



# Функціональні матеріали і структури мікро- та наноелектроніки

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### 1. Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Другий (освітньо-науковий)
Галузь знань	15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність	153 Мікро- та наносистемна техніка
Освітня програма	Мікро- та наносистемна техніка
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	5 кредитів ЄКТС (150 годин: лек. – 36 год, лаб. – 36 год, СРС – 78 год)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен / МКР, РГР
Розклад занять	<a href="http://roz.kpi.ua">http://roz.kpi.ua</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: професор, доктор фіз.-мат. наук Поплавко Юрій Михайлович Лабораторні: Поплавко Юрій Михайлович <a href="mailto:yu.poplavko@kpi.ua">yu.poplavko@kpi.ua</a>
Розміщення курсу	<a href="https://classroom.google.com/c/NTg2NzkwNzc4MDUx">https://classroom.google.com/c/NTg2NzkwNzc4MDUx</a>

### 2. Програма навчальної дисципліни

#### 1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Навчальна дисципліна «Функціональні матеріали і структури мікро- та наноелектроніки» є складовою частиною підготовки студентів за спеціальністю «153 Мікро- та наносистемна техніка» і належить до циклу професійної підготовки.

**Метою** дисципліни "Функціональні матеріали і структури мікро- та наноелектроніки" є формування у студентів здатностей до практичного використання сучасних моделей та засобів дослідження під час вирішенні науково-технічних задач; навчити самостійно розробляти моделі новітніх електронних процесів, а також технологічних процесів електроніки.

Дисципліна формує у здобувачів вищої освіти такі загальні та фахові компетентності (згідно освітньо-наукової програми «Мікро- та наносистемна техніка»):

- ЗК1 – Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;
- ЗК2 – Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово;
- ЗК4 – Здатність проводити дослідження на відповідному рівні;
- ЗК5 – Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел;
- ЗК6 – Здатність генерувати нові ідеї (креативність);
- ФК1 – Здатність ефективно використовувати складне контрольно-вимірювальне, технологічне та дослідницьке обладнання при дослідженнях та виробництві матеріалів,

компонентів, приладів і пристроїв мікро- та наносистемної техніки різноманітного призначення;

- ФК14 – Здатність створювати нові функціональні матеріали та прилади і системи мікро- та наносистемної техніки на їх основі.

Програмними результатами навчання є (згідно освітньо-наукової програми «Мікро- та наносистемна техніка»):

- ПРН1 – Формулювати і розв'язувати складні інженерні, виробничі та/або наукові задачі під час проектування, виготовлення і дослідження мікро- та наносистемної техніки різноманітного призначення та створення конкурентоспроможних розробок, втілення результатів у бізнес-проектах;
- ПРН3 – Оптимізувати конструкції систем, пристроїв та компонентів мікро- та наносистемної техніки, а також технології їх виготовлення;
- ПРН4 – Застосовувати спеціалізовані концептуальні знання, що включають сучасні наукові здобутки, а також критичне осмислення сучасних проблем у сфері мікро- та наноелектроніки, для розв'язування складних задач професійної діяльності;
- ПРН8 – Збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її;
- ПРН9 – Забезпечувати якість виробництва; обирати технології, що гарантують отримання необхідних характеристик твердотільних пристроїв; застосовувати сучасні методи контролю мікро- та наносистемної техніки;
- ПРН19 – Моделювати процеси в мікроелектронних приладах та системах, аналізувати отримані дані та на їх основі прогнозувати параметри новітніх приладів та систем мікро- та наносистемної техніки, електронних біомедичних систем;
- ПРН20 – Проводити проектування, випробування, експериментальні та теоретичні дослідження властивостей матеріалів, наноструктур та технологій, компонентів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки, включаючи електронні біомедичні системи.

## **2. Постреквізити дисципліни "Функціональні матеріали і структури мікро- та наноелектроніки" (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (постреквізити дисципліни): ПО8 Наукова робота за темою магістерської дисертації; ПО9 Науководослідна практика; ПО10 Виконання магістерської дисертації.

