



Основи мікро- та наносистемної техніки

Силабус

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>15 Автоматизація та приладобудування</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	Лектор: <i>к.т.н., доц., Діденко Ю.В., yu.didenko@kpi.ua, +380967521754</i> Практичні: <i>доктор філософії, Шевлякова Г.В., g.shevliakovame@ill.kpi.ua, +380958563996</i>
Розміщення курсу	https://classroom.google.com/c/Mzg0NzcwOTY3ODMy Код курсу: <i>ha35kdf</i>

Програма навчальної дисципліни

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

Навчальна дисципліна «Основи мікро- та наносистемної техніки» є вибірковою освітнім компонентом і належить до циклу професійної підготовки.

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 ЗО13 «Фізика», ПО2 «Матеріали і компоненти мікро- та наносистемної техніки», ПО10 «Фізика конденсованого стану», ПО11

«Напівпровідникова електроніка», ПО14 «Нанoeлектроніка» та ПО16 «Технологічні основи електроніки».

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Загальні уявлення про мікро- та нанoeлектромеханічні системи

Тема 2. Особливості мікро- та нанодіапазонів характерних розмірів

Тема 3. Основні технологічні процеси виготовлення елементів мікросистемної техніки

Тема 4. Реакція кристалів, що використовуються для створення пристроїв МСТ, на дію зовнішніх сил

Тема 5. Сенсори

Тема 6. Актюатори

Тема 7. Електрорадіомеханічні та оптоелектромеханічні керовані компоненти МСТ

Тема 8. Мікромеханізми, мікроприводи, мікромашини

Тема 9. Технології виготовлення нанoeлектромеханічних пристроїв

Тема 10. Нанoeлектромеханічні системи

Тема 11. Технологічні мікро- та наносистеми

Тема 12. Мініатюрні робототехнічні системи

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки : Текст лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» освітньої програми «Мікро- та нанoeлектроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Діденко, Д. Д. Татарчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 8,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 113 с.

2. Лобур М. Основи мікросистемних пристроїв : навч. посіб. / М. Лобур, М. Мельник. – Львівська політехніка, 2016. – 258 с.

3. Невлюдов І. Ш. Мікросистемна техніка та нанотехнології [Текст] : монографія / І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін. – ВИДАННЯ, 2017. – 528 с.

Додаткові матеріали та ресурси:

1. Gad-el-Hak M. MEMS. Applications / Mohamed Gad-el-Hak. – CRC Press, 2020. – 568 p.

2. Kim E. S. Fundamentals of Microelectromechanical Systems (MEMS) / Eun Sok Kim. – McGraw Hill, 2021. – 416 p.

3. Yang Zh. Advanced MEMS/NEMS Fabrication and Sensors / Zhuoqing Yang. – Springer Cham, 2022. – 312 p.

4. Gerlach G. Introduction to Microsystem Technology / Gerald Gerlach, Wolfram Dotzel. – John Wiley & Sons Inc, 2008. – 377 p.

5. Tilli M. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies / Markku Tilli et al. – Elsevier, 2020. – 1026 p.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття:

Лекція 1

Загальні уявлення про мікро- та нанoeлектромеханічні системи. Області застосування MEMS і NEMS

Лекція 2

Особливості мікро- та нанодіапазонів характерних розмірів

Мікро- та нанотрібологія. Наномеханіка та зношування наномеханізмів

Основні технологічні процеси виготовлення елементів мікросистемної техніки

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

Лекція 3

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

Реакція кристалів, що використовуються для створення пристроїв МСТ, на дію зовнішніх сил. Тензорний опис фізичних властивостей кристалів. Тензорний опис впливів на кристал (електричні, механічні й теплові впливи)

Лекція 4

Сенсори

Класифікація сенсорів. Мікромеханічні сенсори. Конструкції елементів мікромеханічних сенсорів. Види перетворювачів: п'єзоелектричні, тензорезистивні, ємнісні. Датчики на основі мікромеханічних перетворювачів: тиску, витрати, пульсацій, сили, зсуву, прискорення. Сенсори куткових швидкостей: волоконний оптичний гіроскоп, мікромеханічні гіроскопи

Лекція 5

Сенсори

Термоелектричні сенсори температури. Резистивні сенсори температури. Напівпровідникові сенсори температури. П'єзоелектричні датчики температури. Використання сенсорів температури в комбінації з іншими перетворювачами: каталітичні сенсори концентрації газів, 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 6

Сенсори

Оптичні сенсори і датчики на їх основі. Фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори. Датчики світлового потоку і оптичного поглинання. Датчики зсуву й 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. Біохімічні сенсори

