



## Наноматеріали та нанотехнології

### Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

#### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	другий (магістри)	
Галузь знань	15	Автоматизація та приладобудування
Спеціальність	153	Мікро-та наносистемна техніка
Освітня програма	ОНП Мікро-та наносистемна техніка	
Статус дисципліни	Нормативна	
Форма навчання	Очна (денна)	
Рік підготовки, семестр	1 курс осінній семестр	
Обсяг дисципліни	5 кредитів	
Семестровий контроль/ контрольні заходи	екзамен	
Розклад занять		
Мова викладання	українська	
Інформація про керівника курсу		
викладачів	Лектор/ Практичні: д.т.н. професор Вербицький В.Г.	
Розміщення курсу	Google Classroom	

#### Програма навчальної дисципліни

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

Метою вивчення навчальної дисципліни «Наноматеріали та нанотехнології» є надання студентам комплексу базових знань, в рамках існуючих природничих наукових положень і сучасного розвитку наноелектроніки, про фізичні властивості та методи отримання наноматеріалів, технології їх виготовлення та методи дослідження наномасштабних структур, а також розгляд різних аспектів практичного застосування наноматеріалів.

Дисципліна формує:

##### 1. Загальні компетентності:

- ЗК 1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.
- ЗК 2. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.
- ЗК 4. Здатність проводити досліджень на відповідному рівні.
- ЗК 5. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

##### 2. Фахові компетентності:

- ФК 1. 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.
- ФК 6. Здатність користуватися сучасними системами пошуку та аналізу науково-технічної інформації, проводити патентний пошук і дослідження та здійснювати захист інтелектуальної власності.
- ФК 8. Здатність створювати нові функціональні матеріали та прилади і системи мікро- та наносистемної техніки на їх основі

В результаті успішного засвоєння дисципліни здобувачі вищої освіти досягають таких **програмних результатів навчання:**

- ПРН 2. Здатність створювати нові функціональні матеріали та прилади і системи мікро- та наносистемної техніки на їх основі
- ПРН 3. Здатність створювати нові функціональні матеріали та прилади і системи мікро- та наносистемної техніки на їх основі.
- ПРН 4. 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.
- ПРН 5. Вільно спілкуватися державною та іноземною мовами усно і письмово для обговорення професійних проблем і результатів діяльності у сфері мікро- та наноелектроніки, презентації результатів досліджень та інноваційних проектів.
- ПРН. 8. Збирати необхідну інформацію, використовуючи науково-технічну літературу, бази даних та інші джерела, аналізувати і оцінювати її.
- ПРН. 9. Забезпечувати якість виробництва; обирати технології, що гарантують отримання необхідних характеристик твердотільних пристроїв; застосовувати сучасні методи контролю мікро- та наносистемної техніки.
- ПРН. 11. Досліджувати процеси у мікро- та наноелектронних системах, приладах й компонентах з використанням сучасних експериментальних методів та обладнання, здійснювати статистичну обробку та аналіз результатів експериментів.
- ПРН. 16. Проводити випробування, експериментальні та теоретичні дослідження властивостей матеріалів, наноструктур та технологій, компонентів та пристроїв мікро- та наносистемної техніки.

#### **Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)**

Курс забезпечує підготовку до вивчення курсів ПО6 «Наукова робота за темою магістерської дисертації», ПО7 «Практика», а також підготовку до ПО8 «Виконання магістерської дисертації».

#### **Зміст навчальної дисципліни**

Розділ 1. Технології отримання монокристалів кремнію.

Розділ 2. Формування діелектричних і провідникових тонких плівок.

Розділ 3. Методи зміни концентрації основних і неосновних носіїв заряду в кремнії.

Розділ 4. Формування топології інтегральних схем.

Розділ 5 Технології створення функціональних елементів інтегральних схем.

Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

2. 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., Удовицький В. Г., Литовченко С. В., Турбін П. В., Чишкала В. О. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 316 с.