## **3. Зміст навчальної дисципліни "Функціональні матеріали і структури мікро- та наноелектроніки"**

*Перелік розділів і тем:*

**Розділ 1.** Розмірні ефекти. Базові поняття.

*Тема 1. Властивості нанокластерів*

*Тема 2. Квантоворозмірні ефекти.*

*Тема 3. Нанопровідникові наноструктури.*

**Розділ 2.** Наноматеріали.

*Тема 1. Наноструктурні метали.*

*Тема 2. Вуглецеві наноструктури.*

Тема 3. Магнітні наноструктури.

### **Розділ 3. Нанотехнології.**

Тема 1. Вуглецеві нанотрубки.

Тема 2. Магнітні наноматеріали.

Тема 3. Напівпровідникові наноматеріали.

Тема 4. Нанолітографія.

Тема 5. Епітаксціальні методи.

Тема 6. Зондові методи.

Тема 7. Нанобіомагнетизм

### **Розділ 4. Елементи наноелектроніки.**

Тема 1. Бінарні транзистори.

Тема 2. Одноелектронні транзистори.

Тема 3. Наномагнітні плівки

## **4. Навчальні матеріали та ресурси дисципліни "Функціональні матеріали і структури мікрота нано- електроніки"**

### **Основна література:**

1. Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, Ю.І. Якименко "Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка", 2012 р., об'ємом 300 стор. НТУУ "КПІ" Навчальний посібник рекомендований МОН України, лист №1.11-2442 від 25.93 2011. (Електронна бібліотека каф. Мікроелектроніки)
2. Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, В.І. Ільченко, Ю.І. Якименко. "Мікроелектроніка і наноелектроніка", 2010, 157 стор. Навчальний посібник, гриф наданий Методичною радою КПІ. (Електронна бібліотека каф. Мікроелектроніки)

### **Додаткова література:**

1. Ю.М. Поплавко, Фізика твердого тіла. Том 1 Структура, квазічастинки, метали, магнетика, Київ, вид. «Інженірінг». **Підручник**, 2017, 415 стор. Затверджено Вченою Радою НТУУ КПІ (протокол №5 15.05 2017 р.) (Електронна бібліотека каф. Мікроелектроніки)
2. Ю.М. Поплавко, Фізика твердого тіла. Том 2 Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи, Київ, вид. «Інженірінг». **Підручник**, 2017, 379 стор. Затверджено Вченою Радою НТУУ КПІ (протокол №5 15.05 2017 р.) (Електронна бібліотека каф. Мікроелектроніки)
3. Yu.M. Poplavko. Solid state elementary electrophysics, Vol. 1 Symmetry, quasi-particles, metals, magnetism. Kyiv, Edited by Igor Sicorsky Polytechnic Institute, 2016, 364 pages. Tutorial approved by Academic Council of Igor Sicorsky Polytechnic Institute (protocol №11 of November 7, 2016).
4. Yu.M. Poplavko. Solid state elementary electrophysics, Vol. 2 Semiconductors, dielectrics, phase transitions. Kyiv, Edited by Igor Sicorsky Polytechnic Institute, 2016, 364 pages. Tutorial approved by Academic Council of Igor Sicorsky Polytechnic Institute (protocol №11 of November 7, 2016).
5. Yuriy M. Poplavko. Electronic materials. Principles and applied science. 2019, 683 pages. Edited by ELSEVIER, USA.
6. Yu.M. Poplavko, Yu.I. Yakymenko. Functional dielectrics for electronics. Fundamentals of conversion properties. 2020, 294 pages. Edited by ELSEVIER, USA.
7. Yuriy M. Poplavko. Dielectric spectroscopy of electronic materials. Applied physics of dielectrics. 2021, 425 pages. Edited by ELSEVIER, USA.

## 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

### Лекційні заняття

*Лекція 1. Властивості нанокластерів*

*Лекція 2. Квантоворозмірні ефекти.*

*Лекція 3. Навпровідникові наноструктури.*

*Лекція 4. Наноструктурні метали.*

*Лекція 5. Вуглецеві наноструктури.*

*Лекція 6. Магнітні наноструктури.*

*Лекція 7. Вуглецеві нанотрубки.*

*Лекція 8. Магнітні наноматеріали.*

*Лекція 9. Навпровідникові наноматеріали.*

*Лекція 10. Нанолітографія.*

*Лекція 11. Епітаксціальні методи.*

*Лекція 12. Зондові методи.*

*Лекція 13. Нанобіомагнетизм*

*Лекція 14. Бінарні транзистори.*

*Лекція 15. Одноелектронні транзистори.*

*Лекція 16. Наномагнітні плівки.*

### Лабораторні роботи

*Лабораторна робота 1. Дослідження дисперсії діелектричної проникності та втрат сегнетоелектриків у низькочастотному діапазоні*