Лекція 7

Актюатори

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

Лекція 8

Актюатори

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

Лекція 9

Електрорадіомеханічні та оптоелектромеханічні керовані компоненти МСТ

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

Лекція 10

Мікромеханізми, мікроприводи, мікромашини

Механічні зубчасті мікропередачі. Інтегральні мікродвигуни. Електростатичні повітряні планарні мікродвигуни. Електростатичні діелектричні планарні мікродвигуни. Електротеплові

та електромагнітні мікродвигуни. П'єзоелектричні мікродвигуни. Інші види мікросистем для перетворення енергії й руху: мікросопла, мікротранспортери, мікротурбіни, пневматичні приводи руху, оптомеханічні приводи руху

Лекція 11

Технології виготовлення наноелектромеханічних пристроїв

Технологія НЕМС. Виготовлення нанорозмірних структур методами, які формують матеріали «зверху–униз». Літографічні методи. Наноманіпуляції та нанолітографія. М'яка літографія.

Лекція 12

Технології виготовлення наноелектромеханічних пристроїв

Самокладання наночастинок і нанониток. Інші методи виготовлення. Виготовлення нанорозмірних структур методами, які формують матеріали «знизу–уверх». Самочинне зростання. Матричний (темплатний) синтез. Електроформовання волокон. Літографія.

Лекція 13

Наноелектромеханічні системи

Сенсорні НЕМС. Нанорезонатори. Молекулярні актюатори. Молекулярні мотори. АТФ-синтаза. Джгутикові мотори бактерій. Міозин і кінезин. Катенани та ротаксани. Молекулярні автомобілі.

Лекція 14

Технологічні мікро- та наносистеми

Компоненти технологічних мікросистем. Мікрорідинні системи: мікроклапани, мікронасоси. Мікрофільтри. Мікро- та наноінструмент

Лекція 15

Мініатюрні робототехнічні системи

Мініатюрні автономні транспортні системи: наземні, повітряні, космічні

Лекція 16

Мініатюрні робототехнічні системи

Міні- та мікророботи для медицини. Розподілені робототехнічні системи

Лекція 17

Контрольна робота

Лекція 18

Залік

Практичні заняття:

Заняття №1

Тема 1.1. Статичний аналіз консольної балки, підданої розподіленому навантаженню

Заняття №2

Тема 1.2. Статичний аналіз консольної балки, підданої зосередженому навантаженню

Заняття №3

Тема 2. Випробування на розтяг

Заняття №4

Тема 3.1. Моделювання прямого п'єзоелектричного ефекту

Заняття №5

Тема 3.2. Моделювання оберненого п'єзоелектричного ефекту

Заняття №6

Тема 4.1. Дослідження теплопровідності матеріалів

Заняття №7

Тема 4.2. Моделювання дії температури на біметалічну пластину

Заняття №8

Тема 5.1. Моделювання дії акустичної хвилі на мембрану

Заняття №9

Тема 5.2. Моделювання дії акустичної хвилі зі змінною частотою на мембрану

6. Самостійна робота студента

Домашня контрольна робота

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

Також на самостійну роботу додатково винесено вивчення наступного теоретичного матеріалу:

1. Твердість мікромеханічних елементів МСТ:

- Момент інерції перерізу – 8 годин;
- Твердість мікромеханічних елементів при згинанні – 8 годин;
- Твердість мікромеханічних елементів при зсуві (крутінні) – 6 годин;
- Переміщення, яке здійснює П-подібний термоактюатор – 8 годин;

2. Чутливі механічні елементи МСТ:

- Поведінка чутливих механічних елементів МСТ за статичних впливів – 6 годин;
- Динамічна поведінка чутливих механічних елементів МСТ – 6 годин;

3. 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 із завданням на дане заняття.

Домашня контрольна 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 РСО. За умови неправильної відповіді більш ніж на третину запитань захист не зараховується.

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

З метою контролю процесу засвоєння учбового матеріалу у курсі передбачена модульна контрольна робота. Оцінювання контрольної роботи здійснюється згідно рейтингової системи. За неправильні відповіді бали не зараховуються, за неточні або не повні відповіді бали знижуються.

Оцінювання практичних робіт та домашньої контрольної 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 має набрати не менше 20% балів від максимального сумарного рейтингу протягом семестру. Для успішного проходження другого календарного контролю студент має 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 40%.

