

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

*Затверджую*



Голова Приймальної комісії  
Ректор

Михайло  
ЗГУРОВСЬКИЙ

*02.05.2023*  
дата

**ПРОГРАМА**

**вступного іспиту із спеціальності**

для вступу на освітньо-наукову програму підготовки доктора філософії  
«Мікро- та наносистемна техніка»

*за спеціальністю 176 Мікро- та наносистемна техніка*

Програму ухвалено:

Науково-методичною комісією за спеціальністю

176 Мікро- та наносистемна техніка

Протокол № 1 від «25» «січня» 2023 р.

Голова НМК

Володимир ТИМОФЄЄВ

Київ – 2023

## **Зміст**

1. Загальні відомості.....	3
2. Теми, що виносяться на екзаменаційне випробування.....	3
3. Навчально-методичні матеріали.....	6
4. Рейтингова система оцінювання вступного випробування .....	6
5. Приклад екзаменаційного білету.....	8

## I. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка» відповідає місії та стратегії КПІ ім. Ігоря Сікорського, за якою стратегічним пріоритетом університету є фундаменталізація підготовки фахівців. Особливості освітньої програми враховані шляхом обрання відповідних розділів програми вступного іспиту.

Прийом на підготовку за третім (освітньо-науковим) рівнем вищої освіти для здобуття наукового ступеня «доктор філософії» за спеціальністю «Мікро- та наносистемна техніка» відбувається згідно з Правилами прийому до КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Вступний іспит на навчання для здобуття наукового ступеня доктор філософії спеціальності 176 «Мікро- та наносистемна техніка» проводиться для тих вступників, які мають ступень магістра (спеціаліста).

Вступні іспити до аспірантури проводяться предметними комісіями.

Програми вступних випробувань до аспірантури оприлюднюються на веб-сайтах КПІ ім. Ігоря Сікорського, факультетів (інститутів), відділу аспірантури та докторантури (<https://aspirantura.kpi.ua/>).

Програма іспиту із спеціальності «Мікро- та наносистемна техніка» містить перелік питань, які винесені на вступний іспит, список рекомендованої літератури та методику оцінки вступного іспиту із спеціальності.

На вступний іспит для вступу на третій (освітньо-науковий) рівень вищої освіти для здобуття наукового ступеня «доктор філософії» за спеціальністю «Мікро- та наносистемна техніка» винесено питання базових навчальних дисциплін з програми підготовки рівня вищої освіти «магістр» з відповідної спеціальності.

Екзаменаційний білет вступного іспиту містить перелік питань, відповіді на які потребують уміння застосовувати знання програмного матеріалу відповідних дисциплін. Екзаменаційний білет містить три теоретичні питання.

Тривалість підготовки вступника до відповіді – 2 академічні години.

## II. ТЕМИ, ЩО ВІНОСЯТЬСЯ НА ВСТУПНЕ ВИПРОБУВАННЯ

### 1. ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА

Природа хімічного зв'язку у напівпровідниках. Структура кристалів. Ідеальні та реальні кристали. Дефекти в кристалах.

Полікристалічні та аморфні напівпровідники. Зонна теорія твердого тіла.

Енергетичні спектри електронів у металах, напівпровідниках, діелектриках.

Зона провідності та валентна зона. Ефективна маса електрона. Домішкові рівні та домішкові зони. Поверхневі стани. Статистика електронів та дірок у напівпровідниках.

Функція розподілу Фермі-Дірака. Умови електронейтральності. Концентрація носіїв заряду у власних та легованих напівпровідниках. Температурні залежності. Розподіл Максвелла-Больцмана. Критерій виродження електронного газу. Вироджені та неvirоджені напівпровідники.

Електропровідність напівпровідників. Носії заряду у слабкому електричному полі.

Рухливість електронів та дірок. Співвідношення Ейнштейна. Дифузія та дрейф носіїв заряду. Рівняння для густини електричного струму у напівпровідниках. Рівняння неперервності, рівняння Пуассона.

