

**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 29 серпня 2024 р.)

Завідувач кафедри



Володимир КАПУСТЯНИК

**Силабус**

**з навчальної дисципліни “Фізика нанорозмірних об’єктів”,  
що викладається в межах ОПП Нанофізика та наноматеріали  
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти для здобувачів  
зі спеціальності 105 “Прикладна фізика та наноматеріали”**

Львів 2024 р.

<b>Назва курсу</b>	<b>Фізика нанорозмірних об'єктів</b>
<b>Адреса викладання курсу</b>	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005 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 курсу</b>	доцент кафедри фізики твердого тіла, к.ф.-м.н Коваленко Марія Василівна
<b>Контактна інформація викладачів</b>	<a href="mailto:mariya.kovalenko@lnu.edu.ua">mariya.kovalenko@lnu.edu.ua</a> <a href="https://physics.lnu.edu.ua/employee/kovalenko-m-v">https://physics.lnu.edu.ua/employee/kovalenko-m-v</a>
<b>Консультації по курсу відбуваються</b>	Консультації в день проведення лекцій та лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через електронну пошту та на платформі Microsoft Teams.
<b>Сторінка курсу</b>	<a href="https://physics.lnu.edu.ua/course/fizyka-nanorozmirnyh-objektiv-105-prykladna-fizyka-ta-nanomaterialy">https://physics.lnu.edu.ua/course/fizyka-nanorozmirnyh-objektiv-105-prykladna-fizyka-ta-nanomaterialy</a>
<b>Інформація про курс</b>	Дисципліна «Фізика нанорозмірних об'єктів» є нормативною дисципліною зі спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти, яка викладається в 8 семестрі в обсязі 3,5 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
<b>Коротка анотація курсу</b>	В рамках курсу на основі порівняння загальних закономірностей внутрішньої будови, властивостей та фізичних закономірностей визначаються основні фактори, що обумовлюють особливість нанорозмірного стану. На основі цього проводиться подальший розвиток теоретичних та практичних засад для вивчення різних властивостей матеріалів з акцентуванням на наноструктурований стан. Розглядаються сучасні експериментальні результати та уявлення про кристалічну будову твердих наноматеріалів, розглядаються їхні особливості механічних, теплових, електронних, електричних, магнітних та оптичних властивостей твердих тіл. В рамках курсу розглядаються сучасні підходи експериментального дослідження і теоретичного опису атомної і електронної структури та спектру властивостей низькорозмірних структур.
<b>Мета та цілі курсу</b>	Мета вивчення дисципліни – ознайомити студентів з сучасними досягненнями в області фізики наноструктур, а саме в дослідженні структури та властивостей низькорозмірних структур. Основними цілями курсу є розглянути основні види наноструктур, способи їхнього отримання та методи дослідження, структурні, механічні, оптичні, теплові, електронні, магнітні властивості різних типів наноструктур та їхнє практичне застосування у вигляді наноматеріалів та технічних пристроїв, що покладаються в основу нанотехнологій.
<b>Література для вивчення дисципліни</b>	<b>Базова:</b> 1. В.В. Погосов, Ю.А. Куницький, А.В. Бабіч, А.В. Коротун, А.П. Шпак "Нанофізика і нанотехнології", Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. - 380 с.