3. Поплавко Ю.М., Борисов О. В., Якименко Ю. І. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.

4. Основи наноелектроніки: у 2 кн. Кн.2 «Матеріали і наноелектронні технології : Підручник / Ю.І. Якименко, Д.М. Заячук, В. М.Співак, А.Т. Орлов, О. В. Богдан, В.М. Коваль. – сайт <http://www.fel.ntukpi.kiev.ua>. – К: НТУУ «КПІ», 2016. - 400 с.
5. Куцова В.З., Котова Т.В., Аюпова Т.А. Наноматеріали та нанотехнології. Навч. посібник. У двох частинах. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – 103 с.
6. Основи наноелектроніки. Квантово-механічні засади, структури, фізичні властивості .Під редакцією Д.М.Заячука. іїв 2011рік. 469с.
7. Субмікронні та нанорозмірні структури електроніки. Під редакцією З.Ю.Готри Чернівецький національний університет ім.Юрія Федьковича. 2014 рік 835 с.
8. Вакарчук І.О.Квантова механіка.-Львів. Львівський національний університет ім. Івана Франка, 2004 р.
9. Д.М.Заячук. Нанорозмірні структури і надгратки. -Львів. В-во Національного університету»Львівська політехніка»,2006р.
10. ЗаячукД.М..Нанотехнології і наноструктури. –Львів В-во Національного університету «Львівська політехніка» 2009 р.

Допоміжна література:

1. 1. Ткач О. П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні: Навчальний посібник. - Суми: Сумський державний університет, 2014. - 127 с.
2. Яблонь Л.С., Бойчук В.М. Фізичні основи нанотехнологій. Курс лекцій. – Івано-Франківськ, 2015. – 103 с.
3. 4. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Смик С.Ю. Діагностика наносистем. - Київ: Академперіодика, 2003. - 149 с.
4. 5. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Коротченков О.О., Смик С.Ю. Квантові низькорозмірні системи. - Київ: Академперіодика, 2003. - 308 с..
5. Сайт кафедри мікроелектроніки. Розділ електронна бібліотека: <http://me.kpi.ua/index.php?id=61>

## Навчальний контент

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

Лекції            План лекцій

№п.п

1	Структура кристалів напівпровідників. - кристалічна гратка, зонна структура; - дефекти в кристалах, їх класифікація.
2	Технологія отримання монокристалів кремнію по методу Чохральського: -технологія витягування злитку із розплаву; -основні параметри технологічного процесу; -розподіл домішок при кристалізації Si; -коефіцієнти сегрегації основних домішок в кремнії.
3	Епітаксія монокристалічних плівок кремнію: - газофазна епітаксія в реакторах горизонтального типу, визначення умов ламінарності та турбулентності потоку газової суміші в реакторах; - основні параметри отриманих монокристалічних плівок.
4	Отримання монокристалічних плівок методом молекулярно-променевої епітаксії (МПЕ): - технічні характеристики обладнання МПЕ; - легування моношарів під час осадження плівок.

