



# Основи мікро- та наносистемної техніки

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>15 Автоматизація та приладобудування<sup>1</sup></i>
Спеціальність	<i>153 Мікро- та наносистемна техніка</i>
Освітня програма	<i>Мікро- та наноелектроніка</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>3 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>4 кредити (120 годин)</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>залік</i>
Розклад занять	
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор, практичні: к.т.н., доц., Діденко Ю.В., <a href="mailto:yu.didenko@kpi.ua">yu.didenko@kpi.ua</a>, 0967521754</i>
Розміщення курсу	<a href="https://classroom.google.com/c/Mzg0NzcwOTY3ODMy">https://classroom.google.com/c/Mzg0NzcwOTY3ODMy</a> Код курсу: ha35kdf

### Програма навчальної дисципліни

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

*Мета навчальної дисципліни формування у студентів здатностей:*

- *володіти сучасними методами розрахунку і проектування виробів мікро- та наноелектроніки й мікросистемної техніки;*
- *сприймати, розробляти та критично оцінювати нові способи проектування виробів мікро- та наносистемної техніки.*

*Основні завдання навчальної дисципліни:*

- *дати знання фундаментальних законів, на яких базується функціонування первинних перетворювачів; елементної бази мікро- та наносистемної техніки; конструкцій і принципів роботи мікромеханічних приладів; технологічних основ виробництва приладів мікро- та наносистемної техніки;*
- *виробити вміння аналізувати особливості функціонування компонентів мікро- і наносистемної техніки; роботи з окремими компонентами мікро- і наносистемної техніки; визначення статичних та динамічних характеристик компонентів мікро- і наносистемної техніки; застосування компонентів мікро- і наносистемної техніки при створенні технічних систем різного функціонального призначення.*

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

*Дисципліна базується на дисциплінах «Фізика конденсованого стану», «Напівпровідникова електроніка» та «Технологічні основи електроніки» і забезпечує підготовку*

до вивчення дисциплін «Функціональна електроніка», «Фізико-технологічні основи наноелектроніки» та «Фізичні основи сенсоріки». Крім того знання, набуті в результаті вивчення даної дисципліни, використовуються при підготовці дипломних проектів та робіт, а також у курсовому проектуванні.

### **3. Зміст навчальної дисципліни**

Тема 1. Вступ. Области застосування MEMC і NEMC

Тема 2. Особливості мікро- та нанодіапазонів

Тема 3. Основні технологічні процеси виготовлення елементів мікросистемної техніки

Тема 4. Фізичні властивості речовин і ефекти в них, які використовуються у виробках мікросистемної техніки. Поняття тензора

Тема 5. Взаємний зв'язок фізичних властивостей та явищ у кристалах

Тема 6. Мікромеханічні елементи мікросистемної техніки у силовому полі

Тема 7. Чутливі механічні елементи

Тема 8. Сенсори

Тема 9. Актюатори

Тема 10. Мініатюрні електрорадіомеханічні та оптоелектромеханічні керовані компоненти

Тема 11. Мікромеханізми, мікроприводи, мікромашини

Тема 12. Технологічні мікросистеми

Тема 13. Мініатюрні робототехнічні системи

### **4. Навчальні матеріали та ресурси**

Базова література:

1. Круглик И. В., Левицкий А. А., Левицкая З. В. Конспект лекций по дисциплине компоненты микросистемной техники. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007.
2. Мухачёв В. А. Физические основы микро- и наносистемной техники. – Томск: ТУСУР, 2016.

Додаткові матеріали та ресурси:

1. Наноматериалы. Нанотехнологии. Наносистемная техника: Мировые достижения за 2005 год : Сборник / ред. : П. П. Мальцев. – М. : Техносфера, 2006. – (Мир материалов и технологий ; VI-10).
2. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005.
3. Механцев Е.Б. Физические основы микросистемной техники. Курс лекций. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2007.
4. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007.

## **Навчальний контент**

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

**Лекційні заняття:**

Лекція 1

Вступ. Области застосування MEMC і NEMC

Лекція 2

Особливості мікро- та нанодіапазонів

Закони пропорційної мініатюризації. Мікро- та нанотрібологія. Наномеханіка та зношування наномеханізмів

Лекція 3

Основні технологічні процеси виготовлення елементів мікросистемної техніки

Перехід від технологій мікроелектроніки до мікротехнологія мікромеханіки. Технологія об'ємної мікрообробки. LIGA-технологія.

