

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Львівський національний університет імені Івана Франка**  
**Факультет електроніки та комп'ютерних технологій**  
**Кафедра фізичної та біомедичної електроніки**

**Затверджено**

На засіданні кафедри фізичної та біомедичної електроніки  
факультету електроніки та комп'ютерних  
технологій  
Львівського національного університету  
імені Івана Франка  
(протокол №1 від 28 серпня 2024 р.)

Завідувач кафедри  
професор Олег БОРДУН



---

**Силабус з навчальної дисципліни**

**«Мікро- і наноспеціалізовані елементи та системи»,  
що викладається в межах ОП  
«Пристрої та матеріали сенсорної електроніки »  
другого (магістерського) рівня вищої освіти  
для здобувачів зі спеціальності  
176 «Мікро- та наносистемна техніка »**

Львів 2024

Назва дисципліни	Мікро- і наноспеціалізовані елементи та системи
Адреса викладання дисципліни	м. Львів, вул. Драгоманова, 50
Факультет та кафедра, за якою закріплена дисципліна	Факультет електроніки та комп'ютерних технологій, кафедра фізичної та біомедичної електроніки
Галузь знань, шифр та назва спеціальності	17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації, 176 Мікро- та наносистемна техніка
Викладачі дисципліни	Бігун Роман Іванович, доктор фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки
Контактна інформація викладачів	roman.bihun@lnu.edu.ua
Консультації з питань навчання по дисципліні відбуваються	Консультації в день проведення лекційних занять (за попередньою домовленістю). Також можливі он-лайн консультації через MS Teams. Для погодження часу он-лайн консультацій слід писати на електронну пошту викладача.
Сторінка дисципліни	<a href="https://electronics.lnu.edu.ua/course/mikro-i-nanospetsializovani-elementy-ta-systemy/">https://electronics.lnu.edu.ua/course/mikro-i-nanospetsializovani-elementy-ta-systemy/</a>
Інформація про дисципліну	Дисципліна «Мікро- і наноспеціалізовані елементи та системи» є вибірковою дисципліною з спеціальності 176 Мікро- та наносистемна техніка для освітньої програми « Пристрої та матеріали сенсорної електроніки », яка викладається в 1-му семестрі в обсязі 6 кредитів (за Європейською Кредитно-Трансферною Системою ECTS).
Коротка анотація дисципліни	<p>Курс „Мікро- і наноспеціалізовані елементи та системи” є одним з основних у профільюючій підготовці студентів технічних та інженерних спеціальностей. Без ґрунтовних знань з кінетичних явищ у нанорозмірних системах та металевих конденсатах, неможлива майбутня повноцінна професійна діяльність в областях математичного моделювання, інженерного проектування, розробки та діагностики сучасної елементної бази тощо. Закони та явища фізики нанорозмірного стану є основою сучасної мікро та наноелектроніки, фундаментом для різних галузей науки та техніки. Їхнє вивчення під час лекційних і лабораторних занять розширює пізнавальні та інженерні навички та дає змогу опанувати багато інших важливих курсів на факультеті електроніки.</p> <p>Лабораторний практикум з курсу „ Мікро- і наноспеціалізовані елементи та системи” для студентів факультету електроніки є важливим фундаментом для набуття навичок роботи з апаратурою, дає відомості про методи дослідження фізичних явищ, закладає передумови для самостійної наукової роботи.</p>
Мета та цілі дисципліни	<b>Метою</b> вивчення нормативної дисципліни « <b>Мікро- і наноспеціалізовані елементи та системи</b> » є формування в майбутнього спеціаліста цілісної картини фізичних явищ і процесів при роботі, проектуванні та керуванні пристроями сучасною мікропроцесорної електроніки. Це передбачає виклад основ явищ перенесення заряду в нанорозмірних системах та роботи пристроїв сучасної мікро- та нанопроцесорної техніки. Предмет навчальної дисципліни включає основні поняття, закономірності, закони, проектування та розробку керуючих елементів мікропроцесорної техніки, що відносяться до розділів фізики нанорозмірного стану та електроніки.