5	<p>Технологія отримання полікристалічних плівок кремнію:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- кінетика осадження плівок полікремнію в реакторах пониженого тиску;</li> <li>- основні операційні параметри технологічного процесу;</li> <li>- властивості плівок полікремнію;</li> <li>- легування плівок полікремнію під час осадження.</li> </ul>
6	<p>Технологія осадження плівок діоксиду кремнію в реакторах пониженого тиску;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- силанова технологія;</li> <li>-тетраетоксисиланова технологія(ТЕОС);</li> <li>-трихлорсиланова технологія</li> <li>-плазмохімічне осадження плівок SiO<sub>2</sub>.</li> <li>-легування плівок SiO<sub>2</sub> ;</li> </ul>
7	<p>Технологія отримання плівок нітриду кремнію:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-силанова технологія в азотному середовищі;</li> <li>-плазмохімічне осадження плівок нітриду кремнію;</li> <li>-властивості плівок нітриду кремнію..</li> </ul>
8	<p>Отримання шарів SiO<sub>2</sub> методом оксидування кремнію в сухому та вологому кисні:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-модель Діла-Гроува окислення кремнію;</li> <li>-основні закономірності окислення кремнію;</li> <li>-параметри шарів діоксиду кремнію.</li> </ul>
9	<p>Дифузія донорних та акцепторних домішок в кремнії:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-технологія зміни концентрації основних і неосновних носіїв заряду в кремнії шляхом дифузії;</li> <li>-параметри дифузійних процесів;</li> <li>-методи визначення глибини та концентрації домішок в кремнії.</li> </ul>
10	<p>Йонне легування монокристалічного та полікристалічного кремнію:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-обладнання для йонного впровадження домішок;</li> <li>-технологічні параметри йонного легування;</li> <li>-дефектоутворення при йонному легуванні.</li> </ul>
11	<p>Металізація інтегральних схем:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-електронно-променево випаровування металів;</li> <li>-магнетронне розпилення мішеней;</li> <li>-властивості плівок та засоби збільшення коефіцієнту запилення “сходінки”.</li> </ul>
12	<p>Йонно-стимульовані процеси в технології мікроелектроніки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-технології отримання однокомпонентних плівок;</li> <li>-технології отримання багатоконпонентних тонкоплівкових шарів.</li> </ul>
13	<p>Літографічні процеси в мікроелектроніці:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-фотолітографія та її основні характеристики;</li> <li>-електронографія;</li> <li>-рентгенографія;</li> <li>-визначення допусків при проведенні літографічних процесів.</li> </ul>

14	Технологія складання інтегральних схем: -корпусування чипів інтегральних схем; -безкорпусний монтаж чипів ІС; -прогнозування надійності інтегральних схем.
15	Технологічні маршрути виготовлення приладів з зарядовим зв'язком (ПЗЗ): -технологія виготовлення ПЗЗ з трьохтактною системою живлення.Принцип передачі зарядових пакетів; -технологія виготовлення ПЗЗ з двохтактною системою живлення; -технологія виготовлення ПЗЗ з двохтактною системою живлення і розташуванням заслонів на одному рівні; -технологія виготовлення ПЗЗ з заглибленим каналом передачі зарядових пакетів..
16	Технологія виготовлення диференційних підсилювачів (ДП): -принцип побудови та основні характеристики ДП; -диференційний суматор; -логарифмічний підсилювач; -диференціатор; -диференційний інтегратор.
17	Технологія виготовлення комірок пам'яті (МДН структури)^ -комірки пам'яті з ультрафіолетовим стиранням інформації; -комірки пам'яті з комбінованим затвором.
18	Комірки пам'яті з електричним перезаписом інформації: -плаваючий затвор із нітриду кремнію; -плаваючий затвор із полікремнію.

## Практичні заняття

- 1 Методика розрахунку коефіцієнтів сегрегації домішок в монокристалах.
- 2 Розрахунок концентраційних профілів легуючих домішок при епітаксії монокристалів та визначення зміщень р-n переходів.
- 3 Розрахунок товщини діелектричного шару за умови окислення кремнію в сухому та вологому кисні з відомою температурою і парціальними тисками компонент.
- 4 Методика розрахунку глибини р-n переходу при термічній дифузії домішок та розрахунок товщини області порогового заряду й питомої ємності р-n переходу.
- 5 Розрахунок дози імплантованого матеріалу за умови відомих параметрів йонного легування кремнієвих пластин.
- 6 Розрахунок геометрії системи електронно-променевої випаровувач – підкладкоутримувач в вакуумній камері для оптимізації рівномірності нанесення металевих плівок та максимального запилення “сходинки”.
- 7 Розрахунок максимально.можливих допусків при літографічних процесах формування елементів інтегральних схем.
- 8 Методи прогнозування надійності інтегральних схем з використанням електро-термо тренування.