*Лабораторна робота 2. Радіочастотна спектроскопія напівпровідників*

*Лабораторна робота 3. Радіочастотна спектроскопія магнетиків*

*Лабораторна робота 4. Дослідження мікрохвильових властивостей напівпровідників*

*Лабораторна робота 5. Дослідження мікрохвильових властивостей термостабільних діелектриків*

*Лабораторна робота 6. Мікрохвильова діелектрична спектроскопія діелектриків і сегнетоелектриків*

## 6. Самостійна робота магістра

В дисципліні передбачені такі види самостійної роботи:

- підготовка до аудиторних занять -- протягом семестру,
- більш глибоке опанування навчальних матеріалів -- протягом всього періоду вивчення дисципліни.

## 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Заохочується надання відповідей на завдання з використанням англійської мови.

В рамках дисципліни заплановано наступні види навчальних занять:

- лекції;
- лабораторні заняття;
- самостійна робота.

Теми дисципліни взаємозв'язані, матеріал вивчається в логічній послідовності. На заняттях розкриваються найбільш суттєві теоретичні питання, які дозволяють забезпечити студентам можливість глибокого самостійного вивчення всього програмного матеріалу. Теми та порядок виконання лабораторних занять сформовано в логічній послідовності і повністю узгоджуються з лекційним матеріалом. Теоретичні та лабораторні знання поглиблюються шляхом самостійної роботи з використанням рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів мережі Internet.

На заняттях використовуються персональний комп'ютер, загальноживані комп'ютерні програми і операційні системи, проектор, інтерактивна дошка, інтернет-ресурси.

Контроль засвоєння навчального матеріалу здійснюється індивідуальним опитуванням (тестуванням), модульною контрольною роботою, розрахунково-графічною роботою та екзаменом.

### Відвідування занять

Студентам рекомендується відвідувати заняття. Система оцінювання орієнтована на отримання балів за активність студента, а також виконання завдань, які здатні розвинути практичні уміння та навички.

### Порушення термінів виконання завдань та заохочувальні бали

Заохочується надання відповідей на завдання з використанням англійської мови.

Заохочувальні бали	
Критерій	Ваговий бал
Участь у міжнародних, всеукраїнських та/або інших заходах та/або конкурсах (за тематикою навчальної дисципліни)	5-10 балів в залежності від місця, яке зайняв
Виступ на занятті з ініціативною доповіддю на обрану творчу тему за програмою дисципліни	5 балів
Відповіді на завдання з використанням англійської мови	5 балів

### Пропущені контрольні заходи

Результат контрольної роботи для студента, який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент має можливість написати контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50% від загальної кількості балів. Повторне написання контрольної роботи не допускається.

### Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

### *Норми етичної поведінки*

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

### *Процедура оскарження результатів контрольних заходів*

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами.

Студенти мають право оскаржити результати контрольних заходів, але обов'язково аргументовано, пояснивши з яким критерієм не погоджуються відповідно до оціночного листа та/або зауважень.

## **8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)**

*Поточний контроль:* опитування за темою заняття, письмові відповіді на індивідуальні завдання

*Календарний контроль:* провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. *Семестровий контроль:* екзамен

*Умови допуску до семестрового контролю:* мінімальна позитивна оцінка за індивідуальне завдання.

*Поточний контроль:* тестування (експрес-опитування), розрахунково-графічна робота, контрольна робота.

*Календарний контроль:* атестація провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог програми.

Критерій		Перша атестація	Друга атестація	
Термін атестації		8-ий тиждень	14-ий тиждень	
Умови отримання атестації	Поточний рейтинг	$\geq 10$ балів	$\geq 30$ балів	
	Поточний контрольний захід	Тестування 1-2	+	-
	Поточний контрольний захід	Контрольна робота 1	+	-
	Поточний контрольний захід	Тестування 3-8	-	+
	Поточний контрольний захід	Контрольна робота 2	-	+

*Семестровий контроль:* екзамен

*Умови допуску до семестрового контролю:*

Обов'язкові:

- Виконані тести
- Виконана розрахунково-графічна робота
- Виконані контрольні роботи
- Поточний рейтинг  $RD \geq 30$  балів.

