гідридна епітаксія). Легування у процесі МОС гідридної епітаксії. Рідиннофазна епітаксія (РФЕ). Фізико-хімічні основи методу РФЕ. Класифікація способів РФЕ. Механізми і	Лекції – 4 год, самостійна робота – 17 год	Базова: 1, 2, 4; Допоміжна: 2–5	4 тижні

кінетика кристалізації за РФЕ. С. Р. Вивчення матеріалу лекції. Обладнання для отримання епітаксійних тонких плівок.			
---	--	--	--

Таблиця 2

## Теми лабораторних робіт

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1	Вступне заняття.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
3	Конструкція, принцип роботи та можливості вакуумного універсального поста ВУП-5М.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
5	Методи очищення підкладок від забруднень перед вирощуванням тонких плівок.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
7	Отримання тонких плівок термічним вакуумним випаровуванням.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
9	Отримання тонких плівок магнетронним розпиленням.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
11	Високочастотне магнетронне та високочастотне магнетронне реактивне розпилення.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
13	Хімічні методи отримання тонких плівок.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні
15	Заключне заняття.	лабораторна робота – 2 год	2 тижні