#### Лекція 4

Основні технологічні процеси виготовлення елементів мікросистемної техніки  
Технологія поверхневої мікрообробки. MUMPs-технологія. SUMMiT-технологія

#### Лекція 5

Фізичні властивості речовин і ефекти в них, які використовуються у виробках мікросистемної техніки. Поняття тензора

Тензорний опис фізичних властивостей кристалів. Тензорний опис впливів на кристал (електричний вплив; механічна дія; теплове розширення)

#### Лекція 6

Взаємний зв'язок фізичних властивостей та явищ у кристалах

П'єзоелектричний ефект і електрострикція. Піроелектричний ефект

#### Лекція 7

Мікромеханічні елементи мікросистемної техніки у силовому полі

Закон Гука. Момент інерції перерізу. Жорсткість мікромеханічних елементів при згинанні. Жорсткість мікромеханічних елементів при зсуві (крученні). Демпфірування коливань мікромеханічних елементів

#### Лекція 8

Чутливі механічні елементи

Поведінка при статичних впливах. Динамічна поведінка

#### Лекція 9

Сенсори

Класифікація сенсорів. Характеристики сенсорів: передавальна функція, діапазон виміру, діапазон вихідних значень. Похибки вимірювань, умови експлуатації. Мікромеханічні сенсори. Конструкції елементів мікромеханічних сенсорів. Види перетворювачів: п'єзоелектричні, тензорезистивні, ємнісні. Датчики на основі мікромеханічних перетворювачів: тиску, витрати, пульсацій, зміщення, сили, прискорення. Сенсори кутових швидкостей: волоконний оптичний гіроскоп, мікромеханічні гіроскопи

#### Лекція 10

Сенсори

Термоелектричні сенсори температури. Термоелектрика. Резистивні сенсори температури. Напівпровідникові сенсори температури. П'єзоелектричні датчики температури. Використання сенсорів температури в комбінації з іншими перетворювачами: каталітичні сенсори концентрації газів, теплові витратоміри, акселерометри з нагріванням газу. Безконтактне вимірювання температури: теплове випромінювання, принцип дії приймачів теплового випромінювання, сенсори випромінювання на основі термоелектричного і терморезистивного ефектів, піроелектричні датчики інфрачервоного випромінювання, термопневматичні детектори

#### Лекція 11

Сенсори

Оптичні сенсори і датчики на їх основі. Фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори. Датчики світлового потоку і оптичного поглинання. Датчики зсуву і положення на основі оптичних сенсорів. Магнітоелектричні сенсори. Індуктивні перетворювачі. Датчики магнітного поля на ефекті Холла. Магніторезистори. Магнітодіоди. Магнітотранзистори. Хімічні сенсори. Електрохімічні сенсори. Термокаталітичні сенсори. Адсорбційні перетворювачі. Датчики вологості. Біологічні сенсори

#### Лекція 12

Актюатори

Мікромеханічні приводи руху. П'єзоелектричні, ємнісні, термомеханічні, електромагнітні, пневматичні актюатори. Мікропривід руху на ефекті «пам'яті форми». Мікропривід в пристроях мікрозміщень, мікропозиціонування: мікروважелі, відбивачі, генератори-вібратори, пристрої фіксації.

### *Лекція 13*

#### *Актюатори*

*Термоактюатори. Мікронагрівачі, мікрохолодильники. Мініатюрні пристрої з тепловими зв'язками. Мікровипромінювачі. Світлодіоди, напівпровідникові лазери. Мініатюрні пристрої з оптичними зв'язками*

### *Лекція 14*

*Мініатюрні електрорадіомеханічні та оптоелектромеханічні керовані компоненти*

*Керовані мікроелектрорадіокомпоненти. Резистори. Котушки індуктивності. Керовані конденсатори. Мікроантени і резонатори. Інтегральні мікромеханічні ключі. Керовані оптоелектромеханічні мікрокомпоненти. Оптичні резонатори. Мікродзеркала. Оптичні затвори і фільтри. Оптомеханічні та інтегрально-оптичні схеми*