Необов'язкові:

- Активність на заняттях.
- Позитивний результат першої атестації та другої атестації.

*Система рейтингових балів:*

1. Тести. Максимальна кількість балів – 40. Тестування за темами дисципліни здійснюється на основі тестів і залежить від тривалості контрольного заходу (5-10 хвилин). Кожний блок тестів відповідає вимогам змістової характеристики теоретичних тем.

2. Контрольна робота. Максимальна кількість балів – 20.

- вичерпна відповідь – 18 – 20 балів;
- відповідь з незначними неточностями – 15-17 балів;
- неповна відповідь та незначні помилки – 9 – 14 балів;
- грубі помилки – 5-8
- незадовільна відповідь – 0 балів.

3. Екзамен. Максимальна кількість балів – 40.

Умовою допуску до семестрового контролю є виконання усіх поточних контрольних заходів та рейтинг більший за 30 балів.

Студенти, які отримали за рейтингом позитивну оцінку (набрали протягом семестру не менше ніж 60 балів ( $RD \geq 30$ )), можуть бути атестовані за цими балами без написання контрольної роботи.

Студенти, які отримали менше 60 балів, виконують контрольну роботу і захищають її у вигляді співбесіди. У цьому разі рейтингова оцінка складається з результатів роботи в семестрі ( $RD \geq 30$  балів) та результатів контрольної роботи

Якщо екзаменаційна контрольна робота не може бути позитивно оцінена, то сумарна рейтингова оцінка залишається незмінною.

- вичерпна відповідь – 35 – 40 балів;
- відповідь з незначними помилками – 25-34 балів;
- неповна відповідь та незначні помилки – 15 – 24 балів;
- грубі помилки – 5-14
- незадовільна відповідь – 0 балів.

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

## 9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

*Контрольні запитання*

*1 тема*

1. Що таке хімічний зв'язок частинок?
2. Перерахуйте і поясніть основні види хімічних зв'язків.
3. Металеві, іонні і ковалентні зв'язки
4. Як змінюється розподіл електронного заряду з поступовим переходом зв'язків: металічний-ковалентний-іонний?
5. В яких кристалах домінують Ван-дер-вальсовий і водневий зв'язки?
6. Дефекти структури кристалічної решітки

7. Особливості нуль-вимірних дефектів
8. Дислокації та планарні дефекти
9. Перерахуйте основні елементи й операції симетрії.
10. Як вибирати комірку Браве?
11. Опишіть основні з 32 груп точкової симетрії.
12. Чим примітні десять плоских кристалографічних груп симетрії?
13. Що таке симетрія композиційних матеріалів?
14. Чим відрізняється ефект суми от комбінаційного ефекту? *2 тема*
5. Що таке нанофізика?
6. Наведіть приклади  $2D$ ,  $1D$  і  $0D$  наноструктур.
7. Опишіть відношення поверхневих і об'ємних атомів у нанокластерах.
8. У чому полягають особливості структури нанокластерів?
9. Які теплові й магнітні особливості наночастинок?
10. Опишіть оптичні властивості нанокластерів.
11. Яка роль довжини хвилі де Бройля електронів для наноструктур?
12. Енергетичний спектр електронів і густина їх квантових станів для  $2D$  структур.
13. Наведіть приклад реалізації  $2D$  структури.
14. Опишіть квантові нитки – енергетичний спектр і густину квантових станів.
15. Наведіть приклад реалізації  $1D$  структури.
16. Опишіть квантові точки – енергетичний спектр і густину квантових станів.
17. Наведіть приклад реалізації  $0D$  структури.
18. Що таке одноелектронне тунелювання?
19. Як пояснити кулонівську блокаду?
20. У чому полягають особливості балістичного транспорту зарядів?
21. Що таке квантовий ефект Холла?
22. Що таке резонансне тунелювання?
23. Які бувають надгратки?
24. Наведіть приклад енергетичного спектру надгратки. *3 тема*
25. Що таке одноелектронне тунелювання?
26. Як пояснити кулонівську блокаду?
27. У чому полягають особливості балістичного транспорту зарядів?
28. Що таке квантовий ефект Холла?
29. Що таке резонансне тунелювання?
30. Які бувають надгратки?
31. Наведіть приклад енергетичного спектру надгратки.
32. Опишіть визначальні особливості металів.
33. Які бувають метали за розмірністю їх структури?
34. Наведіть приклади аморфних і наноструктурних сплавів.
35. Опишіть наноструктуровані квазікристали.

