МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Львівський національний університет імені Івана Франка
Фізичний факультет
Кафедра фізики металів

Затверджено

на засіданні кафедри фізики металів
фізичного факультету
Львівського національного університету
імені Івана Франка
(протокол № 9 від 29 серпня 2025 року)

Завідувач кафедри Степан МУДРИЙ

Силабус
з навчальної дисципліни
«*Квантові матеріали в сучасній електроніці*»,
що викладається в межах ОНП «*Експериментальна фізика*»
другого (магістерського) рівня вищої освіти
для здобувачів зі спеціальності Е5 *«Фізика та астрономія»*

Львів 2025

Назва дисципліни	Квантові матеріали в сучасній електроніці
Адреса викладання дисципліни	вул. Кирила і Мефодія 8, 79005 Львів
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	Фізичний факультет, кафедра фізики металів
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	10 Природничі науки, 104 Фізика та астрономія
Викладачі дисципліни	Штаблавий Ігор Іванович, д-р. фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри фізики металів, лабораторні заняття проводить Присяжнюк Віктор Іванович, асистент кафедри фізики металів.
Контактна інформація викладачів	ihor.shtablavyi@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/shtablavyj-i-i viktor.prysyazhnyuk@lnu.edu.ua https://physics.lnu.edu.ua/employee/prysyazhnyuk
Консультації з питань навчання по дисципліні відбуваються	Консультації в день проведення лекцій/лабораторних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через MS Teams. Для погодження часу он-лайн консультацій слід писати на електронну пошту викладача або дзвонити.
Сторінка курсу	https://physics.lnu.edu.ua/course/kvantovi-materialy-v-suchasniy-elektronitsi
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Квантові матеріали в сучасній електроніці» є нормативною дисципліною з спеціальності Е5 Фізика та астрономія для освітньої програми «Експериментальна фізика», яка викладається в першому семестрі в обсязі трьох кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	Курс розроблено таким чином, щоб надати учасникам необхідні знання, уміння, навички, загальні та фахові компетентності для розв'язання комплексних проблем у галузі створення нових матеріалів електронної техніки. Тому у курсі представлено як теоретичний матеріал, необхідний для глибокого розуміння процесів та явищ, які відбуваються в матеріалах різного типу, які застосовують або планують застосовувати в пристроях сучасної електроніки, так і лабораторні роботи, які потрібні для отримання практичних навичок пов'язаних з синтезом та дослідженням фізичних властивостей матеріалів властивості яких можна описати використовуючи квантово-механічні підходи.
Мета та цілі дисципліни	Метою вивчення вибіркової дисципліни «Квантові матеріали в сучасній електроніці» є засвоєння студентами основних положень в галузі новітнього квантового матеріалознавства; вивчення технології отримання квантових матеріалів і їхніх характеристик.
Література для вивчення дисципліни	**Базова:** 1. Швець С.Я., Червоний І.Ф., Головко О.П. Матеріали електронної техніки Навчальний посібник. Запоріжжя, Видавництво ЗДІА, 2008. - 380 с. 2. Прокопів В. В. Матеріали електронної техніки : навчальний посібник – Івано-Франківськ :Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2009. – 288 с. 3. С. І. Мудрий, І. І. Штаблавий Фізичне матеріалознавство (навч. посібник), Львів, 2012, 418 с. 4. З. Ю. Готра, І. Є. Лопатинський, Б. А. Лукіянець, З. М. Микитюк, І. В. Петрович Фізичні основи електронної техніки, Львів, Видавництво «Бескид Біт» 2004, 880 с. **Допоміжна:**