## Рекомендований перелік тем для самостійної роботи.

Для стимуляції самостійної роботи студентів, заохочення їх до самовдосконалення та знайомства з новітніми технологіями нанесення плівкових матеріалів і знайомства з моделями та методами моделювання технологічних процесів передбачено в якості індивідуальних наступні завдання ДКР. Крім того на самостійне вивчення винесено наступні питання.

- 1.Методика розрахунку коефіцієнтів сегрегації домішок в монокристалах.
- 2.Розподіл домішок при кристалізації монокристалів.Рівноважний і ефективний коефіцієнти розподілу домішок в монокристалах.
- 3.Метод витягування кристалів із розплаву(метод Чохральського).
- 4.Метод нормальної спрямованої кристалізації (метод Бріджмена).
- 5.Метод зонного плавлення (метод Пфанна).
- 6.Методи отримання кремнієвих пластин та вивчення їх деформації при проведенні високотемпературних технологічних операцій.
- 7.Хімічна кінетика газофазної епітаксії.
- 8.Профілі розподілу домішок в епітаксійних шарах.
- 9.Дефекти епітаксійних шарів.
- 10.Молекулярно-променева епітаксія монокристалічних шарів.
- 11.Рідина епітаксія.
- 12.Фізико-хімічні основи процесу термічного окислення поверхні кремнію.
- 13.Модель Діла-Гроува оксидування кремнію в сухому та вологому кисні.
- 14.Лінійно-параболічне рівняння росту діоксиду кремнію.
- 15.Вплив кристалографічної орієнтації кремнієвої пластини на швидкість росту діоксидного шару.
- 17.Моделі технологічних процесів дифузії.
- 18.Вплив факторів технологічного процесу на дифузійний розподіл домішок.
- 19.Дифузія в тонких плівках.
- 20.Технологія йонної імплантації.
- 21.Розрахунки пробігу йонів у твердому тілі.
- 22.Моделювання концентраційних профілів основних дифузантив у кремнії.
- 23.Перерозподіл імплантованої домішки під час термообробки.
- 24.Методи осадження діелектричних плівок.:
  - 24.1.Осадження діоксиду кремнію;
  - 24.2.Осадження нітриду кремнію.
- 25.Легування діелектричних плівок під час осадження.
- 26.Визначення характеристик діелектричних плівок.
- 27.Осадження полікристалічних плівок в реакторах атмосферного і пониженого тиску.
- 28.Вплив технологічних параметрів на швидкість росту та структуру плівок полі кремнію.
- 29.Визначення характеристик легованих і нелегованих плівок полікремнію.
- 30.Металізація інтегральних схем:
  - 30.1.Електронно-променево випаровування металів.
  - 30.2.Катодне (магнетронне) розпилення багатокомпонентних металевих мішеней.
- 31.Порівняльне оцінювання методів вакуумно-термічного випаровування і йонного розпилення металів.
- 32.Види літографії:
  - 32.1.Фотолітографія.
  - 32.2.Електронно-променево літографія.
  - 32.3.Ретгенівська літографія.

- 32.4.Дефекти при літографічних процесах та методи їх визначення.
- 33.Технологічні особливості виробництва інтегральних схем.
- 34.Технологічні процеси виготовлення біполярних ІМС:
- 34.1.Технологічні процеси виробництва біполярних мікросхем з ізоляцією елементів зворотньо-зміщеними р-n переходами.
- 34.2.Технологічні процеси виробництва біполярних мікросхем з ізоляцією елементів діелектриком.
- 34.3.Технологічні процеси виробництва біполярних мікросхем з комбінованою ізоляцією елементів.
- 35.Технологічні процеси виробництва метал-діелектрик-напівпровідникових (МДН) мікросхем.
- 35.1.Технологічні процеси виробництва р-канальних мікросхем.
- 35.2.Технологічні процеси виробництва n-канальних мікросхем.
- 35.3.Технологічні процеси виробництва комплементарних мікросхем.
- 36.Особливості конструкцій і технологій динамічних елементів пам'яті.
- 37.Особливості конструкцій і технологій мікросхем на польових транзисторах з керувальним переходом метал-напівпровідник

## Політика та контроль

### 5. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

В рамках дисципліни заплановано наступні види навчальних занять:

- лекції;
- практичні заняття;
- самостійна робота.