Література для вивчення дисципліни	<p style="text-align: center;"><b>Основна література:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Гуртів В.А. Твердотільна електроніка. К.: Техносфера, 2017. 408 с.</li> <li>2. Готра З.Ю. Фізичні основи електронної техніки. Львів: Бескид Біт, 2017. 55с.</li> <li>3. Сусліков Л.М., Дьордяй В.С. Фізика і технологія наноматеріалів: навчальний посібник для студентів фізико-технічних спеціальностей. – Ужгород: Видавництво «Говерла», 2023. – 437 с.</li> <li>4. Матвійків М.Д. Елементна база електронних апаратів: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2017р. 428с.</li> <li>5. Б.П. Коман. Функціональні елементи інформаційних систем на базі напівпровідникової електроніки: навчальний посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2018. 794 с.</li> <li>6. Бондаренко І.М. Сучасна компонента база електронних систем. Навчальний посібник. Харків, ХНУРЕ: 2020.- 268 с.</li> <li>7. Мельник О.С. Компоненти мікро- та наноелектроніки. Конспект лекцій. - К.: Каф. електроніки ІАН НАУ, 2013. -191 с. <a href="https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42846">https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42846</a></li> </ol> <p style="text-align: center;"><b>Додаткова література:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>8. V.V. Odinokov, G.Ya. Pavlov. New processing equipment for innovative technologies micro, nano - and radio electronics. Technology and de-signing in the electronic equipment, 2011. v.3. PP. 41 - 43.</li> <li>9. Находкін М.Г. Фізичні основи мікро- та наноелектроніки: підручник; МОН України; КНУ, 2005. 432 с</li> <li>10. M. C. Löbl, S. Paesani, and A. S. Sørensen, Efficient percolation simulations for lossy photonic fusion networks / Physical Review Research <b>6</b>, 033273 (2024). DOI: <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.6.033273">10.1103/PhysRevResearch.6.033273</a></li> </ol>
Обсяг курсу	Кількість кредитів ЄКТС: 6 (180 год), з них: 48 години аудиторних занять (16 години лекцій, 32 години лабораторних робіт), 132 годин самостійної роботи.
Очікувані результати навчання	<p>Після завершення курсу студент буде:</p> <p><b>Знати</b> основні ідеї, поняття та закони сучасної наноелектроніки електроніки, фізики розмірного ефекту, межі їхнього застосування, тенденції та напрямки розвитку сучасної наноелектроніки на основі отриманих знань в області фізики розмірного стану та сучасної мікро- і наноелектроніки; базові принципи роботи сучасних функціональних та цифрових пристроїв електроніки; головні технічні проблеми, щодо експлуатації, режимів роботи, діапазонів та особливостей застосування сучасних функціональних та цифрових елементів і вузлів наносистемної техніки.</p> <p><b>Вміти</b> застосовувати вивчені закони і принципи для постановки та розв'язування задач з сучасної наноелектроніки; застосовувати здобуті знання на практиці, під час вивчення та дослідження роботи елементів сучасної наноелектроніки; пояснювати електричні процеси та явища, що є в основі принципів роботи сучасної мікро- та нано- системної техніки, використовуються при роботі цифрової і функціональної техніки; діагностувати алгоритми роботи та область застосування фізичних методів і пристроїв, робота яких ґрунтується на явищах перенесення заряду та впливу на них розмірних ефектів.</p>
Ключові слова	Мікро- та наноелектронні компоненти, системи керування цифровими пристроями, розмірний ефект.
Формат курсу	Очний.
Теми	Див. СХЕМА КУРСУ
Підсумковий контроль, форма	Залік в кінці семестру