	1. R. E. Hummel Electronic properties of materials/ An introduction for engineers Springer, 1985, 319p. 2. R. Fornari Single Crystals of Electronic Materials Growth and Properties, Woodhead Publishing, 2019, 582 P. 3. Moliton Solid-State Physics for Electronics, Wiley 2009, 389 P. 4. Ch. C. Sorrell, S. Sugihara and J. Nowotny Materials for energy conversion devices, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005, 416 P. 5. Mihai Irimia-Vladu, Eric D. Glowacki, Niyazi S. Sariciftci, and Siegfried Bauer Green Materials for Electronics, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2018, 329 P. 6. Deborah D. L. Chung Materials for Electronic Packaging, Butterworth-Heinemann, 1995, 368 P. 7. Zhu, C., Wu, J., Yan, J. *et al.* Advanced Fiber Materials for Wearable Electronics. *Adv. Fiber Mater.* **5**, 12–35 (2023). https://doi.org/10.1007/s42765-022-00212-0
Обсяг курсу	**32** години аудиторних занять. З них 16 годин лекцій, 16 години лабораторних робіт та 58 годин самостійної роботи
Очікувані результати навчання	**В результаті вивчення цього курсу здобувач має оволодіти такими компетентностями: Загальні компетентності (ЗК):** **ЗК01.** Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях. **ЗК02.** Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності. **ЗК03.** Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел. **ЗК04.** Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями. **ЗК05.** Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології. **ЗК07.** Здатність проведення досліджень на відповідному рівні. **Спеціальні (фахові) компетентності (СК)** **СК01.** Здатність використовувати закони та принципи фізики та/або астрономії у поєднанні із потрібними математичними інструментами для опису природних явищ. **СК02.** Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем у галузі фізики та/або астрономії. **СК05.** Здатність сприймати новоздобуті знання у галузі фізики та астрономії та інтегрувати їх з уже наявними, а також самостійно опановувати знання та навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних галузях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях. **СК06.** Здатність розробляти наукові та прикладні проекти, керувати ними та оцінювати їх на основі фактів. **СК08.** Здатність формулювати нові гіпотези та наукові задачі у галузі фізики та астрономії, вибирати відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси. **СК09.** Здатність ефективно використовувати на практиці сучасні теорії методи управління наукою та ділового адміністрування. **СК10.** Здатність використовувати знання й уміння в галузі сучасних інформаційних технологій для вирішення експериментальних і практичних завдань фізики та астрономії. **СК11.** Здатність використовувати фізичну апаратуру та обладнання. **СК12.** Здатність обирати відповідні методи фізичного аналізу для вузьконапрямленого вивчення конкретних об'єктів досліджень.

	СК13. Здатність виявляти й тлумачити основні закономірності поведінки фізичних величин і процесів, ґрунтуючись на одержаних експериментальних даних. **Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі програмні результати навчання:** **РН01.** Використовувати концептуальні та спеціалізовані знання і розуміння актуальних проблем і досягнень обраних напрямів сучасної теоретичної та експериментальної фізики та/або астрономії для розв'язання складних задач і практичних проблем. **РН03.** Застосовувати сучасні теорії наукового менеджменту та ділового адміністрування для організації наукових та прикладних досліджень у галузі фізики та/або астрономії. **РН04.** Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності. **РН06.** Обирати ефективні математичні методи та інформаційні технології та застосовувати їх для здійснення досліджень та/або інновацій у галузі фізики та/або астрономії. **РН07.** Оцінювати новизну та достовірність наукових результатів з обраного напряму фізики та/або астрономії, оприлюднених у формі публікації чи усної доповіді. **РН09.** Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напряму фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємокорисно спілкуючись з колегами. **РН10.** Відшуковувати інформацію і дані, необхідні розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отриману інформацію та дані. **РН11.** Застосовувати теорії, принципи і методи фізики та/або астрономії для розв'язання складних міждисциплінарних наукових і прикладних задач. **РН13.** Створювати фізичні, математичні і комп'ютерні моделі природних об'єктів та явищ, перевіряти їх адекватність, досліджувати їх для отримання нових висновків та поглиблення розуміння природи, аналізувати обмеження. **РН15.** Планувати наукові дослідження з урахуванням цілей та обмежень, обирати ефективні методи дослідження, робити обґрунтовані висновки за результатами дослідження. **РН16.** Брати продуктивну участь у виконанні експериментальних та/або теоретичних досліджень у галузі фізики та астрономії. **РН17.** Продемонструвати вміння застосовувати спеціальну фізичну апаратуру й обладнання для вимірювання фізичних величин. **РН19.** Вміння обробити, проаналізувати та пояснити фізичну інформацію, одержану за допомогою методів х-променевої дифракції, люмінесцентної й оптичної спектроскопії, моделювання, електронної мікроскопії, термічного аналізу. **РН20.** Дотримуватися вимог безпеки життєдіяльності й охорони праці під час експлуатації лабораторного обладнання. Після завершення цього курсу студент буде: **знати** – особливості будови кристалічних матеріалів, – основні види матеріалів для класичної та квантової електроніки: провідники, напівпровідники, діелектрики, магнітні матеріали; – особливості фізичних явищ в матеріалах для електроніки;

