



ТЕХНОЛОГІЇ І ЗАСТОСУВАННЯ НАНОСТРУКТУР Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Прикладна фізика
Статус дисципліни	Обов'язкова (нормативна) (цикл професійної підготовки)
Форма навчання	очна(денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	Загальна кількість: 120 год.(4кр) Лекційних занять: 36 год. Практичних занять: 18 год. Самостійна робота студентів: 66 год.
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Залік, поточний контроль, модульна контрольна робота, інд. завдання
Розклад занять	http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: Д.ф-м.н., професор, Тетьоркін Володимир Володимирович, teterkin@meta.ua Практичні: Д.ф-м.н., професор, Тетьоркін Володимир Володимирович, teterkin@meta.ua
Розміщення курсу	Посилання на дистанційний ресурс (Moodle, Google classroom, тощо)

Програма навчальної дисципліни

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

Необхідність вивчення даної дисципліни зумовлюється тією обставиною, що напівпровідникові нанотехнології визначають сучасний прогрес твердотільної електроніки, а також впливають на розвиток високих технологій в більшості галузей народного господарства.

Предметом вивчення дисципліни є: фізичні основи напівпровідникових нанотехнологій, технологічні методи вирощування напівпровідникових наноструктур, методи діагностики та контролю параметрів в процесі їх вирощування, технологічне обладнання для вирощування наноструктур, фізика приладів на основі наноструктур, практичне застосування наноструктур в сучасній напівпровідниковій опто- та мікроелектроніці. Після вивчення дисципліни спеціаліст повинен опанувати основи технології і фізики напівпровідникових наноструктур, а також вміти застосувати їх на практиці.

Мета дисципліни - набуття знань та практичних навиків, необхідних для самостійного розв'язку реальних проблем технології та практичного застосування напівпровідникових наноструктур.

Завдання дисципліни – вивчення основ фізики та технології напівпровідникових наноструктур, ознайомлення з фізичними принципами роботи приладів на їх основі.

Дисципліна базується на знаннях, які студенти отримують в рамках загальних та спеціальних курсів з фізики, математики, програмування, матеріалознавства, фізики твердого

тіла та напівпровідників, аналітичного приладобудування та автоматизованих систем управління. Дисципліна забезпечує набуття знань та практичних навиків, необхідних для самостійного розв'язку реальних проблем технології та практичного застосування напівпровідникових наноструктур.

Результати вивчення дисципліни можуть бути використані в подальшому для опанування наступними дисциплінами: "Фізика напівпровідникових приладів", "Основи оптоелектроніки", "Наноелектроніка та нанофотоніка", а також для курсового та дипломного проектування.

Після вивчення дисципліни студент повинен

знати:

- Основи технології матеріалів та структур напівпровідникової наноелектроніки.
- Методи підготовки поверхні напівпровідників: хімічне та хіміко-механічне травлення, іонна очистка, термічний відпал, сколи у надвисокому вакуумі.
- Методи аналізу хімічного складу та кристалічної структури поверхні напівпровідників: оже-електронний аналіз, рентгеноструктурний аналіз, дифракція швидких та повільних електронів, скануюча тунельна мікроскопія, ультрафіолетова емісійна спектроскопія.
- Експериментальні методи вирощування тонких та надтонких епітаксійних шарів напівпровідників: рідиннофазна епітаксія, газофазна епітаксія, метод „гарячої стінки", молекулярно-пучкова епітаксія.
- Типи напівпровідникових гетероструктур.
- Зонний спектр напівпровідникових надграток та структур з багатьма квантовими ямами, легованих надграток (*nipi*-структур), квантових ниток та квантових точки.
- Методи отримання наноструктур за допомогою літографії та самоорганізації.
- Експериментальні методи досліджень структурних та електронних властивостей напівпровідникових надграток та структур з квантовими ямами.
- Можливості прикладного застосування напівпровідникових гетероструктур. Прилади напівпровідникової наноелектроніки: інжекційні напівпровідникові лазери та світлодіоди, фотоприймачі, оптичні модулятори, високочастотні транзистори.
- Сучасні досягнення, напрямки та перспективи розвитку наноелектроніки.