### *Лекція 15*

*Мікромеханізми, мікроприводи, мікромашини*

*Механічні зубчасті мікропередачі. Інтегральні мікродвигуни. Електростатичні повітряні планарні мікродвигуни. Електростатичні діелектричні планарні мікродвигуни. Електротеплові і електромагнітні мікродвигуни. П'єзоелектричні мікродвигуни. Інші види мікросистем для перетворення енергії і руху: мікросопла, пневматичні приводи руху, оптомеханічні приводи руху*

### *Лекція 16*

*Технологічні мікросистеми*

*Мікрорідинні системи: мікроклапани, мікронасоси. Мікрофільтри. Мікро- та наноінструмент*

### *Лекція 17*

*Мініатюрні робототехнічні системи*

*Мініатюрні автономні транспортні системи: наземні, повітряні, космічні. Міні- та мікророботи для медицини. Розподілені робототехнічні системи*

### *Лекція 18*

*Залік*

### **Практичні заняття:**

#### *Заняття №1*

*Основні технологічні процеси виготовлення елементів мікросистемної техніки*

#### *Заняття №2*

*Мікромеханічні елементи мікросистемної техніки у силовому полі*

#### *Заняття №3*

*Чутливі механічні елементи*

#### *Заняття №4*

*Сенсори*

#### *Заняття №5*

*Сенсори (продовження)*

#### *Заняття №6*

*Актюатори*

#### *Заняття №7*

*Мікромеханізми, мікроприводи, мікромашини*

#### *Заняття №8*

*Технологічні мікросистеми*

#### *Заняття №9*

*Мініатюрні робототехнічні системи*

## **6. Самостійна робота студента/аспіранта**

### **Розрахункова робота**

Для стимуляції самостійної роботи студентів і заохочення їх до самовдосконалення в кредитному модулі передбачено в якості індивідуального завдання розрахункова робота за тематикою кредитного модуля. В роботі необхідно розрахувати параметри чутливого механічного елемента (консолі, балки, мембрани). На виконання завдання передбачено 4 години самостійної роботи.

Також на самостійну роботу додатково винесено вивчення наступного теоретичного матеріалу:

Твердість мікромеханічних елементів МСТ – 10 годин;

Технології виготовлення наноелектромеханічних пристроїв – 12 годин;

Наноелектромеханічні системи – 10 годин;

Технологічні наносистеми – 10 годин;

Підготовка до заліку – 20 годин.

## Політика та контроль

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

Відвідування всіх видів занять є обов'язковим.

Виконання всіх завдань є обов'язковою умовою допуску до заліку.

Перед практичними заняттями необхідно попередньо ознайомитись з завданням на дане заняття. Завдання має бути виконане і показане викладачеві не пізніше заняття за наступною темою. В протилежному випадку знімаються рейтингові бали згідно вимог PCO.

Розрахункова робота має бути захищена. На захист має бути пред'явлена виконана робота, оформлена згідно вимог університету, тобто має містити титульний аркуш, завдання, розрахунки та креслення (за необхідністю). Процедура захисту складається з відповідей на запитання викладача за темою роботи. За неправильні відповіді або неправильне оформлення роботи оцінка знижується згідно вимог PCO. За умови неправильної відповіді більш ніж на третину запитань захист не зраховується.

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

З метою контролю процесу засвоєння учбового матеріалу у курсі передбачено дві модульні контрольні роботи. Перша робота за матеріалом лекцій 1...4, друга за матеріалами лекцій 5-12. Оцінювання контрольних робіт здійснюється згідно рейтингової системи. За неправильні відповіді бали не зараховуються, за неточні або не повні відповіді бали знижуються.

Виконання практичних робіт та розрахункової роботи проводиться шляхом опитування в процесі захисту роботи.

Календарний контроль: провадиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Для успішного проходження першого календарного контролю: студент повинен набрати не менше 20% балів від максимального сумарного рейтингу протягом семестру. Для успішного проходження другого календарного контролю студент повинен набрати не менше 40% балів від максимального рейтингу.

Семестровий контроль здійснюється у вигляді заліку.

Студенти, які набрали протягом семестру необхідну для позитивної оцінки кількість балів мають можливість:

- не складати залік, а отримати оцінку „ автоматом ” відповідно до набраного рейтингу з дисципліни;

- складати залік з метою підвищення оцінки.

У разі отримання на заліку оцінки нижчої , ніж за рейтингом, за студентом не зберігається оцінка отримана „ автоматом ”.

