



Наноструктури в електроніці та фотоніці

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

| | |
|---|---|
| Рівень вищої освіти | <i>Другий (магістерський)</i> |
| Галузь знань | 10 Природничі науки |
| Спеціальність | 105 Прикладна фізика та наноматеріали |
| Освітня програма | Прикладна фізика |
| Статус дисципліни | Вибіркова (цикл професійної підготовки) |
| Форма навчання | очна(денна) |
| Рік підготовки, семестр | 1 курс, осінній семестр |
| Обсяг дисципліни | Загальна кількість: 135 год.(4,5кр) Лекційних занять: 36 год. Практичних занять: 18 год. Самостійна робота студентів: 81 год. |
| Семестровий контроль/ контрольні заходи | Залік, поточний контроль, модульна контрольна робота, Домашня контрольна робота |
| Розклад занять | http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses |
| Мова викладання | Українська |
| Інформація про керівника курсу / викладачів | Лектор: Д.ф-м.н., <i>вчене звання</i> , Тетьоркін Володимир Володимирович, <i>контактні дані</i> ¹ Практичні і: Д.ф-м.н., <i>вчене звання</i> , Тетьоркін Володимир Володимирович, <i>контактні дані</i> ² |
| 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 фотоелектроніки, а також впливають на розвиток високих технологій в більшості галузей народного господарства. Фотоелектроніка – область науки і техніки, яка досліджує принципи перетворення оптичного випромінювання в електричні сигнали, а також займається пошуком нових матеріалів та створенням приладів, які реалізують ці принципи. Фотоелектронні технології віднесені у провідних країнах до «критичних» та «інноваційних».

Дисципліна передбачає поглиблене вивчення властивостей матеріалів та структур сучасної напівпровідникової інфрачервоної фотоелектроніки. Курс ставить за мету ознайомити студентів з основними проблемами розробки та дослідження приладів інфрачервоної фотоелектроніки. Будуть розглянуті різні типи дискретних та багатоелементних фотоприймачів – фоторезистори, фотодіоди, болометри, лавинні фотодіоди. Будуть також розглянуті методи отримання інфрачервоних зображень та їх використання в науці і техніці. Основну увагу у курсі лекцій буде приділено фізичним принципам роботи приладів інфрачервоної фотоелектроніки. Будуть розглянуті можливості напівпровідникової нанотехнології для

створення інфрачервоних приладів на основі квантово-розмірних структур (надграток, структур з багатьма квантовими ямами, квантових точок).

Вивчення матеріалів спецкурсу базується на таких дисциплінах: загальна фізика, термодинаміка, квантова механіка, статистична фізика, фізика твердого тіла.

Вивчення курсу є необхідним етапом фахової фізичної освіти і закладає базу для подальшої спеціалізації.

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

Завдання дисципліни - навчити студентів застосовувати теоретичні знання для вирішення питань розробки та практичного використання матеріалів та структур напівпровідникової інфрачервоної фотоелектроніки, розуміти тенденції розвитку інфрачервоної фотоелектроніки та орієнтуватися в останніх досягненнях.

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:

- Закони теплового випромінювання. Формула Планка.
- Моделі абсолютно чорного тіла.
- Загальну класифікацію інфрачервоних фотоприймачів. Принципи роботи фотонних і теплових фотоприймачів.
- Основні параметри та характеристики інфрачервоних фотоприймачів (чутливість, питома виявлювальна здатність, швидкодія).
- Зонну структуру, електричні та оптичні властивості напівпровідникових матеріалів, які використовуються в інфрачервоній фотоелектроніці.
- Процеси генерації, рекомбінації та транспорту носіїв заряду в фотоприймачах різних типів.
- Джерела та спектри шуму: теплового, генераційно-рекомбінаційного та дробового шуму.
- Моделі низькочастотного шуму типу $1/f$.
- Фотонний шум і роботу фотоприймачів в режимі обмеження флуктуаціями фонового випромінювання.

уміти:

- Розраховувати спектри випромінювання абсолютно чорного тіла.
- Оцінити спектр чутливості фотоприймач виходячи із зонної діаграми напівпровідника.
- Розрахувати рівноважну концентрацію носіїв струму та положення рівня Фермі у напівпровідниках з електронним та дірковим типом провідності.
- Розрахувати основні параметри р-п переходу – дифузійний потенціал, товщину збідненого шару, бар'єрну ємність переходу.
- Розрахувати величину дифузійного, генераційно-рекомбінаційного струму та тунельного струму в фотодіодах.
- Розрахувати величину фотоструму в фоторезисторах та фотодіодах.
- Визначити основні порогові характеристики інфрачервоних фотоприймачів – інтегральну та монохроматичну ампер-ватну чутливість, питому виявну здатність, значення диференційного опору.

Загальні компетентності СВО

ЗК 1: Здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу.

ЗК 2: Здатність до навчання та самоаналізу (пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел).

ЗК 6: Здатність проведення досліджень на відповідному рівні.

Фахові компетентності СВО

ФК 2: Здатність брати участь у плануванні і виконанні експериментів та лабораторних досліджень властивостей фізичних систем, фізичних явищ і процесів, обробленні й презентації їхніх результатів.

