

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Голова Вченої ради  
факультету електроніки  
\_\_\_\_\_ В.Я. Жуйков  
27.02.2017 р.

## **ПРОГРАМА ВСТУПНОГО ІСПИТУ**

**третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти  
для здобуття наукового ступеня доктор філософії**

**ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ      15 Автоматизація та  
приладобудування**

**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ    153 Мікро- та наносистемна техніка**

Ухвалено Вченою радою факультету  
електроніки  
(протокол від 27.02.2017 р. № 02/17)

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2017

## **РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:**

Тимофєєв Володимир Іванович, д.т.н., професор, завідувач кафедри фізичної та біомедичної електроніки НТУУ «КПІ»

Борисов Олександр Васильович, к.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри мікроелектроніки НТУУ «КПІ»

Прокопенко Юрій Васильович, д.т.н., доцент, доцент кафедри фізичної та біомедичної електроніки НТУУ «КПІ»

Орлов Анатолій Тимофійович, к.т.н., доцент, доцент кафедри мікроелектроніки НТУУ «КПІ»

---

---

---

---

## ВСТУП

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 Додатком до Правил прийому до КПІ ім. Ігоря Сікорського у 2017 році для здобуття ступенів доктора філософії та доктора наук.

Основною формою підготовки здобувачів ступеня доктора філософії на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти є аспірантура. Підготовка здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії здійснюється:

- в аспірантурі вищого навчального закладу (далі – Університету) за очною (денною, вечірньою) або заочною формою навчання;
- поза аспірантурою (для осіб, які професійно провадять наукову, науково-технічну або науково-педагогічну діяльність за основним місцем роботи у відповідному вищому навчальному закладі (науковій установі)).

До аспірантури на конкурсній основі приймаються особи, які здобули вищу освіту ступеня магістра (спеціаліста). Допускаються особи, які вчасно подали всі необхідні для вступу документи згідно з правилами прийому до Університету. Приймальна комісія може відмовити особі в допуску до проходження вступного випробування до аспірантури виключно у зв'язку з неподанням в установлений строк документів, визначених правилами прийому.

Вступні випробування до аспірантури Університету складаються з:

- вступного іспиту із спеціальності (в обсязі програми рівня вищої освіти магістра з відповідної спеціальності);
- особам, які вступають до аспірантури з іншої галузі знань (спеціальності) ніж та, яка зазначена в їх дипломі магістра (спеціаліста), можуть бути призначені додаткові вступні випробування. Додаткові вступні випробування оцінюються за шкалою «зараховано», «незараховано». Вступник, що отримав «незараховано», до складання вступного випробування не допускається;
- вступного іспиту з іноземної мови (за вибором Вченої ради вищого навчального закладу (наукової установи) в обсязі, який відповідає рівню B2 Загальноєвропейських рекомендацій з мовної освіти).

Послідовність складання вступних іспитів до аспірантури наступна:

- додаткове вступне випробування (в разі необхідності);
- іноземна мова;
- спеціальність.

Для проведення вступних випробувань на основі здобутого ступеня магістра (спеціаліста) створюються предметні комісії. Вступні іспити до аспірантури проводяться предметними комісіями.

Програми вступних випробувань до аспірантури оприлюднюються на веб-сайтах НТУУ «КПІ», факультетів (інститутів), відділу аспірантури та докторантури.

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. Головним завданням програми є забезпечення можливості вступникам на навчання самостійно підготуватися до складання вступного іспиту.

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.

## Методика проведення вступного іспиту.

Вступні випробування до аспірантури проводяться предметними комісіями, до складу яких входить, як правило, три – п'ять осіб, які призначаються наказом по Університету. До складу предметних комісій включаються доктори філософії та доктори наук, які проводять наукові дослідження за відповідною спеціальністю та відповідають за виконання відповідної освітньо-наукової програми. У час, зазначений у графіку, член предметної комісії роздає вступникам білети з екзаменаційними питаннями та робочі аркуші, відповідає на можливі запитання вступників щодо змісту білета, вимог до відповіді і критеріїв оцінки.

На підготовку відповідей на питання білету вступнику надається 60 хвилин.

Предметна комісія заслуховує відповіді вступника на питання білету, а також на додаткові питання членів комісії та оцінює результати складання вступного іспиту.