уміти:

- Розрахувати зонну структуру напівпровідникових гетеропереходів в моделі Шоклі-Андерсона.
- Визначити положення рівня Фермі та величину вигину зон у гетеропереходах виходячи з рівня легування.
- Розрахувати величину темного струму гетероперехода (дифузійну та генераційно-рекомбінаційну складову струму).
- Розрахувати положення квантових рівнів в потенціальних ямах квантово-розмірних структур (надгратках, квантових точках).
- Оцінити область спектральної чутливості фотоприймачів на основі гетеропереходів та рівень власних шумів.
- Виконати розрахунок внутрішнього квантового виходу та модової структури інжекційних лазерів.

Загальні компетентності

ЗК 1: Здатність до абстрактного та аналітичного мислення, розуміння основних концепцій, парадигми та ідей прикладної фізики.

ЗК 2: Здатність до навчання та самонавчання шляхом пошуку, аналізу та конструктивного синтезу інформації з різних джерел.

ЗК 7: Здатність ініціативно застосовувати знання в області прикладної фізики при вирішенні робочих питань, організації командної роботи, оцінці та забезпеченні якості виконуваних робіт, реалізації проектів.

ЗК 9: Здатність адаптуватися та діяти в нових ситуаціях під тиском обставин, зокрема, здатність до самостійного освоєння нових методів дослідження, зміни наукового й виробничого профілю своєї діяльності.

ЗК 12: Здатність до здійснення діяльності, безпечної для себе та суспільства, необхідності збереження навколишнього середовища та впровадження технологій сталого розвитку.

Фахові компетентності

ФК 1: Здатність виконувати аналіз спеціальної літератури та на цій основі формулювати наукову або науково-технічну проблему, обирати методи її розв'язання, складати плани наукових досліджень та науково-технічних розробок у галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

ФК 2: Здатність до безперервного поглиблення фундаментальних знань та систематичного вивчення та аналізу нової науково-технічної інформації, світового досвіду в галузі прикладної фізики та наноматеріалів.

ФК 4: Здатність розробити схему фізичного експерименту та обрати необхідне лабораторне обладнання для проведення експерименту, проводити експериментальне дослідження властивостей фізичної системи, явищ і процесів.

ФК 7: Здатність швидко опанувати і експлуатувати складне наукомістке обладнання як дослідницьке, так і технологічне.

ФК 9: Здатність використовувати знання про фізичну природу об'єктів у роботах по створенню нових приладів, апаратури, систем, обладнання, речовин і матеріалів (наноматеріалів).

ФК 10: Здатність до аналізу фізичних принципів імплементації інформаційних процесів в фізичних системах, в тому числі в енергетиці та біофізиці.

ФК 11: Здатність до вибору методів дослідження структури, складу та властивостей матеріалів (наноматеріалів), що використовуються або застосовуються в фізичних, біофізичних та енергетичних системах, вибору оптимальних параметрів дослідження і розуміння границь застосування обраного методу.

ФК 12: Здатність готувати об'єкти для дослідження властивостей, явищ і процесів у фізичній, біофізичній системах, в області високих фізичних технологій, фізики живих систем та новітніх джерел енергії.

Програмні результати навчання

ПРН 1: Знання окремих розділів прикладної фізики на рівні, необхідному для виконання експериментальних досліджень та аналізу результатів в контексті існуючих теорій за умов невизначеності і неповноти експериментальних даних.

ПРН 3: Знання сучасних технологій та методів експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів (наноматеріалів) та їхніх застосовувань.

ПРН 5: Знання основ професійно-орієнтованих дисциплін спеціальності, зокрема, високих фізичних технологій, сучасного матеріалознавства, біофізики та фізики енергетичних систем (залежно від освітньої траєкторії) на рівні, необхідному для успішної роботи в наукових колективах, що працюють в галузі прикладної фізики.

ПРН 8: Знання закономірностей розвитку прикладної фізики, її місця в розвитку техніки, технологій сталого розвитку суспільства, розв'язанні екологічних проблем.

ПРН 9: Вміння застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів, нових матеріалів і наукоємних технологій в області біофізики, енергетичних та інформаційних систем (залежно від освітньої траєкторії).