<table>
<tr><td></td><td>класифікацію, властивості і область застосування квантових матеріалів, принципи їх вибору для застосування у виробництві виробів квантової електроніки;
– основні відомості про призначення і технології виробництва квантових матеріалів для електроніки;
вміти
– вибирати матеріали на основі аналізу їх властивостей для конкретного застосування у виробництві виробів квантової електроніки;
– підбирати матеріали за їх призначенням та умовами експлуатації для виконання робіт;
– експлуатувати контрольно-вимірювальне обладнання для вимірювання параметрів і характеристик матеріалів для виробництва виробів твердотільної електроніки;</td></tr>
<tr><td>Ключові слова</td><td>Квантові матеріали, напівпровідник, метал, діелектрик, фазові рівноваги, електрофізичні властивості, монокристал, хімічні сполуки.</td></tr>
<tr><td>Формат курсу</td><td>Очний</td></tr>
<tr><td></td><td>Проведення лекцій, лабораторних робіт та консультації для кращого розуміння тем</td></tr>
<tr><td>Теми</td><td>Наведено у таблиці 1</td></tr>
<tr><td>Підсумковий контроль, форма</td><td>Іспит в кінці семестру
комбінований</td></tr>
<tr><td>Пререквізити</td><td>Для вивчення курсу студенти потребують базових знань з загальної фізики, квантової механіки, кристалографії, фізичного матеріалознавства.</td></tr>
<tr><td>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</td><td>Презентація, лекції, проведення досліджень, дискусія</td></tr>
<tr><td>Необхідне обладнання</td><td>Персональний комп’ютер, операційні системи (Windows, Linux), загальновживані комп'ютерні програми, проектор, електричні печі, вакуумний пост для напилення тонких плівок, оптичний та електронний мікроскопи, рентгенівський дифрактометр, установка для вимірювання електропровідності.</td></tr>
<tr><td>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</td><td>Оцінювання проводиться за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за наступним співвідношенням:
• лабораторні роботи: 20% семестрової оцінки; максимальна кількість балів – 20 = 5 робіт х 4 бали.
За якісне виконання однієї лабораторної роботи студент отримає 4 бали з навчальної дисципліни.
Шкала оцінювання лабораторної роботи
<table>
<tr><th>Бали</th><th>Критерії оцінювання</th></tr>
<tr><td>4</td><td>Здобувач самостійно провів експеримент відповідно до ходу роботи в повному обсязі, отримав валідні дані, грамотно обробив результати експерименту. Склавши письмовий звіт з виконання роботи, зробив обґрунтований висновок. На захисті продемонстрував глибокий рівень знань з тематичної лабораторної роботи. Більш високим рівнем вважається виконання роботи (за можливості) за самостійно складеним оригінальним планом і обґрунтування його вибору.</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Студент самостійно провів експеримент відповідно до ходу роботи, отримав валідні дані, обробив з незначними математичними помилками результати експерименту, склав</td></tr>
</table></td></tr>
</table>

	письмовий звіт з виконання роботи, самостійно робить висновки, на захисті продемонстрував достатній рівень знань.
2	Студент виконав експеримент відповідно до ходу роботи. Одержані результати дають можливість сформувати правильні висновки або їх частину. Під час математичної обробки та оформлення роботи допущено помилки. На захисті тематичної лабораторної роботи продемонстровано задовільний рівень знань.
1	Студент провів експеримент з допомогою лаборанта/викладача, частково обробив результати експерименту, склав письмовий звіт з виконання роботи без належного оформлення, на захисті продемонстрував базовий рівень знань.
0	Здобувач не представив до захисту звіт з відповідної тематичної лабораторної роботи.

• два контрольні заміри (модулі): 30% семестрової оцінки; максимальна кількість балів – 30. В межах кожного заміру за якісне виконання здобувач може отримати до 15 балів з навчальної дисципліни.