	<p>2. <a href="#">Субмікронні та нанорозмірні структури електроніки: підручник</a> / З. Ю. Готра, І. І. Григорчак, Б. А. Лукіянець, В. П. Махній, С. В. Павлов, Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича; За ред. З. Ю. Готра.– Чернівці : Технологічний Центр, 2014.– 838 с.</p> <p>3. А.П.Шпак, Ю.А.Куницький, О.О.Коротченков, С.Ю.Смик. Квантові низькорозмірні системи. К.: Академперіодика, 2003.- 310 с.</p> <p>4. Поплавко Ю. М., Борисов О. В., Якименко Ю. І. <a href="#">Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: навч. посіб.</a> –К.: НТУУ «КПІ», 2012. –300 с</p> <p>5. <a href="#">Д.М.Заячук. Низькорозмірні структури і надгратки. НУ „Львівська політехніка”, 2006. – 220 с.</a></p> <p>6. P. Harris, Carbon Nanotubes and Related Structures, Cambridge University Press, 2010.-283 с.</p> <p><b>Допоміжна:</b></p> <p>7. В.В. Погосов, Ю.А. Куницький, А.В. Бабіч, А.В. Коротун "Елементи фізики поверхні, нано- структур і технологій", 2010, Запоріжжя: ЗНТУ, 365 с.</p> <p>8. Наноматеріали і нанотехнології: навчальний посібник / Азаренков М. О., Неклюдов І. М., Береснев В. М., Воєводін В. М., Погребняк О. Д., Ковтун Г. П., Соболев О. В., Удовиський В. Г., Литовченко С. В., Турбін П. В., Чижкала В. О. –Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. –316 с.</p> <p>9. Тузяк О.Я. Основи електронної та зондової мікроскопії: навч. посібник / О.Я. Тузяк, В.Ю. Курляк. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2012. -296 с.</p> <p>10. Wolf E.L. Nanophysics and Nanotechnology. An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience. – Weinheim: WILEY-VCH, 2004.</p> <p><b>Інформаційні ресурси:</b></p> <p>11. <a href="http://www.nanohub.org">www.nanohub.org</a></p> <p>12. <a href="http://www.znannya.org">www.znannya.org</a></p> <p>13. <a href="http://nauka.name/">http://nauka.name/</a></p> <p>14. <a href="http://www.skybox.net.ua">www.skybox.net.ua</a></p> <p>15. <a href="http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/nano/">www.nbu.gov.ua/portal/natural/nano/</a></p>
<b>Тривалість курсу</b>	один семестр
<b>Обсяг курсу</b>	105 годин, з яких 64 годин аудиторних занять, з них 32 годин лекцій, 32 годин лабораторних занять, та 41 години самостійної роботи
<b>Очікувані результати навчання</b>	<p>В результаті вивчення цього курсу здобувач має оволодіти такими компетентностями:</p> <p><b>Загальні компетентності (ЗК):</b></p> <p><b>ЗК 1.</b> Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.</p> <p><b>ЗК 2.</b> Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності.</p> <p><b>ЗК 3.</b> Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.</p> <p><b>ЗК 5.</b> Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.</p> <p><b>ЗК 6.</b> Здатність до проведення досліджень на відповідному рівні.</p>

	<p><b>ЗК 7.</b> Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.</p> <p><b>ЗК 9.</b> Здатність працювати автономно.</p> <p><b>ЗК 10.</b> Навички здійснення безпечної діяльності.</p> <p><b>Спеціальні (фахові) компетентності спеціальності (СК):</b></p> <p><b>СК 2.</b> Здатність брати участь у плануванні і виконанні експериментів та лабораторних досліджень властивостей фізичних систем, фізичних явищ і процесів, обробленні й презентації їхніх результатів.</p> <p><b>СК 3.</b> Здатність брати участь у виготовленні експериментальних зразків, інших об'єктів дослідження.</p> <p><b>СК 4.</b> Здатність брати участь у впровадженні результатів досліджень та розробок.</p> <p><b>СК 5.</b> Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп'ютерних технологій.</p> <p><b>СК 9.</b> Здатність організувати роботу відповідно до вимог безпеки життєдіяльності й охорони праці.</p> <p><b>СК 11.</b> Здатність продемонструвати знання характеристик і властивостей наноматеріалів та процесів їхнього виробництва та дослідження.</p> <p>Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі <b>програмні результати навчання:</b></p> <p><b>ПРН 01.</b> Знати і розуміти сучасну фізику на рівні, достатньому для розв'язання складних спеціалізованих задач і практичних проблем прикладної фізики.</p> <p><b>ПРН 02.</b> Застосовувати сучасні математичні методи для побудови й аналізу математичних моделей фізичних процесів.</p> <p><b>ПРН 03.</b> Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв'язанні практичних проблем прикладної фізики.</p> <p><b>ПРН 05.</b> Вибирати ефективні методи та інструментальні засоби проведення досліджень у галузі прикладної фізики.</p> <p><b>ПРН 07.</b> Класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково технічну інформацію в галузі прикладної фізики.</p> <p><b>ПРН 09.</b> Презентувати результати досліджень і розробок фахівцям і нефахівцям, аргументувати власну позицію.</p> <p><b>ПРН 12.</b> Розуміти закономірності розвитку прикладної фізики, її місце в розвитку техніки, технологій і суспільства, у тому числі в розв'язанні екологічних проблем.</p> <p><b>ПРН 15.</b> Вміти планувати і виконувати лабораторні та експериментальні дослідження за допомогою вимірювальних приладів, оцінювати похибки проведення досліджень, робити висновки.</p> <p><b>ПРН 16.</b> Дотримуватись морально-етичних аспектів досліджень, інтелектуальної та академічної чесності, професійного кодексу поведінки.</p>
<b>Ключові слова</b>	Наноструктури, методи дослідження наноструктур, оптичні властивості, електронний спектр, магнітні властивості, вуглецеві наноструктури.
<b>Формат курсу</b>	Очний
<b>Теми</b>	Наведено у табл.1 і табл. 2
<b>Підсумковий</b>	залік в кінці семестру