Генерація та рекомбінація носіїв заряду. Міжзонна рекомбінація і рекомбінація через домішки та дефекти. Дифузійна довжина та час життя носіїв. Поверхнева рекомбінація.

Носії заряду у сильному електричному полі. Гарячі носії. Лавинне розмноження у напівпровідниках. Ефект Ганна.

Кінетичні ефекти у напівпровідниках. Термоелектричні явища. Ефекти Холла та Гаусса. Термомагнітні ефекти.

Поглинання випромінювання у напівпровідниках. Фундаментальне, домішкове та решіткове поглинання випромінювання. Поглинання екситонами та вільними носіями.

Фотопровідність. Спектральна характеристика фотопровідності.  
Ефекти випромінювання у напівпровідниках. Прямі та непрямі переходи носіїв заряду.  
Типи люмінесценції: інжекційна, катодо- та фотолюмінесценція.  
Основні матеріали оптоелектроніки: сполуки  $A_3B_5$  та  $A_2B_6$ .  
Електро-, магніто- та акустооптичні явища у твердих тілах.  
Особливості енергетичного спектру електронів у системах із зниженою розмірністю.  
Квантування енергії електрона у потенціальній ямі. Інтерференційні ефекти за умови надбар'єрного проходження електрона. Коефіцієнти прозорості та відбиття тунелювання. Багатобар'єрні структури. Надгратки. Двовимірні структури. Квантовий ефект Холла. Одновимірні та нульвимірні структури. Ефект Ааронова-Бома. Кулонівська блокада та одноелектронні процеси.

## 2. ПРИЛАДИ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Електронно-дірковий ( $p-n$ -) перехід. Інжекція та екстракція носіїв заряду.  
Вольт-амперна характеристика  $p-n$ -переходу. Струми носіїв заряду у  $p-n$ -переході.  
Бар'єрна та дифузійна ємності. Види пробою  $p-n$ -переходу: тепловий, лавинний, тунельний.  
Гетеропереходи. Контакт метал-напівпровідник. Бар'єр Шоттки. Омичний контакт.  
Структура метал-діелектрик-напівпровідник (МДН). Польовий ефект у МДН-структурах.  
Ємність МДН-структур.  
Напівпровідникові діоди. Основні характеристики діодів, їх залежність від температури та режимів. Схемні моделі.  
Імпульсні та частотні властивості діодів.  
Випрямні та імпульсні діоди. Діоди із збагаченням заряду. Варікапи. Тунельні діоди.  
Діоди НВЧ. Лавино-пролітні діоди. Діоди Ганна.  
Біполярні транзистори. Структура та принцип дії. Режими роботи транзистора. Ефект Ерлі.  
Основні параметри та характеристики транзисторів. Схемні моделі: Еберса-Молла, Лінвілла, зарядова. Імпульсні та частотні властивості транзисторів. Робота транзистора за високого рівня інжекції. Пробій транзисторів та змикання переходів.  
Шуми транзисторів. Потужні транзистори. НВЧ транзистори. Гетероструктурні біполярні транзистори.  
Транзистори на гарячих електронах.  
Тиристри: принцип їх дії та класифікація. Основні параметри та характеристики.  
Польові транзистори: МДН транзистори з індукованим та вбудованим каналом, з керуючим  $p-n$ -переходом, з бар'єром Шоттки. Принцип дії. Основні параметри і характеристики.  
Частотні і імпульсні властивості. Шуми польових транзисторів.  
Особливості короткоканальних транзисторів. Гетероструктурні польові транзистори.  
Прилади із зарядовим зв'язком.  
Інтегральні схеми (ІС). Класифікація ІС. Елементи ІС: транзистори, діоди, резистори, конденсатори, індуктивні елементи.  
Оптоелектронні прилади. Призначення та області застосування. Фотоприймачі: фотодіоди, фототранзистори, фоторезистори, фототиристри та лавинні фототранзистори. Принцип дії, основні параметри: фоточутливість, інерційність, спектральні характеристики. Фотоелектричні перетворювачі сонячної енергії.  
Напівпровідникові випромінювачі: світлодіоди та лазери. Прилади систем відображення інформації. Оптрони та оптронні ІС.  
Термоелектричні та гальвано-магнітні напівпровідникові прилади.  
Прилади наноелектроніки. Перспективні транзисторні структури на квантових дротах, вуглецевих нанотрубках, графені. Оптоелектронні прилади на квантових ямах та точках.  
Прилади одноелектроніки, молекулярної електроніки та спітроніки. Поняття про квантові комп'ютери.