<p><b>Пререквізити</b></p>	<p>Для вивчення курсу студенти потребують базових знань у галузі 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації. Необхідні знання з таких розділів математики та фізики: математичний аналіз, кінетичні явища в твердих тілах та іноземна мова (англійська).</p>
<p><b>Навчальні методи та техніки, які будуть використовуватися під час викладання курсу</b></p>	<p>Презентації, лекції, лабораторні роботи, обговорення, дискусії.</p>
<p><b>Необхідне обладнання</b></p>	<p>Мультимедіа, платформа Moodle, платформа MS Teams, комп'ютерне програмне забезпечення. Вакуумні пости ВУП-5М та установки надвисокого вакууму УСУ-4. Ітерференційний мікроскоп МІІ-4, п'єзокварцові давачі товщини, спектрофотометр СФ-46.</p>
<p><b>Критерії оцінювання (окремо для кожного виду навчальної діяльності)</b></p>	<p>Оцінювання проводиться упродовж семестру за 100-бальною шкалою. Бали нараховуються за такими видами робіт з наступним співвідношенням:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• лабораторні роботи: 60% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 60.</li> <li>• контрольні роботи: 40% семестрової оцінки; максимальна кількість балів 40 (2x20 балів).</li> </ul> <p>Загалом упродовж семестру 100 балів.</p>
	<p><b>Академічна доброчесність:</b> Очікується, що лабораторні та контрольні 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 роботі студента є підставою для її незарахування викладачем, незалежно від масштабів плагіату чи шахрування. Жодні форми порушення академічної доброчесності не толеруються. Дотримання вимог Положення про академічну доброчесність: <a href="https://ipcpm.in.ua/wp-content/uploads/3.1.3-pipfk-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf">https://ipcpm.in.ua/wp-content/uploads/3.1.3-pipfk-pro-akademichnu-dobrochesnist.pdf</a></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. Студенти зобов'язані дотримуватися усіх термінів визначених для виконання усіх видів робіт дисципліни</p> <p><b>Література.</b> 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.</p> <p><b>Політика виставлення балів.</b> Враховуються бали набрані під час семестру, виконанні самостійної роботи та бали підсумкового тестування. При цьому обов'язково враховуються присутність на заняттях та активність студента під час лабораторного заняття; недопустимість пропусків та запізнь 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.</p> <p><b>Оцінювання лабораторних робіт</b> (8 лабораторних робіт, максимальна кількість балів: 60) відбувається шляхом оцінки</p>

	<p>підготовки до виконання лабораторної роботи, безпосереднього її виконання та захисту звіту:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• лабораторні роботи 1-8 (0-5 балів за одну роботу)</li> </ul> <p>Бали оцінювання лабораторних робіт нараховуються за наступним співвідношенням:</p> <p>5 – студент в повному обсязі володіє навчальним матеріалом, має повне розуміння розглянутої теми, повністю самостійно реалізує поставлені завдання для виконання роботи, надає правильні відповіді на запитання по темі, демонструє використані підходи, методи, прототипи, моделі відповідно до завдання;</p> <p>4 – студент достатньо розуміє розглянутий матеріал, повністю самостійно реалізує поставлені завдання для виконання роботи, присутні неточності та незначні помилки у відповідях на запитання по темі, демонструє використані підходи, методи, прототипи, моделі відповідно до завдання (або з несуттєвими недоліками);</p> <p>3 – студент не досить добре розуміє розглянутий матеріал та вагається та надає неточні/не конкретні відповіді на запитання по темі, частково самостійно реалізує поставлені завдання для виконання роботи, демонструє використані підходи, методи, прототипи, моделі відповідно до завдання з помірними недоліками;</p> <p>2 – студент погано розуміє розглянутий матеріал, частково самостійно реалізує поставлені завдання для виконання роботи, та в більшості надає помилкові відповіді на питання по темі, демонструє використані підходи, методи, прототипи, моделі відповідно до завдання з суттєвими недоліками;</p> <p>1 - студент погано розуміє розглянутий матеріал та використані підходи, методи, прототипи, моделі відповідно до завдання не функціонують належним чином, не в змозі самостійно реалізувати завдання для виконання роботи, лише при допомозі викладача;</p> <p>0 - студент зовсім не засвоїв розглянутий матеріал, використані підходи, методи, прототипи, моделі відповідно до завдання не функціонують належним чином /не функціонують взагалі, не в змозі при допомозі викладача реалізувати завдання для виконання роботи</p> <p>У підсумку, всі набрані бали множаться на коефіцієнт для переведення у 60-ти бальну шкалу</p> <p><b>Контрольні роботи</b> проводяться у формі тестових завдань по 20 балів за кожну роботу (2x20=40 балів).</p> <p><b>Критерії оцінювання результатів неформальної освіти:</b>  Нарахування балів відбувається за написання студентом тез доповідей на конференціях, наукових статей, участь у діяльності наукових гуртків, участь у наукових семінарах та круглих столах, конкурсах, участь у заходах неформальної освіти за отримання сертифікатів про проходження навчання на різних освітніх платформах (Coursera, Prometheus тощо), курсах на провідних ІТ компаніях за тематикою навчальної дисципліни. Кількість балів визначається відсотком покриття результатів відповідної активності до вимог результатів навчання з навчальної дисципліни.</p>
<p><b>Питання до контрольних робіт</b></p>	<p>Перелік питань та завдань для проведення підсумкової оцінки знань певних тем до контрольних робіт:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Фазовий розмірний ефект в тонких плівках металів</li> <li>2. Вплив температури підкладки на умови зародження плівки металу.</li> <li>3. Залежність періоду градки конденсату металу від його товщини.</li> <li>4. Температура фазового переходу від аморфної до кристалічної фази в</li> </ol>