<b>контроль, форма</b>	сума балів отриманих протягом семестру для кожного виду навчальної діяльності (детально описано в п. Критерії оцінювання)
<b>Пререквізити</b>	Для вивчення дисципліни необхідні знання одержані при вивченні загальних та Для вивчення дисципліни необхідні знання одержані при вивченні загальних та спеціальних дисциплін спеціальності, насамперед “Механіки”, “Молекулярної фізики”, “Електрики”, “Оптики”, “Атомної фізики”, “Квантової механіки і елементів квантової інформації”, “Наноматеріалів та нанотехнології”, “Мікроскопії нанорозмірних об’єктів”, “Фізики напівпровідників”.
<b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b>	Використовуються такі методи навчання: а) <i>словесні</i> – лекція, пояснення, бесіда, інструктаж (вступний та поточний) під час виконання лабораторних робіт; б) <i>наочні</i> – ілюстрування лекційного матеріалу презентаціями, що включають в себе таблиці, схеми та графіки; в) <i>лабораторні</i> – виконання лабораторних робіт, що передбачає організацію навчальної роботи для отримання нових знань, перевірки певних наукових гіпотез на рівні досліджень, узагальнень та аналізу та формування вмінь і навичок інтерпретації результатів досліджень різноманітних об’єктів.
<b>Необхідне обладнання</b>	персональний комп’ютер, операційні системи (Windows, Linux), Office 365, проектор. Для виконання лабораторних робіт: мультиметр MS8040, лабораторний блок живлення MPS-6003D, вага аналітична WAA-210, спектрометр AvaSpec-ULS2048L-USB2-UA-RS, компактне збалансоване галогенно-дейтерієве джерело світла Avantes AvaLight-DHc, криокулер закритого типу Advanced Research System, Nd:YAG лазер FQSS266-Q2, автоматизований монохроматор/спектрограф M266, кварцовий вимірювач товщини плівок, атомно-силовий мікроскоп Solver PRO47, вакуумний універсальний пост ВУП-5М, SNOL 0,2/1250.
<b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b>	Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням: • поточне тестування: 30% семестрової оцінки, 2 тестові контролю по 15 балів кожний (15 тестів по 1 балу кожний), максимальна кількість балів 30; • презентації: 20% семестрової оцінки, максимальна кількість балів 20; • лабораторні роботи: 50% семестрової оцінки; 5 балів за одну лабораторну роботу, максимальна кількість балів 50. Підсумкова максимальна кількість балів 100. Критерії оцінювання лабораторних робіт: 5 б. – студент повністю виконав завдання і володіє матеріалом на високому рівні; 4-6 б. – студент повністю виконав завдання і володіє матеріалом на достатньо високому рівні; 3 б. – студент повністю виконав завдання і володіє матеріалом на задовільному рівні; 2 б. – студент частково виконав завдання і володіє матеріалом на задовільному рівні; 1 б. – студент частково виконав завдання і тільки частково володіє матеріалом; 0 б. – студент не виконав завдання.