ПРН 10: Вміння вибирати методи та інструментальні засоби проведення досліджень в одній із галузей прикладної фізики (залежно від освітньої траєкторії), користуватись обладнанням та устаткуванням для здійснення фізичного експерименту.

ПРН 11: Вміння знаходити науково-технічну інформацію з різних джерел з використанням сучасних інформаційних технологій.

ПРН 12: Вміння класифікувати, аналізувати та інтерпретувати науково-технічну, патентну, популярну інформацію в галузі прикладної фізики.

ПРН 13: Вміння використовувати сучасні методи і технології наукової комунікації українською та іноземною мовами, вміння читати та розуміти фахові англомовні джерела.

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

Для засвоєння матеріалу дисципліни повинні володіти основами квантової механіки в рамках вузівської програми, термодинаміки, молекулярної та статистичної фізики, основ фізики напівпровідників та напівпровідникових приладів, електродинаміки суцільних середовищ.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Розмірне квантування і напівпровідникові квантово-розмірні структури.

Тема 2. Технологія напівпровідникові наноструктур. Експериментальні методи вирощування надтонких напівпровідникових плівок, молекулярно-пучкова та мос-гідридна епітаксія напівпровідників.

Тема 3. Приладне використання напівпровідникових наноструктур. Фотоприймачі, напівпровідникові інжекційні лазери і світлодіоди на основі наноструктур.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Нижче наводиться перелік навчальних матеріалів та ресурсів для засвоєння матеріалу, який розглядається на лекційних заняттях, та для додаткового вивчення.

Основна література

1. Д.М. Заячук. Нанотехнології і наноструктури. Навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської Політехніки, 2009.

Додаткова література

1. Ф.Т. Васько. Электронные состояния и оптические переходы в полупроводниковых гетероструктурах. Киев, Наукова думка, 1993.
2. М. Херман. Полупроводниковые сверхрешетки. М.: Мир, 1989
3. А. Я. Шик, Л. Г. Бакуева, С. Ф. Мусихин, С. А. Рыков. Физика низкоразмерных систем. СПб: Наука, 2001.
4. Борисенко С. И. Физика полупроводниковых наноструктур: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.–115 с.
5. Ф. Бехштедт, Р. Эндерлайн. Поверхности и границы раздела полупроводников. М.: Мир, 1990.
6. К. В. Шалимова. Физика полупроводниковую М.: Энергия, 1971
7. Н. Кобаяси. Введение в нанотехнологию. М.: БИНОМ, 2008.
8. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры. Под ред. Л. Ченга и К. Плога, М.: Мир, 1989.
9. И. А. Случинская. Основы материаловедения и технологии полупроводников. М.: Наука, 2002.
10. С. В. Антоненко. Технология наноструктур: учебное пособие. М.: МИФИ, 2008.
11. И. Броудай и Дж. Мерей. Физические основы микротехнологии. М.: Мир, 1985
12. Анализ поверхности методами оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Под ред. Д. Бриггса и М. П. Сиха. М.: Мир, 1987.
13. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах: в 2-х томах.- М.: Мир, 1981.
14. Ф. Ф. Сизов. Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых» участках спектра. Киев, Академперіодика, 2008.
15. Інтегральна мікроелектроніка : Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка» / Г. С. Свечніков, Ю. В. Діденко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 15,7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 454 с.

16. В.В. Петров, А.А. Крючин, Ю.А. Куницький, В.М. Рубіш, А.С. Лапчук, С.О. Костюкевич. Методи нанолітографії. Київ, Наукова Думка, 2015.

Тверді та електронні копії літератури надаються викладачем. Зв'язок літературних ресурсів з темами дисципліни вказані у розділі 5.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