	<p>плівках металів</p> <p>5. Вплив вакуумних умов на фазовий розмірний ефект в плівках металів</p> <p>6. Варіювання середніми розмірами кристалітів в тонких плівках металів від температури та природи підкладки.</p> <p>7. Вплив поверхнево активних речовин на розміри кристалітів у плівках металів сформованих на їх поверхні.</p> <p>8. Модель класичного розмірного ефекту у явищах перенесення заряду. Теорія Фукса-Зондгеймера.</p> <p>9. Зв'язок питомого опору масивного зразка металу з питомим опором плівки аналогічного масивного зразка.</p> <p>10. Зміст кінетичних коефіцієнтів в теорії Фукса-Зондгеймера.</p> <p>11. Залежність розмірних залежностей кінетичних коефіцієнтів плівок металів від коефіцієнта поверхневої дзеркальності.</p> <p>12. Вплив поверхневих неоднорідностей на явища перенесення заряду в тонких плівках металів (Модель Намба).</p> <p>13. Залежності питомого опору від товщини плівки металу та середньої амплітуди поверхневих неоднорідностей.</p> <p>14. Зміст середньої амплітуди поверхневих неоднорідностей в рамках моделі Намба.</p> <p>15. Особливості розрахунку середньої амплітуди поверхневих неоднорідностей з розмірних залежностей питомого пору плівок металів.</p> <p>16. Модель внутрішнього розмірного ефекту (Маядас-Шацкес).</p> <p>17. Оцінка коефіцієнта міжзеренного тунелювання в нанорозмірні плівці металу (Маядас-Шацкес).</p> <p>18. Вплив середніх лінійних розмірів кристалітів на питомий опір плівок металів.</p> <p>19. Модель внутрішнього розмірного ефекту (Тель-Тосе-Пішара).</p> <p>20. Зв'язок між коефіцієнтами <math>t</math> та <math>g</math> для різних товщин плівок металів.</p> <p>21. Квантовий розмірний ефект (QSE) в металевих та напівпровідникових статурах.</p> <p>22. Розмірне квантування квазіімпульсу електрона <math>k_z</math> в плоскій металічній структурі.</p> <p>23. Підхід функціоналу густини для дослідження квантового розмірного ефекту в нанорозмірних плівках металів.</p> <p>24. Розмірна поведінка зонної структури від товщини плівки металу в режимі квантового розмірного ефекту.</p> <p>25. Особливості переходу від класичного до квантового режиму перенесення заряду в нанорозмірних плівках металів.</p> <p>26. Моделі квантового перенесення заряду в тонких плівках металів.</p> <p>27. Оцінка ходу розмірної залежності питомої провідності в плівках металів в режимі QSE (підхід Фішмана-Цалецького, Триведі-Ашкрофта та SHW).</p>
<b>Опитування</b>	Анкету-оцінку з метою оцінювання якості курсу буде надано по завершенню курсу.