Студенти, семестровий рейтинг яких відповідає оцінці „ незадовільно ”, зобов'язані складати залік.

Студенти, які за семестровим рейтингом не допущені до заліку з цієї дисципліни, зобов'язані підвищити його до рівня не менше 60%.

Оцінка визначається за сумою набраних рейтингових балів відповідно до системи розрахунку шкали рейтингу.

Рейтинговий бал студента нараховується за наступними правилами:

1. Своєчасне виконання оцінюваних практичних робіт

Ваговий бал 1. Максимальна кількість балів  $1 \times 9 = 9$ . Бали нараховуються в разі своєчасного правильного виконання завдань передбачених практичними роботами. За не своєчасне виконання завдань бали не нараховуються.

2. Захист практичних робіт

Ваговий бал 3. Максимальна кількість балів  $3 \times 9 = 27$ . Бали нараховуються за результатами захисту робіт. Захист полягає у відповіді на 3-запитання викладача. За правильну відповідь на запитання нараховується 1 бал. За неправильну відповідь бали не нараховуються. Якщо не зараховано два або більше запитань захист не зараховується В цьому випадку студент повинен підготуватися і прийти на повторний захист.

3. Модульна контрольна робота 1 – максимальний бал 20.

4. Модульна контрольна робота 2 – максимальний бал 20.

5. РГР – максимальний бал 24.

### Система рейтингових (вагових) балів

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість	Макс. бал	Число балів на відмінно
1.	Оцінювані практичні роботи: своєчасне виконання	9	1	9
	захист	9	3	27
2.	Модульна контрольна робота 1	1	20	20
3.	Модульна контрольна робота 2	1	20	20
4.	РГР	1	28	24
5.	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

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

Перелік запитань для семестрового контролю.

1. Закони пропорційної мініатюризації.

2. Сила сухого та рідкого тертя у мікромеханіці.

3. Сила тертя у нанотрибології.

4. Механізми зношування виробів наномеханіки.

5. Технології об'ємної мікрообробки для створення мікромеханічних структур (передньосторонньої та задньосторонньої з використанням стоп-шару й керувальних отворів).

6. Ізотропне та анізотропне травління.

7. LIGA-технологія створення мікромеханічних структур.

8. *Технології поверхневої мікрообробки для створення мікромеханічних структур (MUMPs-технологія та SUMMiT-технологія).*
9. *Тензорний опис електричної, механічної та теплової дії на кристал.*
10. *Схема взаємного зв'язку фізичних властивостей та явищ у кристалах (наведіть приклади та короткий опис ефектів).*
11. *П'єзоелектричний ефект (прямий та обернений), модель Мейснера.*
12. *Піроелектричний ефект і його механізм з точки зору моделі одновимірного полярного кристала.*
13. *Закон Гука (за лінійної деформації вздовж однієї осі, вздовж трьох осей та за деформації типу зсув).*
14. *Моменти інерції перерізу (осьовий, полярний та відцентровий).*
15. *Жорсткість консольної балки при згинанні. Кут жорсткості торсійної балки.*
16. *Прогин балки та кут повороту перетину. Згин тонких пластин і балок у теорії Ейлера–Бернуллі.*
17. *Згин консольної балки під дією зосередженої сили, яка прикладена до вільного кінця балки та згин консольної балки під дією зосередженої сили, яка прикладена до точки, віддаленої від вільного кінця балки.*
18. *Згин консольної балки під дією розподіленої сили та згин консольної балки під дією розподіленої сили, яка прикладена на частину її довжини від вільного кінця.*
19. *Кручення консольної балки прямокутного поперечного перерізу вздовж осі та згин місткової балки під дією зосередженої сили на центр балки.*
20. *Класифікація сенсорів за видом вимірювальної величини. Активні та пасивні сенсори.*
21. *Передавальна функція, діапазон вимірювальних значень та діапазон вихідних значень сенсора.*
22. *Мікромеханічні перетворювачі: п'єзоелектричні, тензорезистивні та ємнісні.*
23. *Датчики тиску на основі тензорезистивних п'єзоторуювачів.*
24. *Датчик витрати газу на основі терморезистивних п'єзоторуювачів.*
25. *Конструкція та принцип дії інтегрального балкового акселерометра та мікромеханічного нахиломіру.*
26. *Конструкція та принцип дії гібридних компенсаційних акселерометрів (одноосьового та двохосьового).*
27. *Волоконний оптичний гіроскоп. Ефект Саньяка.*
28. *Принцип роботи камертонних гіроскопів.*
29. *Конструкція та принцип дії мікромеханічного камертонного гіроскопа з однією віссю чутливості.*
30. *Конструкція та принцип дії мікромеханічного камертонного гіроскопа з двома рамками й торсійним підвісом.*
31. *Конструкція та принцип дії мікромеханічного камертонного гіроскопа з двома вісьми чутливості та стрижневого вібраційного гіроскопа.*
32. *Ефект Зеєбека.*
33. *Резистивний сенсор температури (на основі металевих плівок, на основі термістора та на основі напівпровідникових кремнієвих резисторів).*
34. *Каталітичні сенсори концентрації газів.*
35. *Теплові витратоміри.*
36. *Акселерометри з нагріванням газу.*
37. *Сенсор теплового випромінювання на основі інтегральної термобатареї та на основі терморезистора.*
38. *Природа піроелектрики.*
39. *Піроелектричний та подвійний піроелектричний сенсор температури.*
40. *Термопневматичний детектор.*
41. *Фоторезистор та датчик оптичного поглинання на основі фоторезистора.*
42. *Датчик положення на основі оптичних сенсорів.*