№	Назва теми лекції та перелік основних питань	Література основна	Література додаткова
Тема 1. Розмірне квантування і напівпровідникові квантово-розмірні структури.			
1	Основи фізики напівпровідників та напівпровідникових приладів. Зонна теорія напівпровідників.	1	6
	Основні етапи та напрямки розвитку напівпровідникової наноелектроніки. Історія наноелектроніки. Розвиток методів вирощування та дослідження фізичних властивостей напівпровідникових наноструктур.	1	11,12
2	Розмірне квантування. Рух електрона в дво-, одно- та нульмірних структурах. Густина станів в квантових структурах.	1	3,4
3	Напівпровідникові гетероструктури. Типи гетероструктур. Зонна діаграма гетероструктур. Модель Шоклі-Андерсона. Композиційні та леговані надгратки. Структури з багатьма квантовими ямами.	1	2, 3,5
	Зонний спектр квантових структур з пониженою розмірністю. Експериментальні методи досліджень зонного спектра (оптичні переходи, фотолюмінесценція).	1	1,3,5
Тема 2. Технологія напівпровідникових наноструктур. Експериментальні методи вирощування надтонких напівпровідникових плівок, молекулярно-пучкова та мос-гідридна епітаксія напівпровідників.			
4	Вирощування тонких та надтонких шарів напівпровідників. Методи епітаксії. Механізми росту епітаксійних шарів. Засоби та методи контролю параметрів надграток в процесі вирощування.	1	3,4, 8-10
5	Молекулярно-пучкова епітаксія. Молекулярно-пучкова епітаксія (МПЕ) кремнію. Особливості МПЕ напівпровідників A_2B_6 та A_4B_6 .	1	3, 8,10
6	МОС-гідридна епітаксія наноструктур. Використання МОС-гідридної епітаксії для промислового виготовлення напівпровідникових приладів.	1	8
7	Самоорганізація квантових структур. Релаксація та реконструкція поверхні напівпровідникових кристалів. Квантові структури на віцинальних гранях та гофрованих поверхні кристалів.	1	3,4
8	Квантові точки. Самоорганізовані структури з квантовими точками напівпровідників A_3B_5 .	1	3,4

Тема 3. Приладне використання напівпровідникових наноструктур. Фотоприймачі, напівпровідникові інжекційні лазери і світлодіоди на основі наноструктур.			
10	ІЧ фотоприймачі на двовимірних напівпровідникових структурах. Фоторезистори на структурах з багатьма квантовими ямами напівпровідників A_3B_5 . Фотодіоди на напівпровідникових надгратках. Порогові параметри фотоприймачів.	1	1, 2,3, 14
11	Нульмірні та одновимірні напівпровідникові наноструктури. Інкжекційні лазери та світлодіоди на гетеропереходах, квантових нитках та квантових точках.	1	1, 3, 13
12	Напівпровідникові наноструктури в сильних магнітних полях. Квантовий ефект Холла та гіганський магнітоопір в структурах з пониженою розмірністю.	1	2
13	Напівпровідникові наноструктури в сучасній мікроелектроніці. Методи нанолітографії: вакуумний ультрафіолет, електронна, іонна, рентгенівська літографія. Імпринт.	1	15,16
14	Тенденції розвитку сучасної мікроелектроніки. Закон Мура. Технологічні та фундаментальні обмеження в сучасній мікроелектроніці. Межа розвитку кремнієвої технології – критерії та часові терміни.	1	2,3,4

Практичні заняття

Експериментальні методи дослідження наноструктур

№	Назва теми заняття
1	Електронна оже-спектроскопія. Фізичні основи і використання в технології наноструктур.
2	Рентгеноструктурний аналіз об'єктів наноелектроніки
3	Спектроскопія комбінаційного розсіювання.
4	Фотолюмінесцентні методи дослідження напівпровідникових наноструктур.
5	Фур'є спектроскопія наноструктурованих матеріалів.
6	Дослідження наноструктурованих матеріалів методом електронного парамагнітного резонансу.
7	Атомна силова мікроскопія. Можливості і апаратна реалізація.
8	Електричні методи дослідження наноструктур.
9	Дослідження фотоелектричних властивостей наноструктур.

Для ознайомлення з перерахованими вище методами досліджень може бути використана експериментальна база Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студентів має на меті розвиток їх творчих здібностей, уміння самостійно працювати з науковою літературою, творчо сприймати навчальний матеріал і осмислювати його та формування навичок до щоденної роботи з метою одержання та узагальнення знань, умінь і навичок.

На самостійну роботу відводяться наступні види завдань:

- обробка і осмислення інформації, отриманої на лекційних заняттях;
- робота з рекомендованою літературою;
- написання реферату;
- виконання модульної контрольної роботи;

- підготовка до складання семестрового заліку.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Відвідування занять

Відвідування лекцій, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, студентам рекомендується відвідувати заняття, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для успішного складання екзамену.