	<p>Критерії оцінювання презентацій:  20 б. – студент повністю володіє матеріалом;  15-19 б. – студент достатньо володіє матеріалом;  10-14 б. – студент частково володіє матеріалом;  1-9 б. – студент має базові знання матеріалу;  0 б. – студент не володіє матеріалом.</p> <p>Додаткові бали можна отримати за результатами неформального та/або інформального навчання по тематиці даного курсу. Визнання та зарахування результатів такого навчання відбувається у відповідності до наданих документів про неформальне та/або інформальне навчання. Додаткові 10 балів можна отримати, наприклад пройшовши онлайн курс <a href="#">Physics of Nanoscale Devices</a> або подібний курс за тематикою курсу за умови, що загальне число набраних балів не перевищуватиме 100 балів.</p> <p>Додаткові 10 балів студент також може отримати за публікацію статті або особисту участь у науковій конференції за тематикою курсу за умови, що загальне число набраних балів не перевищуватиме 100 балів.</p> <p><b>Академічна доброчесність:</b> очікується, що роботи студентів будуть їхніми оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Списування, втручання в роботу інших студентів, відсутність посилань на використані джерела становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної не доброчесності. Виявлення ознак академічної не доброчесності в роботах студента є підставою для її не зарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману. Відвідування занять 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> уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно. Буде надана викладачем виключно в освітніх цілях без права передачі її третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих.</p> <p><b>Політика встановлення балів.</b> Враховуються бали набрані за виконання та захист лабораторних робіт і самостійної роботи. При цьому враховується присутність на заняттях та активність студента під час виконання лабораторної роботи; списування та плагіат; користування мобільними пристроями в цілях не пов'язаних з навчанням; несвоєчасне виконання поставленого завдання.</p> <p><b>Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються.</b></p>
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

## Схема курсу «Фізика нанорозмірних об'єктів»

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Література	Термін виконання
1,2	<p><b>Вступ</b> Визначення поняття нанорозмірні об'єкти. Критерії визначення нанооб'єктів: критичний розмір і функціональні властивості. Розмірний ефект. Кореляційний радіус. Класифікація нанорозмірних систем: 0D-, 1D-, 2D-структури.</p> <p><b>Тема 1. Енергетичний спектр низькорозмірних систем.</b> Квантування енергії електронів у низькорозмірних системах Енергетичні стани у прямокутному, параболіному, трикутному потенціалах. Особливості зміни густини електронних станів при переході від 3D до 0D системи.</p>	Лекції – 4 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 3, 4; Допоміжна: 8	2 тижні
3	<p><b>Тема 2. Властивості двомірного електронного газу.</b> Енергетичні рівні та хвильові функції. Наближення Хартрі для електронів у шарах просторового заряду. Квазікласичне наближення для напівпровідників з параболічним і непараболічним законом дисперсії.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 5, 2; Допоміжна: 8	1 тиждень
4	<p><b>Тема 3. Електронні властивості двомірних неупорядкованих систем.</b> Елементи теорії неупорядкованих систем. Перехід Андерсена у 3D і 2D системах. Концепція мінімальної металічної провідності. Логарифмічна провідність при низьких температурах.</p>	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2, 3; Допоміжна: 8	1 тиждень
5,6	<p><b>Тема 4. Одномірні системи, квантові дроти, надгратки.</b> Квантування одномірної провідності. Дробова провідність і поняття про рідину Латтінджера. Напівпровідникові надгратки. Композиційні та леговані надгратки. Енергетичний спектр. Перехід напіметал-напівпровідник. Фізичні властивості надграток. Густина</p>	Лекції – 4 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 2, 3, 5; Допоміжна: 7, 10	2 тижні