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

Рейтинговий бал студента нараховується за наступними правилами:

1. Виконання та захист практичних робіт

Ваговий бал 5. Максимальна кількість балів $5 \times 9 = 40$. Бали нараховуються в разі правильного виконання завдань передбачених практичними роботами та за результатами захисту робіт. Захист полягає у відповіді на запитання викладача.

3. Модульна контрольна робота – максимальний бал 30.

4. ДКР – максимальний бал 25.

Система рейтингових (вагових) балів

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість	Макс. бал	Число балів на відмінно
1.	Оцінювані практичні роботи: виконання та захист	9	5	45
2.	Модульна контрольна робота	1	30	30
3.	ДКР	1	25	25
4.	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. Функціональні та виконавчі елементи виробів мікросистемної техніки.
2. Класифікація виробів мікросистемної техніки із врахуванням складності та масогабаритних характеристик.
3. Сила тертя у макротрібології.
4. Сила сухого та рідкого тертя у мікротрібології.
5. Сила тертя у нанотрібології.
6. Механізми зношування виробів наномеханіки.
7. Технологія передньосторонньої об’ємної мікрообробки.
8. Технологія задньосторонньої об’ємної мікрообробки (з використанням стоп-шару та з використанням керувальних отворів).

9. *Ізотропне та анізотропне травління.*
10. *Основні етапи виготовлення елементів МСТ з використанням LIGA-технології. Переваги та недоліки LIGA-технології.*
11. *Технологія поверхневої мікрообробки. Переваги та недоліки технології поверхневої мікрообробки.*
12. *MUMPs-технологія. Переваги та недоліки MUMPs-технології.*
13. *SUMMiT-технологія. Переваги та недоліки SUMMiT-технології.*
14. *Тензорний опис електричної дії на кристал.*
15. *Тензорний опис механічної дії на кристал.*
16. *Тензорний опис теплової дії на кристал.*
17. *Схема взаємного зв'язку фізичних властивостей та явищ у кристалах.*
18. *Класифікація сенсорів за видом вимірювальної величини. Активні та пасивні сенсори.*
19. *П'єзоелектричний перетворювач. Теплова поляризація п'єзоелектричних кристалів.*
20. *Тензорезистивний перетворювач.*
21. *Ємнісні перетворювачі.*
22. *Датчики тиску.*
23. *Датчик витрати газу.*
24. *Датчики сили.*
25. *Принцип роботи конденсаторного акселерометра.*
26. *Інтегральний балковий акселерометр.*
27. *Гібридний компенсаційний акселерометр (одноосьовий та двохосьовий).*
28. *Мікромеханічний нахиломір.*
29. *Принцип роботи акселерометра на п'єзоелементах.*
30. *Ефект Саньяка. Волоконний оптичний гіроскоп.*
31. *Принцип роботи камертонних гіроскопів.*
32. *Мікромеханічний гіроскоп з однією віссю чутливості.*
33. *Мікромеханічний гіроскоп з двома рамками й торсіонним підвісом.*
34. *Мікромеханічний гіроскоп з двома вісями чутливості.*
35. *Стрижневий вібраційний гіроскоп.*
36. *Конденсаторний MEMS-мікрофон.*
37. *П'єзоелектричний MEMS-мікрофон.*
38. *Резистивні сенсори температури.*
39. *Сенсор температури на напівпровідниковому діоді та на біполярному транзисторі.*
40. *П'єзоелектричні датчики температури.*
41. *Каталітичні сенсори концентрації газів.*
42. *Акселерометри з нагріванням газу.*
43. *Закон Віна.*
44. *Закон Стефана–Больцмана.*
45. *Принцип дії приймачів теплового випромінювання.*
46. *Сенсор теплового випромінювання на основі інтегральної термобатарей.*
47. *Сенсор теплового випромінювання на основі терморезистора.*
48. *Піроелектричний сенсор температури.*
49. *Подвійний піроелектричний сенсор температури.*
50. *Термопневматичний детектор.*
51. *Датчик оптичного поглинання.*
52. *Датчик положення на основі оптичних сенсорів.*
53. *Індуктивні перетворювачі для вимірювання змінного та сталого магнітного поля.*
54. *Ефект Холла. Датчики магнітного поля на ефекті Холла.*
55. *Магніторезистивний ефект.*
56. *Датчики магнітного поля на основі магніторезисторів, магнітодіодів і магніотранзисторів.*
57. *Схема електрохімічного сенсора.*