### 3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ І МАТЕРІАЛИ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКИ

Планарна технологія. Методи ізоляції елементів ІС.

Дифузія. Основні рівняння. Граничні умови. Методи проведення дифузії.

Термічне окислення кремнію у парах води, вологому та сухому кисні. Анодне окислення.

Методи нанесення окислу кремнію та нітриду кремнію.

Вакуумні методи отримання тонких плівок.

Іонна імплантація. Методи усунення дефектів.

Плазмохімічні та іонно-плазмові методи обробки напівпровідникових та металевих шарів.

Епітаксія. Вирощування епітаксціальних плівок АзВ<sub>5</sub> та гетеропереходів. Хімічне осадження із газової фази (CVD). Молекулярно-променева епітаксія (MBE).

Використання методів традиційної мікроелектроніки (MBE та CVD) для створення наноструктур. Пошарове атомне нанесення (ALD).

Фотолітографія. Фоторезисти. Обмеження оптичної літографії. Фотолітографія із застосуванням глибокого ультрафіолетового випромінювання (EUVL), електронно- та іонно-променева літографія, рентгенівська літографія. Нанодрук. Роздільна здатність сучасних методів літографії.

Обмеження подальшої мініатюризації ІС методами традиційної мікроелектроніки.

Методи дослідження матеріалів та наноструктур. Скануючий тунельний та атомно-силовий мікроскопи. Електросилова і магнітно-силова мікроскопія. Близньопольова оптична мікроскопія. Атомна інженерія. Електронна та рентгенівська спектроскопія.

Самоорганізація та самозбирання наноструктур. Самоорганізація при епітаксії.

Осадження плівок Ленгмюра-Блоджетт. Золь-гель технологія.

Нанопористий кремній та оксид алюмінію. Вуглецеві наноструктури: нанотрубки, фулерени та графен. Методи формування квантових точок.

### 4. МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ

Матеріали мікро- і наносистемної техніки: конструкційні, функціонально активні і адаптивні.

Класифікація об'єктів мікро- та наносистемної техніки: сенсори, керовані електро-, радіо- і оптоелектромеханічні компоненти, мікропристрої для зберігання інформації, мікромашини, аналітико-технічні мікросистеми, мікро- і наноінструмент, мініатюрні транспортні засоби, мікро- та нанороботи.

Нано- та мікромеханічні сенсори: класифікація, призначення, характеристика перетворення, умови експлуатації. Характеристики сенсорів: діапазон виміру, чутливість, точність, лінійність, селективність. Похибки вимірів: температурний і часовий дрейф параметрів, шуми. Сенсори для контролю основних фізичних і хімічних параметрів середовищ, сенсори орієнтації, навігації і управління (MEMS- акселерометри та гіроскопи). Біомедичні сенсори та біочіпи.

Актюатори мікро- наносистем. Нано- та мікромеханічні приводи руху:

п'єзоелектричні, ємнісні, термомеханічні, електромагнітні, пневматичні актюатори.

Мікромашини та мікромеханізми.

Мікро- та наносистеми для генерації, перетворення та збереження енергії.

Високочастотні мікроелектромеханічні (ВЧ MEMS) та оптоелектромеханічні (МОEMS) компоненти. Керовані мікро електрорадіокомпоненти: резистори,

конденсатори, котушки індуктивності, резонатори і фільтри, мікрохвилеводи,

мікроантени, мікроелектромеханічні реле, перемикачі та комутатори.