	станів. Оптичні властивості: внутрішньозонні та міжзонні переходи. Електропровідність надграток.			
7,8	<b>Тема 5. Оптичні властивості нанорозмірних структур.</b> Екситони у двовимірних напівпровідниках. Екситони у квантових нитках та квантових точках. Люмінесцентні властивості квантових точок. Зміна ширини забороненої зони. Оцінка розмірів наночасток за спектральними даними. Перетворення і генерація оптичного випромінювання в наноструктурах. Фотонні кристали, у тому числі з оптично активними наноструктурами (напівпровідниковими та металічними). Поляритонні ефекти в мікрорезонаторах з активними квантовими ямами.	Лекції – 4 год, самостійна робота – 3 год	Базова: 4, 5; Допоміжна: 8	2 тижні
9	<b>Тема 6. Електрооптика нанорозмірних напівпровідників.</b> Вплив електричного поля на край оптичного поглинання квантово-розмірних структур. Електрооптика одно- та двовимірних екситонів у п'єзоелектричних полях акустичних хвиль. Модуляція густини носіїв заряду в квантових ямах п'єзоелектричним полем.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 2, 5; Допоміжна: 9	1 тиждень
10,11	<b>Тема 7. Фонони в наноструктурах та механічні властивості наноструктурних об'єктів.</b> Локалізовані фононі стани. Густина фононних станів в наноструктурах. Нелінійні оптичні властивості. Бозе-конденсація екситонів. Розсіяння світла в наноструктурах. Зростання міцності нанокристалічних металів. Дефектність речовини у нанокристалічному стані.	Лекції – 4 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 2, 5; Допоміжна: 7	2 тижні
12,13	<b>Тема 8. Магнітні властивості.</b> Двовірні системи у слабкому магнітному полі. Квантовий ефект Холла. Модель резервуара. Модель делокалізованих станів. Модель крайових станів. Дробовий квантовий ефект Холла. Вплив	Лекції – 4 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 4, 5; Допоміжна: 8	2 тижні



	розміру частинок на магнітні властивості феромагнетиків. Перехід у супермагнітний стан. Температура блокування. Оцінка розміру наночастки за даними магнітної сприйнятливості. Магнітні властивості анізотропних наночастинок.			
14,15	<b>Тема 9. Вуглецеві наноструктури.</b> Фулерени, одностінкові та багатостінкові вуглецеві нанотрубки. Методи їх синтезу та діагностики. Електронні та оптичні властивості.	Лекції – 4 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 3, 6; Допоміжна: 10	2 тижні
16	<b>Тема 10. Застосування наноматеріалів</b> Наносенсори. Наноелектроніка. Фотоніка. Прилади на квантових точках – лазери, світлодіоди. Електронні механічні системи. Нейронні мережі.	Лекції – 2 год, самостійна робота – 2 год	Базова: 1, 2, 5, 6; Допоміжна: 8, 10	1 тиждень

## Теми лабораторних занять

Тиждень	Назва теми	Форма діяльності та обсяг годин	Термін виконання
1	Вступне заняття	лаборатор. заняття – 2 год	1 тиждень
2	Штучне наноформування. Отримання нанотрубок ZnO.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
3	Дослідження дифракції електронів на кристалічній ґратці	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
4, 5	Рентгеноструктурний аналіз тонких плівок	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 2 год	2 тижні
6	Застосування методу термолюмінісцентної спектроскопії для вивчення дефектних центрів у діелектричних і напівпровідникових матеріалах	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
7, 8	Визначення товщини або показника заломлення тонкопліткових оптично прозорих діелектричних чи напівпровідникових матеріалів методом інтерференційного фільтру	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 2 год	2 тижні
9, 10	Дослідження спектрів фотолюмінесценції наноструктур ZnO. Колірні характеристики джерел випромінювання світла.	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 2 год	2 тижні
11, 12	Обчислення розміру наночастинок ZnO у водному розчині по спектру поглинання	лаборатор. заняття – 4 год, самостійна робота – 2 год	2 тижні
13	Вплив домішок на край поглинання легованих Al та Ga плівок ZnO	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
14	Фотодеградація органічних речовин на поверхні матеріалів на основі ZnO як метод очистки води від забруднень	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
15	Робота СЗМ Solver P47 у режимі скануючого тунельного мікроскопа.	лаборатор. заняття – 2 год, самостійна робота – 2 год	1 тиждень
16	Заключне заняття	лаборатор. заняття – 2 год	1 тиждень