58. Термокаталітичні сенсори. Пеллістер.
59. Адсорбційний перетворювач.
60. Ємнісний датчик вологості.
61. Резистивний датчик вологості.
62. Термісторний датчик вологості.
63. Оптичний (конденсаційний) датчик вологості.
64. Схема біохімічного сенсора.
65. П'єзоелектричні актюатори.
66. Електростатичні (ємнісні) актюатори.
67. Термомеханічні актюатори.
68. Електромагнітні актюатори.
69. Пневматичні актюатори.
70. Мікроприводи руху на ефекті «пам'яті форми».
71. Термоактюатори (мікронагрівачі, мікрохолодильники).
72. Планарні та об'ємні керовані котушки індуктивності.
73. Керовані конденсатори (з регульованим зазором, з регульованою площею пластин, з регульованою діелектричною проникністю).
74. Інтегральні мікромеханічні ключі.
75. Інтегральні мікродзеркала з електростатичною активацією.
76. Оптичні заслони. Ефект Керра.
77. Конструкція та принцип дії електростатичного повітряного планарного мікродвигуна.
78. Конструкція та принцип дії діелектричного (сегнетоелектричного) планарного мікродвигуна.
79. Конструкція та принцип дії електротеплових та електромагнітних планарних мікродвигунів.
80. Конструкція та принцип дії трьохфазного та крокового п'єзодвигунів.
81. Конструкція та принцип дії п'єзодвигуна на «принципі весла».
82. Конструкція та принцип дії лінійного п'єзодвигуна та крокового п'єзодвигуна із черв'ячною передачею.
83. Лінійні та кутові п'єзодвигуни, які працюють на періодичному зачепленні.
84. Концепції виготовлення НЕМС (зверху–униз; знизу–уверх).
85. Літографічні методи виготовлення НЕМС. Фотолітографія.
86. Літографічні методи виготовлення НЕМС. Оптична літографія з фазовим зсувом.
87. Літографічні методи виготовлення НЕМС. Електронно-променева літографія.
88. Літографічні методи виготовлення НЕМС. Рентгенівська літографія.
89. Літографічні методи виготовлення НЕМС. Літографія з використанням сфокусованого іонного пучка.
90. Літографічні методи виготовлення НЕМС. Літографія на нейтральних атомних пучках.
91. Сканувальна тунельна мікроскопія.
92. Атомно-силова мікроскопія.
93. Сканувальна близькопольова оптична мікроскопія.
94. Виготовлення НЕМС за допомогою наноманіпуляції.
95. Нанолітографія. Польове випаровування.
96. Нанолітографія. Поверхнева дифузія в градієнтному полі.
97. Нанолітографія. АСМ-літографія.
98. М'яка літографія. Мікроконтактний друк.
99. М'яка літографія. Лиття.
100. М'яка літографія. Наноімпринт.
101. М'яка літографія. Пір'яна нанолітографія.
102. Самокладання наночастинок під дією сил, обумовлених капілярними явищами.
103. Самокладання наночастинок за рахунок дисперсійних взаємодій.
104. Самокладання нанониток під дією сил зсувної течії.

105. Самокладання нанониток в електричному полі.
106. Ковалентно-зв'язане складання наночастинок і нанониток.
107. Складання наночастинок у гравітаційному полі.
108. Самочинне зростання нанониток у результаті випаровування (розчинення) – конденсації.
109. Самочинне зростання нанониток за механізмом «пар–рідина–кристал» або «розчин–рідина–кристал».
110. Матричний (темплатний) синтез наноструктур.
111. Електрохімічне осадження нанониток.
112. Електрофоретичне осадження нанониток.
113. Електроформовання нановолокон (електроспінінг).
114. Одержання нанониток методом літографії.
115. Принцип дії сенсорних НЕМС. Частота коливань кантилевера. Нанорезонатори.
116. Молекулярний актюатор на основі молекули азобензолу.
117. Молекулярна машина на основі молекули катенана.
118. Молекулярна машина на основі молекули ротаксана.
119. «Молекулярний ліфт», заснований на ротоксані.
120. Конструкція та принцип дії мікроклапанів.
121. Конструкція та принцип дії інжекційного та індукційного електрогідродинамічних насосів.
122. Конструкція та принцип дії електроосмотичного, ультразвукового та магнітогідродинамічного насосів.
123. Конструкція та принцип дії мікронасосу обертального типу та мікронасосу з активними клапанами.
124. Конструкція та принцип дії мембранного мікронасосу з пасивними клапанами та безклапанного мікронасосу.
125. Конструкція та принцип дії мікропінцета.

Силабус:

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

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки (протокол № 22 від 23.06.2023)

Погоджено Методичною комісією факультету електроніки (протокол № 06/2023 від 29.06.2023)