ФК 3: Здатність відповідно до поставленої задачі проводити наукові дослідження фізичних систем, явищ і процесів.

ФК 5: Здатність до постійного розвитку компетентностей у сфері прикладної фізики, інженерії та комп'ютерних технологій.

ФК 10: Здатність готувати об'єкти дослідження та вибирати і експлуатувати необхідне лабораторне устаткування для досліджень властивостей явищ і процесів у фізичній системі.

Програмні результати навчання

ПРН 1: Знання сучасної фізики на рівні, достатньому для розв'язання практичних проблем прикладної фізики.

ПРН 3: Застосовувати ефективні технології, інструменти та методи експериментального дослідження властивостей речовин і матеріалів, включаючи наноматеріали, при розв'язанні практичних проблем прикладної фізики.

ПРН 4: Застосовувати фізичні, математичні та комп'ютерні моделі для дослідження фізичних явищ, розробки приладів і наукоємних технологій.

ПРН 14: Обирати та використовувати методи та засоби дослідження структури, складу та речовин і матеріалів.

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. Основні типи ІЧ фотоприймачів. Процеси генерації, рекомбінації та переносу носіїв заряду в фотоприймачах. Порогові характеристики і механізми шуму в фотоприймачах.

Тема 2. Багатoelementні фотоприймальні пристрої. Гібридні та монолітні фотоприймальні пристрої. Обробка сигналів в багатoelementних фотоприймачах. Схеми зчитування на основі приладів із зарядовим зв'язком і комплементарних транзисторах (CCD, CMOS).

Тема 3. Проблеми інженерії зонного спектра в напівпровідниковій електроніці. Фотоприймачі на основі наноструктур. Тенденції розвитку ІЧ фотоелектроніки.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Основна література

1. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов. Под ред. Р.Дж. Киеса. М.: Радио и связь, 1985.
2. Л.Н Курбатов. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. М.: Изд-во МФТИ (1999).
3. А. Рогальский. Инфракрасные детекторы. Новосибирск: Наука, 2003.
4. Ф.Ф. Сизов. Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых» участках спектра. Киев, Академперіодика, 2008.
5. Ф.Т. Васько. Электронные состояния и оптические переходы в полупроводниковых гетероструктурах. Киев, Наукова думка, 1993.

Додаткова література

1. К.В. Шалимова. Физика полупроводниковую М.:Энергия, 1971.
2. Е.А. Сальков. Основы полупроводниковой фотоэлектроники. Киев: Наукова думка, 1988.
3. М. Херман. Полупроводниковые сверхрешетки / М. Херман. – М.: Изд-во «Мир», 1989. – 240 с.
4. А. Роуз. Зрение человека и электронное зрение. М.:Мир,1977.
5. Ж. Госсорг. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988.
6. Р.Д. Хадсон. Инфракрасные системы. М.:Мир, 1972.
7. М.А. Тришенков. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых электрических сигналов. М.: Радио и связь, 1992.
8. В.Н. Лозовский, Г.С. Константинова, С.В. Лозовский. Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность. СПб.: Лань, 2008.

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. Основні типи ІЧ фотоприймачів. Процеси генерації, рекомбінації та переносу носіїв заряду в фотоприймачах. Порогові характеристики і механізми шуму в фотоприймачах. | | |
| 1 | Основи фізики напівпровідників та напівпровідникових приладів. Зонна теорія напівпровідників. Оптичні та фотоелектричні явища в напівпровідниках. Механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду. Критерії вибору матеріалів для ІЧ фотоелектроніки | | 1 |
| 2 | Основні етапи та напрямки розвитку напівпровідникової фотоелектроніки. ІЧ фотоприймачі першого, другого та третього покоління. Їх особливості та відмінності. Необхідність розробки багатоелементних фотоприймачів. | 3,4 | 6,7 |
| 3 | Фотонні приймачі ІЧ випромінювання. Фоторезистори, фотодіоди та фотоємнісний фотоприймачі. Нові типи ІЧ фотонних фотоприймачів. | 1,2,3,4 | 5,6 |
| 4 | Теплові фотоприймачі. Основні типи теплових фотоприймачів. Неохолоджувані мікроболометричні матричні фотоприймачі. Порівняльний аналіз фотонних та теплових фотоприймачів. | 3,4 | |
| 5 | Шуми в одноелементних ІЧ фотоприймачах. Основні механізми шуму – тепловий, генераційно-рекомбінаційний і дробовий шум. Низькочастотні шуми типу 1/f. Фотонний шум. Режим роботи фотоприймача обмеженого флуктуаціями фонового випромінювання. Порогові параметри одноелементних ІЧ фотоприймачів. | 1,3,4 | 2,6,7 |
| | Тема 2. Багатоелементні фотоприймальні пристрої. Гібридні та монолітні фотоприймальні пристрої. Обробка сигналів в багатоелементних фотоприймачах. Схеми зчитування на основі приладів із зарядовим зв'язком і комплементарних транзисторів (CCD, CMOS). | | |