43. Індуктивні перетворювачі для вимірювання змінного та сталого магнітного поля.
44. Ефект Холла. Датчики магнітного поля на ефекті Холла.
45. Магніторезистивний ефект. Датчики магнітного поля на основі магніторезисторів.
46. Класифікація та схема електрохімічних сенсорів.
47. Термокаталітичні хімічні сенсори (пелістер та сенсор горючих газів).
48. Хімічні сенсори газів на основі адсорбційних перетворювачів.
49. Конструкція та принцип дії ємнісного та резистивного сенсорів вологості.
50. Конструкція та принцип дії термісторного та оптичного (конденсаційного) сенсорів вологості.
51. П'єзоелектричні та електростатичні (ємнісні) актюатори.
52. Термомеханічні, електромагнітні та пневматичні актюатори.
53. Мікроприводи руху на ефекті «пам'яті форми».
54. Термоактюатори (мікронагрівачі, мікрохолодильники).
55. Конструкція дифузійного резистора та дифузійного пінч-резистора.
56. Конструкція епітаксialьного резистора та епітаксialьного пінч-резистора.
57. Конструкція іонно-легованого та тонкоплівкового резисторів.
58. Планарні та об'ємні керовані котушки індуктивності.
59. Керовані конденсатори (з регульованим проміжком, з регульованою площею пластин, з регульованою діелектричною проникністю).
60. Інтегральні мікромеханічні ключі.
61. Інтегральні мікродзеркала з електростатичною активацією.
62. Оптичні заслони. Ефект Керра.
63. Конструкція та принцип дії електростатичного повітряного планарного мікродвигуна.
64. Конструкція та принцип дії діелектричного (сегнетоелектричного) планарного мікродвигуна.
65. Конструкція та принцип дії електротеплових та електромагнітних планарних мікродвигунів.
66. Конструкція та принцип дії трьохфазного та крокового п'єзодвигунів.
67. Конструкція та принцип дії п'єзодвигуна на «принципі весла».
68. Конструкція та принцип дії лінійного п'єзодвигуна та крокового п'єзодвигуна із черв'ячною передачею.
69. Лінійні та кутові п'єзодвигуни, які працюють на періодичному зачепленні.
70. Конструкція та принцип дії мікроклапанів.
71. Конструкція та принцип дії інжекційного та індукційного електрогідродинамічних насосів.
72. Конструкція та принцип дії електроосмотичного, ультразвукового та магнітогідродинамічного насосів.
73. Конструкція та принцип дії мікронасосу обертального типу та мікронасосу з активними клапанами.
74. Конструкція та принцип дії мембранного мікронасосу з пасивними клапанами та безклапанного мікронасосу.
75. Конструкція та принцип дії мікропінцета.

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

Складено доц. кафедри мікроелектроніки, к.т.н., доц., Діденком Ю.В.

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки (протокол № 21 від 10.06.2020)

Погоджено Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/2020 від 22.06.2020)