Спеціальні технологічні процеси поверхневої та об'ємної мікромеханіки.

Мікромашинна обробка кремнію (LIGA-технологія). Інтеграція компонентів нано- та мікроелектроніки і нано- та мікросистемної техніки. Перспективи розвитку і використання нано- та мікросистем.

### III. НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ

1. Молчанов В.І. Квантова механіка / В.І. Молчанов // К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 151с. (Гриф МОН України, лист №1/11-7611 від 25.04.2013)
2. Ільченко В.І., Поплавко Ю.М. Фізика напівпровідників. Навчальний посібник. - К.:Аверс НТУУ, 2010. - 318с.
3. Шалимова К.В. Фізика напівпровідників. М.: Энергия, 1976. – 416 с.
4. Заячук Д.М. Основи наноелектроніки: У 2 кн., Кн.1. Квантово-механічні засади, структури, фізичні властивості: Підручник / Заячук Д.М., Якименко Ю.І., Орлов А.Т., Співак В.М., Богдан О.В. – К.: Кафедра, 2014. – 470 с. (Гриф МОН України, лист №1/11-11809 від 22.07.2013 р.)
5. Заячук Д.М. Наноелектроніка: Навчальний посібник / Заячук Д.М., Якименко Ю.І., Орлов А.Т., Співак В.М., Богдан О.В. – К.: Кафедра, 2013. – 454 с. (Гриф МОНМС України, лист №1/11-16500 від 23.10.2012)
6. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: Навчальний посібник ( № листа МОН 1/11-2442 від 25.03.2011) / Ю.М. Поплавко, О.В. Борисов, Ю.І. Якименко. - К.: НТУУ "КПІ", 2012. – 300 с. (Гриф МОН України, лист №1/11-2442 від 25.03.2011)
7. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 580 с.
8. Ю.М. Поплавко. Фізика діелектриків. Підручник. Видавництво «Політехніка». – 2015. – 568 с. Гриф МОН України (лист №1/11-16779 від 04.11.2013 р.).
9. Твердотільна електроніка : підручник / О. В. Борисов, Ю. І. Якименко ; за заг. ред. Ю. І. Якименка. – К. : НТУУ «КПІ», 2015. – 484 с. (Затверджено Вченою радою НТУУ «КПІ», протокол № 2 від 02.03.2015 р.)
10. Погосов В.В., Корніч Г.В., Васютін Є.В., Пугіна К.В., Кіпріч В.І Основи нанофізики і нанотехнологій. Електронний посібник. Запоріжжя, 2008. – 630 с.
11. Москалюк В.О., Тимофєєв В.І., Федяй А.В. «Надшвидкодіючі прилади електроніки», навчальний посібник з грифом МОН України, К.: вид-во «Політехніка» . – 2014. – 528 с.
12. Фізичні основи мікро- та наноелектроніки: підручник для студ. вищих закладів освіти / М. Г. Находкін, Д. І. Шека, К.: ВПЦ "Київський університет". – 2005. – 431с.
13. Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В. Матеріали і компоненти: навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗДІА. – 2011. – 278 с.
14. Семенець В. В. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології : підруч. Для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом підготов. Радіоелектронні апарати / В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, В. А. Палагін. – Х.: Компанія СМІТ. – 2011. – 415 с.
15. Фізика електронних процесів,: [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / В. О. Москалюк, В.І.Тимофєєв, Т.А.Саурова; Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 5 від 30.06.2020 р.). – Електронні текстові дані (1 файл: 7,21 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. –324 с.

### IV. РЕЙТИНГОВА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ВСТУПНОГО ВИПРОБУВАННЯ

Під час підготовки відповідей на запитання і складання вступного іспиту заборонено використовувати будь-які допоміжні матеріали та електронні засоби (мобільні телефони, ноутбуки, планшети тощо).

Критерії оцінювання результатів вступного іспиту. Вступний іспит проводиться в усній формі.