Пропущені контрольні заходи

Результат модульної контрольної роботи для студента, який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50 % від загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається.

Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Норми етичної поведінки

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами (згідно «Положення про систему забезпечення якості вищої освіти у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Положення про організацію навчального процесу»).

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

Видами контролю успішності засвоєння матеріалу дисципліни є поточний контроль, модульна контрольна робота, написання реферату, семестровий контроль.

Поточний контроль реалізується у вигляді письмових відповідей на запитання викладача після лекційного заняття, самостійно опрацьованого студентом. Вибір студентів для поточного контролю відбувається за розсудом викладача.

Модульна контрольна робота

Модульна контрольна робота проводиться після завершення другої теми лекційних занять.

Передбачає письмову відповідь на питання поставлені викладачем.

Модульна контрольна робота оцінюється за наступними критеріями:

- максимальна кількість балів за кожне питання – повна правильна відповідь, 95% інформації,
- там де треба наведено графіки і є письмовий коментар;
- 75% — відповідь правильна, не всі умови попереднього пункту виконано;
- 60% — наведено основні базові поняття;
- відповіді, які студент не може пояснити, не зараховуються.

Індивідуальне завдання (Реферат)

Теми рефератів надає викладач. Реферат оформлюється у електронному вигляді і має містити текст, рисунки і графіки, там де необхідно. Захист реферату проводиться протягом 2-х академічних годин на консультації після завершення лекційного курсу.

Умови допуску до заліку

В таблиці наведені умови допуску до семестрового контролю.

№	Обов'язкова умова допуску до заліку	Критерій
1	Поточний рейтинговий бал	≥40

2	МКР	виконана
3	Реферат	зданий

Додаткові умови допуску до заліку, які заохочуються:

- Активна самостійна робота над теоретичним матеріалом: пошук та використання інформаційних ресурсів, ілюстрацій, відео, медіа ресурсів, що доповнюють поточний курс (додаються заохочувальні бали).

Семестровий контроль (залік)

Залік приймається у вигляді усної відповіді за білетом (співбесіда), що містить два питання з лекційного курсу.

Рейтингові бали (максимум 25) за усну відповідь нараховуються згідно наступних критеріїв:

- від 20 до 25 — повна правильна відповідь, 95% інформації, наведено рисунки, позначення, є письмовий коментар щодо базових понять та законів, формулювання та терміни точні, терміни роз'яснено, повна правильна відповідь на уточнюючі запитання

- від 15 до 20 — правильна відповідь, 80% інформації, наведено рисунки, позначення, є письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни по суті правильні але

не повні, терміни роз'яснено, правильна відповідь на уточнюючі запитання

- від 10 до 15 — по суті правильна, але неповна відповідь, 70% інформації, наведено рисунки та позначення, відсутні письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни по суті правильні, але не повні, терміни не роз'яснено, правильна відповідь на більшість уточнюючих запитання

- від 5 до 10 — відповідь неповна, 50% інформації, не наведено рисунки та позначення, відсутні

письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни в основному правильні, але не повні, терміни не роз'яснено, відповіді на уточнюючі запитання не повні

- від 0 до 5 — відповідь неповна, 30% інформації, не наведено рисунки та позначення, відсутні

письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни в основному не повні, терміни не роз'яснено, відповіді на уточнюючі запитання не повні або відсутні

Остаточна оцінка **RD** є сумою рейтингових балів отриманих за поточний контроль та балів отриманих на екзамені після співбесіди зі студентом.

№	Контрольний захід	Бал	Кількість	Всього
	Модульна контрольна робота	15	1	15
	Практичні заняття	10	1	10
	Реферат	25	1	25
	Залік	50	1	50
	Всього			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

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус): «Технології та застосування наноструктур»

Складено професор каф. ПФ, д. ф.-м. н., Тетьоркін Володимир Володимирович

Ухвалено кафедрою Прикладної фізики (протокол № 2 від 04 вересня 2020р.)

Затверджено Вченою Радою ФТІ (протокол № 7/1 від 07 вересня 2020р.)