Шкала оцінювання контрольного заміру

Кількість балів	**% правильних відповідей**
15	100-96
14	95-91
13	90-86
12	85-81
11	80-76
10	75-71
9	70-66
8	65-61
7	60-56
6	55-51
5	50-46
4	45-41
3	40-36
2	35-31
1	30-26
0	25 і менше

Оцінювання письмового контрольного заміру (0–15 балів) враховує рівень сформованості знань та вмінь на проміжному етапі вивчення навчальної дисципліни (модуль), відповідно 15 балів студентотримує за 100–96% правильних відповідей, 14 балів – 95–91% прав. відпов., 13 балів – 90–86% прав. відпов., 12 балів – 85–81% прав. відпов.,11 балів – 80–76% прав. відпов., 10 балів – 75–71% прав. відпов., 9 балів – 70–66% прав. відпов., 8 балів – 65–61% прав. відпов., 7 балів – 60–56% прав. відпов., 6 балів – 55–51% прав. відпов., 5 балів – 50-46% прав. відп., 4 бали – 45-41% прав. відпов., 3 бали – 40-36% прав. відпов., 2 бали – 35-31% прав. відпов., 1 бал – 30-26% прав. відпов., 0 балів – 25% і менше прав. відпов.

• іспит: 50% семестрової оцінки. Максимальна кількість балів - 50.

Оцінка за іспит формується на основі виконання студентом тестових та описових завдань. На іспит виноситься 24 тестові питання, кожне з яких оцінюється по одному балу. Виконання описових письмових

	завдань передбачає викладення студентом матеріалу який дає змогу оцінити рівень засвоєння теоретичного матеріалу. На іспит виноситься два описових питання з різних змістових модулів, які оцінюються по 13 балів кожне. Підсумкова максимальна кількість балів - 100. У разі відсутності студента під час проведення лабораторних занять чи на контрольних замірах з поважних причин йому надається право на відпрацювання. У всіх інших випадках відсутність здобувача автоматично зараховується йому як незадовільна оцінка (0 балів) за відповідну тематичну лабораторну робот чи контрольний замір. Незадовільну оцінку студент має право перескласти. Додатковий термін перездачі призначає викладач. **Письмові роботи:** Очікується, що студенти виконають декілька видів письмових робіт (модульна контрольна робота). **Академічна доброчесність**: Очікується, що роботи студентів будуть їх оригінальними дослідженнями чи міркуваннями. Відсутність посилань на використані джерела, фабрикування джерел, списування, втручання в роботу інших студентів становлять, але не обмежують, приклади можливої академічної недоброчесності. Виявлення ознак академічної недоброчесності в письмовій роботі студента є підставою для її незарахуванння викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи обману. **Відвідання занять** є важливою складовою навчання. Очікується, що всі студенти відвідають усі лекції і лабораторні зайняття курсу. Студенти мають інформувати викладача про неможливість відвідати заняття. У будь-якому випадку студенти зобов'язані дотримуватися усіх строків визначених для виконання усіх видів письмових робіт, передбачених курсом. **Література.** Уся література, яку студенти не зможуть знайти самостійно, буде надана викладачем виключно в освітніх цілях без права її передачі третім особам. Студенти заохочуються до використання також й іншої літератури та джерел, яких немає серед рекомендованих. **Політика виставлення балів.** Враховуються бали набрані на поточному тестуванні, самостійній роботі, бали за лабораторні роботи, та бали підсумкового тестування. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час практичного заняття; недопустимість пропусків та запізнень на заняття; користування мобільним телефоном, планшетом чи іншими мобільними пристроями під час заняття в цілях не пов'язаних з навчанням; списування та плагіат; несвоєчасне виконання поставленого завдання і т. ін. Додаткові бали (до 10 включно) можна отримати за результатами наукової роботи студентів (написання тез, статті, участь у вітчизняних та/або міжнародних заходах або конкурсах за тематикою навчальної дисципліни). Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються
Питання до екзамену.	1. Типи хімічного зв'язку в кристалах. 2. Напівпровідникові матеріали. Основні характеристики напівпровідників. 3. Прості напівпровідники. Кремній, германій, олово. 4. Елементи підгрупи V А. Фосфор, арсен, стибій, вісмут 5. Елементи підгрупи VI А. Сірка, селен, телур. 6. Основні закономірності формування напівпровідникових сполук. 7. Подвійні алмазоподібні напівпровідникові сполуки.