#### *4 тема*

1. Наведіть класифікацію вуглецевих структур.
2. Наведіть особливості структури і властивості фулеренів.
3. Що таке карбін і графен?
4. Що таке фулерити і фулериди?
5. Опишіть структуру й властивості нанотрубок.
6. Наведіть класифікацію сучасних напівпровідників.
7. Що таке аморфні й органічні напівпровідники?
8. Назвіть методи створення й легування напівпровідників.
9. Назвіть основні технічні засоби нанотехнології.



10. Які особливості нанолітографії?
11. Чим вирізняється рентгенівська літографія?
12. Де застосовується проекційна електронно-променева літографія?
13. Що таке нанодрук?
14. Назвіть основні особливості молекулярно-променевої літографії.
15. Які ви знаєте зондові методи дослідження наноструктур?
16. Розкрийте принцип дії сканувального тунельного мікроскопа.
17. Розкрийте принцип дії атомного силового мікроскопа.
18. Як реалізувати самоорганізацію структур у нанотехнологіях?
19. Опишіть напівпровідникові гетеропереходи. *5 тема*
1. Що таке магнітом'які наноматеріали?
2. Опишіть особливості магнітотвердих наноматеріалів.
3. Як застосовуються наномагнітні плівки у пристроях пам'яті?
4. Чим розрізняються гігантський і колосальний магнітоопір?
5. Що таке тунельний магнітоопір?
6. Чим розрізняються магнітні напівпровідники і діелектрики?

*Контрольні роботи* - Заплановано проведення 2-х рубіжних контрольних робіт з метою з'ясувати ступінь засвоєння навчального матеріалу та стимулювати його повторення та систематизацію. *Модульна контрольна робота* проводиться на тематику: Нанотехнології і електронні пристрої. *Індивідуальні завдання* мають за основну мету – поглиблення знань з кредитного модуля, прищеплення досвіду самостійної роботи зі спеціальною літературою, розвитку уміння практично застосовувати знання, отримані у рамках циклів математичної, природничо-наукової, професійної підготовки. Роботи являють собою самостійний аналіз відомих експериментальних і теоретичних даних студент повинний показати уміння проводити прості теоретичні розрахунки й одержувати прості аналітичні співвідношення: студент повинний показати уміння проводити прості розрахунки за допомогою комп'ютера й одержувати дані про фундаментальні властивості кристалів з експериментальних даних; розрахунки можуть виконуватися в комп'ютерному класі кафедри мікроелектроніки в погоджений час; теми є індивідуальним завданням: неприйнятне списування студентами чужої роботи.

*Методи навчання та інформаційно-методичне забезпечення.* Використовуються такі методи навчання: лекційний, виконання лабораторних робіт та індивідуальних розрахункових завдань в рамках самостійної роботи, рубіжний контроль – модульні контрольні роботи. Надаються методичні посібники та методичні вказівки у друкованому і електронному вигляді, роздаткові матеріали.

*Автор цієї програми* написав та видав навчальний посібник “Нанофізика наноматеріали, наноелектроніка”, 2012 р., об'ємом 300 стор. Крім того, автором надруковано чотири навчальних посібника з курсу *Матеріали електронної техніки*, якими користуються студенти Національного технічного університету України. Ці посібники прикладаються до програми. Нарешті, у 2019 р. автором надрукований у США англomовний учбовий посібник «*ELECTRONIC MATERIALS*», 700 стор., а 2020 році англomовний посібник Yu.M. Poplavko, Yu.I. Yakymenko. *Functional dielectrics for electronics. Fundamentals of conversion properties.* 2020, 294 pages. Edited by ELSEVIER, USA.

### **Робочу програму навчальної дисципліни (силабус)**

"Функціональні матеріали і структури мікро- та наноелектроніки" :

**Складено** професором, докт. фіз.-мат. наук Поплавко Юрієм Михайловичем

**Ухвалено** кафедрою мікроелектроніки (протокол № 19 від 15.06.2022)

**Погоджено** Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/22-1 від 30.06.2022)