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

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

Контроль засвоєння навчального матеріалу здійснюється індивідуальним опитуванням (тестуванням), модульною контрольною роботою та заліком. Заплановане індивідуальне завдання (реферат).

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

З метою контролю процесу засвоєння учбового матеріалу до курсу введено модульну контрольну роботу. Контрольна робота включає матеріал всіх лекцій. Календарний контроль проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог програми.

Рейтингова система оцінювання результатів навчання:

1. Рейтингові бали нараховуються згідно система рейтингових (вагових) балів.
2. Тестування(експрес-опитування), за темами дисципліни здійснюється на основі тестів і залежить від тривалості контрольного заходу (5-10 хвилин).
3. Модульна контрольна робота проводиться протягом однієї пари.
4. Студенти, які виконали всі завдання і набрали протягом семестру необхідну для позитивної оцінки кількість балів мають можливість:
  - не складати екзамен, а отримати оцінку „ автоматом ” відповідно до набраного рейтингу з дисципліни, окрім оцінки відмінно. На оцінку відмінно необхідно складати екзамен;

- складати екзамен з метою підвищення оцінки.
- 5. Студенти, семестровий рейтинг яких відповідає оцінці „ незадовільно ” зобов’язані складати екзамен.
- 6. Студенти, які не виконали умови допуску до екзамену не допускаються до складання екзамену поки не виконають всі завдання і не наберуть 60 балів або більше.

Система рейтингових (вагових) балів:

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість	Макс. бал	Число балів на відмінно
1.	експрес-опитування	13	2	26
2.	Модульна контрольна робота	1	30	30
3.	ДКР	1	36	36
4.	Практичне заняття	8	1	8
	Рейтинг за курс, R	100		

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

7. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік рекомендованих тем по індивідуальному завданню (ДКР):

1. Методи визначення розмірів малих частинок.
2. Методи синтезу наночастинок.
3. Методи нанесення наноплівки.
4. Фізико-хімічні особливості поведінки речовин в нанорозмірному стані.
5. Електрооптичні процеси в надгратки.
6. Самоорганізація і самозбірка наноструктур.
7. Фізичні основи скануючої зондової мікроскопії.
8. Скануючий тунельний мікроскоп.
9. Атомний силовий мікроскоп.
10. Методи дослідження нанооб'єктів і наноструктур.
11. Атомна інженерія. Локальне окислення металів і напівпровідників.
12. Атомна інженерія. Локальне хімічне осадження з газової фази.
13. Екстремальна УФ літографія.
14. Електронно- та іонно-променева літографія.
15. Нанодрук (наноімпринт).
16. Нанокристаліти в неорганічних і органічних матеріалах.
17. Золь-гель технологія.
18. Осадження плівок Ленгмюра-Блоджетт та приклади їх використання.
19. Критерії визначення наноматеріалів: розмір, розмірність і функціональні властивості.
20. Фрактальні наноструктури.



21. Аерогелі.
22. Пористий кремній: отримання, властивості, використання.
23. Пористий оксид алюмінію, отримання і наноструктури на його основі.
24. Графен: отримання, властивості, використання.
25. Фулерени: отримання, структура, використання.
26. Вуглецеві нанотрубки: хіральність, провідні і надпровідні властивості нанотрубок.
27. Фотонні кристали.
28. Перспективи нанотехнологій в системах запису і зберігання інформації.
29. Феромагнетизм в наноструктурах.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

**Складено** професором кафедри мікроелектроніки, д.т.н. професором Вербицьким В.Г.

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

**Погоджено** Вченою радою ФЕЛ (протокол № 06/2022-1 від 28.06.2022)