	8. Сполуки типу AIIIBV. 9. Сполуки типу AIIBVI. 10. Сполуки типу 11. Квантова теорія атомів та твердих тіл. 12. Утворення енергетичних зон в кристалах. 13. Енергія Фермі. 14. Ефективна маса електрона. 15. Густина електронних станів. 16. Електронна структура напівпровідників. Зони Брілюена. Прямозонні та непрямозонні напівпровідники. 17. Зонна структура елементарних напівпровідників та напівпровідникових сполук. 18. Електронна теорія металів. Провідність металів. 19. Плазмоніка. Квантова плазмоніка. 20. Методи дослідження поверхневих поляритонів. 21. Типи ізоляторів : зонні, ізолятори Мотта, Андерсонівські, топологічні. 22. Квантовий ефект Холла 23. Квантовий спіновий ефект Холла. Двовимірні топологічні ізолятори 24. Тривимірні топологічні ізолятори 25. Основні поняття спінтроніки. 26. Гігантський магнітоопір. 27. Гігантський магнітоопір у надгратках і наносистемах. 28. Застосування ефекту гігантського магнітоопору. 29. Надпровідність в металах та сполуках. 30. Взаємодія магнітного поля з надпровідниками. 31. Квантування магнітного потоку в надпровідниках другого роду. Вихори Абрикосова. 32. Вплив спінінгу вихорів Абрикосова на електрофізичні властивості надпровідників. 33. Графен та його різновидності. 34. Зонна структура та електрофізичні властивості графену. Рівні Дірака-Ландау. 35. Прилади електроніки на основі графену. 36. Інші типи двовимірних матеріалів (силіцен, станен, бісмутен та ін.). 37. Твістроніка. 38. Методи вирощування монокристалів. 39. Планарні технології мікроелектроніки. Молекулярна, газова та рідко фазна епітаксія. 40. Планарні технології мікроелектроніки. Іонне розпилення та іонна імплантація. 41. Планарні технології мікроелектроніки. Магнетронне напилення тонких плівок. 42. Планарні технології мікроелектроніки. Фотолітографія. 43. Методи отримання двовимірних матеріалів.
Опитування	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

Таблиця 1

Схема курсу **«Проблеми електронного наноматеріалознавства»**

Тиж.	Тема, план, короткі тези	Форма діяльності (заняття)* *лекція, самостійна, дискусія, групова робота)	Література.*** Ресурси в інтернеті	Завдання	Термін виконання
1–2	Тема 1. Класичні матеріали електронної техніки.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 5 год.	Б-3, Д-2	Підготовка до лабораторної роботи	2 тижні
3–4	Тема 2. Методи отримання матеріалів для електроніки.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 5 год.	Б-1, 2, 4, Д-1	Підготовка до лабораторної роботи	2 тижні
5–6	Тема 3. Основи зонної теорії твердих тіл.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 8 год.	Б-3, Д-4	Підготовка до лабораторної роботи Підготовка до захису лабораторних робіт	2 тижні
7–8	Тема 4. Провідні матеріали. Квантова плазмоніка.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 8 год.	Б-1, 2, 3, Д-2, 8	Підготовка до лабораторної роботи Підготовка до захису лабораторних робіт	2 тижні
9–10	Тема 5. Квантові надпровідникові матеріали.	Лекції —1 год. Контрольний замір – 1год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 8год.	Б-1, 2, 4, Д-6	Підготовка до лабораторної роботи Підготовка до захису лабораторних робіт	2 тижні
11–12	Тема 6. Топологічні ізолятори.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год. самостійна робота — 8 год.	Б-1, 2, 4, Д-6	Підготовка до лабораторної роботи Підготовка до захису лабораторних робіт	2 тижні
13–14	Тема 7. Квантові магнітні матеріали та спінтроніка.	Лекції — 2 год. лабораторні — 2 год., самостійна робота — 8год.	Б-1, 2, 4, Д-6	Підготовка до лабораторної роботи Підготовка до захису лабораторних робіт	2 тижні
15–16	Тема 8. Одно- та двовимірні квантові матеріали.	Лекції — 2 год. лабораторні — 1 год. Контрольний замір – 1 год самостійна робота — 8 год.	Б-1, 2, 4, Д-6	Підготовка до лабораторної роботи Підготовка до захису лабораторних робіт	2 тижні