Оцінка вступного іспиту складається з балів, які вступник отримує за:

- 1) відповіді на кожне основне питання білету;

2) відповіді на додаткові запитання членів предметної комісії.

Підсумкові бали іспиту складаються з балів за кожне питання білету та балів, отриманих за відповіді на додаткові питання.

Питання білету оцінюються максимум у 30 балів за кожне, додаткові питання – максимум у 10 балів за всі питання.

Критерії оцінки відповідей.

З максимальної кількості балів знімаються бали за таких умов:

1) питання білету повністю не розкрито – «мінус» 30 балів;  
2) при відповіді на питання білету не повною мірою розкрито суть фізичних процесів (ефектів), або не наведені основні характеристики чи принципи роботи приладів (пристроїв), або суть технологій, методи – «мінус» 5 балів за кожний недолік;

3) вступник не може надати відповідь на додаткове питання – «мінус» 2 бали за кожне питання;

4) відповідь на додаткове питання не є повною або не враховує деякі важливі аспекти – «мінус» 1 бал за кожний недолік.

Максимальна кількість балів – 100.

Шкала оцінювання підсумкових результатів вступного іспиту

Кількість балів	Оцінка
95-100	відмінно
85-94	дуже добре
75-84	добре
65-74	задовільно
60-64	достатньо
0-59	незадовільно

\*При отриманні оцінки “незадовільно” вступник виключається з конкурсного відбору.

Перерахування оцінки за 100-бальною шкалою до 200-бальної шкали відбувається відповідно до таблиці:

Початковий рейтинг абітурієнта за екзамен розраховується виходячи із 100-бальної шкали. При визначенні загального рейтингу вступника початковий рейтинг за екзамен перераховується у 200-бальну шкалу згідно а таблицею:

Таблиця відповідності оцінок PCO (60...100 балів) оцінкам ЄВІ (100...200 балів)

Оцінка PCO	Оцінка ЄВІ	Оцінка PCO	Оцінка ЄВІ	Оцінка PCO	Оцінка ЄВІ	Оцінка PCO	Оцінка ЄВІ
60	100,0	70	125,0	80	150,0	90	175,0
61	102,5	71	127,5	81	152,5	91	177,5
62	105,0	72	130,0	82	155,0	92	180,0
63	107,5	73	132,5	83	157,5	93	182,5
64	110,0	74	135,0	84	160,0	94	185,0
65	112,5	75	137,5	85	162,5	95	187,5
66	115,0	76	140,0	86	165,0	96	190,0
67	117,5	77	142,5	87	167,5	97	192,5
68	120,0	78	145,0	88	170,0	98	195,0
69	122,5	79	147,5	89	172,5	99	197,5
						100	200,0

## В. ПРИКЛАД ЕКЗАМЕНАЦІЙНОГО БІЛЕТУ

Форма № Н-5.05

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

	(повне найменування вищого навчального закладу)
Освітній ступінь	<u>доктор філософії</u>
Спеціальність	<u>176 Мікро- та наносистемна техніка</u>
	(назва)
Навчальна дисципліна	<u>Вступний іспит</u>

#### ЕКЗАМЕНАЦІЙНИЙ БІЛЕТ № \_

1. Питання №1
2. Питання №2
3. Питання №3

Затверджено

Гарант освітньої програми

\_\_\_\_\_ Володимир ТИМОФЄЄВ

#### РОЗРОБНИКИ:

*Тимофєєв Володимир Іванович, д.т.н., професор, завідувач кафедри електронної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського*

*Борисов Олександр Васильович, к.т.н., професор, професор кафедри мікроелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського*

*Прокопенко Юрій Васильович, д.т.н., доцент, професор електронної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського*

*Орлов Анатолій Тимофійович, к.т.н., професор, професор кафедри мікроелектроніки КПІ ім. Ігоря Сікорського*

#### Програму рекомендовано:

Вченою радою

факультету електроніки

Голова вченої ради

протокол № 01/2023

\_\_\_\_\_ від «30» січня 2023 р.

Сергій НАЙДА