| | | | |
|---|--|-------|-----|
| 6 | Багатоелементні фотоприймачі. Формат та архітектура багатоелементних фотонних фотоприймачів першого, другого та третього поколінь. Скануючі та матричні фотоприймачі. Гібридні та монолітні фотоприймальні модулі. | 3,4 | 5,7 |
| 7 | Схеми зчитування для фокальних модулів. Прилади із зарядовим зв'язком (CCD). КМОН (CMOS) схеми зчитування. | | |
| 8 | Механізми шуму в багатоелементних фотоприймачах. Геометричний шум. Еквівалентна шуму різниця температур. Гранично можливі параметри багатоелементних фотонних та теплових фотоприймачів – теоретичні оцінки та практично досягнуті параметри. | 3,4 | 5,7 |
| 9 | Інформаційний потенціал технічного теплобачення. Основні характеристики зорової системи людини. Порівняльний аналіз зорової системи людини та технічного теплобачення. | 2 | 3 |
| Тема 3. Проблеми інженерії зонного спектра в напівпровідниковій фотоелектроніці. Фотоприймачі на основі наноструктур. Тенденції розвитку ІЧ фотоелектроніки. | | | |
| 10 | Проблема інженерії зонного спектра напівпровідникових матеріалів в ІЧ фотоелектроніці. Використання твердих розчинів напівпровідників для виготовлення багатоспектральних фотоприймачів. Фотоприймачі на основі вузькощілинних напівпровідників кадмій-ртуть-телур. | 3,5 | |
| 11 | ІЧ фоторезистори на двовимірних напівпровідникових структурах. Фоторезистори на основі двовимірних гетероструктур першого типу з багатьма квантовими ямами напівпровідників A_3B_5 . | 3,4 | 3 |
| 12 | ІЧ фотодіоди на квантових ямах. Фотодіоди на напівпровідникових надгратках другого типу. Багатоелементні фотоприймачі на основі структур з квантовими ямами. Переваги і недоліки двовимірних фотоприймачів з квантовими ямами. | 3,4 | 8 |
| 13 | Фотоприймачі на основі нульвимірних наноструктур. Зонний спектр, оптичні переходи, область спектральної чутливості та механізми рекомбінації в нульвимірних наноструктурах. Конструктивні особливості багатоелементних фотоприймачів на квантових точках. | 3,4 | |
| 14 | Тенденції розвитку сучасної фотоелектроніки. Багатоспектральні матричні фотоприймальні пристрої. Військові використання тепловізійних пристроїв та систем. | 2,3,4 | |

Практичні заняття

Експериментальні методи дослідження наноструктур

| № | Назва теми заняття |
|---|---|
| 1 | Основні закони теплового випромінювання. |
| 2 | Основні напівпровідникові матеріали для використання в ІЧ фотоелектроніці. Критерії відбору матеріалів.. |
| 3 | Оптичні властивості напівпровідників. Механізми оптичної генерації нерівноважних носіїв в напівпровідниках. |
| 4 | Механізми рекомбінації нерівноважних носіїв заряду. |
| 5 | Зонні діаграми гомопереходів та гетероструктур. Експериментальні методи досліджень параметрів зонної |

| | |
|---|--|
| | діаграми. |
| 6 | Основні механізми транспорту носіїв заряду в ІЧ фоторезисторах та фотодіодах. |
| 7 | Теоретичні оцінки рівня власних шумів в фоторезисторах та фотодіодах. |
| 8 | Визначення порогових характеристик фотоприймачів (ампер-ватної та вольт-ватної чутливості, виявлювальної здатності, квантової ефективності). |
| 9 | Основні експериментальні методи визначення параметрів та характеристик матеріалів ІЧ фотоелектроніки та приладних структур. |

6. Самостійна робота студента/аспіранта

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 домашньої та 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. В разі великої кількості пропусків студент може бути недопущений до заліку.

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, домашня контрольна робота, 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.

Домашня контрольна робота

Виконується після завершення першої теми лекційних занять.

Передбачає письмову відповідь на питання поставлені викладачем.

Модульна контрольна робота

Модульна контрольна робота проводиться після завершення другої теми лекційних занять.

Передбачає письмову відповідь на питання поставлені викладачем.

Домашня і 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;

- списані відповіді, які студент не може пояснити, не зараховуються.

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 | ДКР | виконана |
| 3 | МКР | виконана |
| 4 | 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 письмо

ві 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 |
|---|----------------------------|-----|-----------|--------|
| | Домашня контрольна робота | 20 | 1 | 20 |
| | Модульна контрольна робота | 20 | 1 | 20 |
| | Практичні заняття | 10 | 1 | 10 |
| | Залік | 50 | 1 | 50 |
| | Всього | | | 100 |

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

| <i>Кількість балів</i> | <i>Оцінка</i> |
|---------------------------|---------------|
| 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): «Наноструктури в електроніці та фотоніці»

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

Ухвалено кафедрою Прикладної фізики (протокол № 2/2021-2021 від 04 вересня 2020р.)

Погоджено Методичною Радою ФТІ (протокол № 7/1 від 07 вересня 2020р.)