### СХЕМА КУРСУ

Тиж.	Тема, план, короткі тези	Форма діяльності (заняття)	Література. Ресурси в Інтернеті	Завдання (лабораторна робота), год	Термін виконання
1-2	Історичний огляд, перспективи і прогнозування розвитку мікро- та наноелектроніки (МНЕ). Електропровідність металів, напівпровідників та	Лекція (2 год)	1, 3-6	Вивчення роботи цифрового перетворювача (паралельний порт-послідовний порт) HW-061 на ARDUINO. (Origin Lab 8) 4 год	кінець поточного тижня

	діелектриків. Технологічні операції формування компонентів МНЕ та їх масштабування.				
3-4	Елементи та пристрої сенсорного типу. Хімічні давачі на польових транзисторах. Біохімічні сенсори на нанокантилеврах. Мікро зважування та основи кварцового давача. Мікро коливальні системи та акселератори. Наномеханічні транзистори.	Лекція (2 год)	1-5, 7-9	Відображення динамічних процесів на 2004A на ARDUINO. (Origin Lab 8) 4 год.	кінець поточного тижня
5-6	Фізичні процеси в структурах нанорозмірних транзисторів (НТ), основні схеми їх вмикання. Параметри і характеристики, схемотехнічні моделі НТ. Класифікація польових, уніполярних транзисторів (НТ). Дискретні та інтегральні ПТ з управляючим переходом (ПТУП). ПТ з ізольованим затвором збагаченого і збідненого типів. Базові, найекономічніші комплементарні транзистори сучасної МНЕ, які мають структуру метал-оксид (діелектрик)-напівпровідник (КМОН).	Лекція (2 год)	1, 3, 4, 7, 8, 9	Вивчення роботи PCF8574AT при передачі на 2004A на базі ARDUINO. (Origin Lab) 4 год.	кінець поточного тижня
7-8	Мікросистемні кремнієві чіпи, кремнієві сенсори тиску та давачі на основі графену.	Лекція (2 год)	1, 3, 4, 7, 8, 9	Вивчення транзисторного польового ефекту на FQPF10N60C. (Origin Lab) 4 год	кінець поточного тижня
9-10	Основні напрями функціональної МНЕ: прилади із зарядовим зв'язком, акустоелектроніка, опто-, магніто- та кріоелектроніка.	Лекція (2 год)	1, 3, 4, 5, 9	Вивчення роботи цифрового модуля РТА9В01 на ARDUINO при вимірюванні температури давачем РТ100. (Origin Lab) 4 год	кінець поточного тижня
11-12	Нанорозмірні компоненти МНЕ: квантові автомати, одноелектронні та двоканальні комірки. Основні відомості про пасивні елементи МНЕ: резистори, конденсатори та індуктивності.	Лекція (2 год)	1, 3, 4, 7, 8, 9	Вивчення роботи адресної світлодіодної ленти на чіпі WS2812b на ARDUINO (Origin Lab 8) 4 год.	кінець поточного тижня
13-14	Мікросистемі технології температурних сенсорів на базі терморезисторів. Цифрові температурні сенсори. Діодна термометрія. Пристрої термосхемотехнічних рішень на базі н/п та металічних плівок металів.	Лекція (2 год)	1, 3, 4, 7, 8, 9	Вивчення роботи цифрового модуля HW-061 на ARDUINO. (Origin Lab 8) 4 год	кінець поточного тижня

15-16	Мікросистемні підходи у пристроях перетворювачів електромагнітної енергії в електричну. Перетворювачі на бар'єрних наноструктурах та МДН-структурах з тунельно-тонким діелектриком.	Лекція (2 год)	1, 3, 4, 6, 9	Керування цифровим модулем INA219 DC Current Monitor на ARDUINO. (Origin Lab 8) 4 год	кінець поточного тижня
-------	---	-------------------	---------------	--	------------------------------