Предметна комісія оголошує результати після завершення вступного іспиту.

## Загальні вимоги до екзаменаційних білетів.

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

Екзаменаційні білети повинні:

- мати кількість варіантів на 3-5 більше, ніж кількість вступників, які одночасно складають вступний іспит (але не менше 15 варіантів);
- мати однакову структуру, бути рівнозначної складності, а за трудомісткістю відповідати відведеному часу на підготовку;
- за можливості зводити до мінімуму непродуктивні витрати часу на допоміжні операції, проміжні розрахунки та інше;
- використовувати відомі вступникам терміни, назви, позначення.

Усі екзаменаційні білети вступного іспиту повинні мати професійне (фахове) спрямування і вимагати від вступників не тільки відтворення знань окремих тем і розділів навчальних дисциплін, а і їх цілісного розуміння і застосування. При складанні вступного іспиту вступники повинні продемонструвати як репродуктивні знання, так і вміння використовувати набуті знання.

## ПЕРЕЛІК ЕКЗАМЕНАЦІЙНИХ ПИТАНЬ

### 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 вирождення електронного газу. Вирожені та невирожені 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 при надбар'єрному проходженні електрона. Коефіцієнти проходження та віддзеркалювання при тунелюванні. 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 неосновних 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. Варикапи. 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 спінтроніки. 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. Близькопольова 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 (МЕМС-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 МЕМС) та оптоелектромеханічні (МОЕМС) 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.

## ЗАКЛЮЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

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

Сумарна кількість балів	Оцінка ECTS	Традиційна оцінка
0–59	F	незадовільно
60–64	E	задовільно
65–74	D	
75–84	C	добре
85–94	B	
95–100	A	відмінно

## ЛІТЕРАТУРА

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. Блейкмор Дж. Фізика твердого тела. М.: Мир, 1988. – 608 с.
3. Ільченко В.І., Поплавко Ю.М. Фізика напівпровідників. Навчальний посібник. - К.:Аверс НТУУ, 2010. - 318с.
4. Шалимова К.В. Фізика полупроводников. М.: Энергия, 1976 . – 416 с.
5. 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.)
6. 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)
7. 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)
8. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Нанозлектроника: Учеб. Пособие Изд-во : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 223 с.
9. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 580 с.
10. Ю.М. Поплавко. Фізика діелектриків. Підручник. Видавництво «Політехніка». – 2015. – 568 с. Гриф МОН України (лист №1/11-16779 від 04.11.2013 р.).
11. 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.)
12. Зи С. Фізика полупроводниковых приборов, Т 1,2: Пер. с англ./ Под ред. Р. А. Сурица. М.: Мир, 1984. – 456 с.
13. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989. – 630 с..
14. Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1983 .– 368 с.
15. Азаренков Н.А., Веревкин А.А., Ковтун Г.П. Основы нанотехнологий и наноматериалов. Учебное пособие. Харьков, 2009. – 70 с.
16. 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.
17. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. М.: Техносфера. 2005. – 336 с.
18. Москалюк В.О., Тимофеев В.І., Федяй А.В. «Надшвидкодіючі прилади електроніки», навчальний посібник з грифом МОН України, К.: вид-во «Політехніка». – 2014. – 528 с.
19. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 580 с.
20. Фізичні основи мікро- та наноелектроніки: підручник для студ. вищих закладів освіти / М. Г. Находкін, Д. І. Шека, К.: ВПЦ "Київський університет". – 2005. – 431 с.
21. Введение в нанотехнологии : текст лекций / А.И. Грабченко, Л.И. Пупань, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – 288 с.
22. Свешников Г.С. Нанотрубки и графен – материалы электроники будущего/ Г.С.Свешников, А.Н.Морозовская.- К.:Логос, 2009. – 164с.
23. Швець Є.Я., Червоний І.Ф., Головка Ю.В. Матеріали і компоненти: навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗДІА. – 2011. – 278 с.



24. Викулин И.М. Физика электрорадиоматериалов: учеб. пос. для студентов вузов/ Викулин И.М., Коробицын Б.В., Криськив С.К. – Одеса. – 2010. – 313 с.
25. Абрамов И.И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. – 152 с.
26. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций /Ф.Ф. Колпаков, Н.Г. Борзяк, В.И. Кортунов. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т» . – 2006. – 82 с.
27. 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.