



Наноелектроніка

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>перший (бакалавр)</i>
Галузь знань	15 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність	153 Мікро-та наносистемна техніка
Освітня програма	ОНП Мікро-та наносистемна техніка
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	3-й курс осінній семестр
Обсяг дисципліни	6 кредитів (180 годин)
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Екзамен
Розклад занять	
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор/ Практичні: д.т.н. професор Вербицький В.Г. , v.verbytskyi-me@i111.kpi.ua, м. 068-529-62-67
Розміщення курсу	https://classroom.google.com/c/NTQ2MDIwNzM1NTQ2?cjc=i3opso6

Програма навчальної дисципліни

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

Робоча програма кредитного модуля «Наноелектроніка» для студентів освітньої програми «Мікро-та наносистемна техніка» освітньо- кваліфікаційного рівня « освітньо – науковий» за денною формою навчання складена відповідно до програми навчальної дисципліни «Наноелектроніка».

Метою вивчення навчальної дисципліни «Наноелектроніка» є надання студентам комплексу базових знань, в рамках існуючих природничих наукових положень і сучасного розвитку галузі наноелектроніки, про фізичні властивості та квантово-механічні уявлення електронного газу і закономірностей формування носіїв зарядів та їх розподіл в межах потенціальних ям, явищ тунелювання, резонансних ефектів, вивчення і створення умов надпровідності, поведінки електронів в сильних магнітних полях в системах різної вимірності, методи дослідження наномасштабних елементів, а також розгляд різних аспектів практичного застосування квантово-механічних структур.

Дисципліна формує:

1. Загальні компетентності :

- ЗК 1. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- ЗК 2. Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності;
- ЗК 6. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями;
- ЗК 7. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел;

2. Фахові компетентності:

- *ФК 1. Здатність використовувати знання і розуміння наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки;*
- *ФК 3. Здатність використовувати математичні принципи і методи для проектування та застосування мікро- та наносистемної техніки;*
- *ФК 5. Здатність ідентифікувати, класифікувати, оцінювати і описувати процеси у мікро- та наносистемній техніці за допомогою побудови і аналізу їх фізичних і математичних моделей;*
- *ФК 12. Здатність використовувати знання про особливості термодинаміки, кінетики хімічних перетворень, структурних аспектах, особливостях синтезу та основних закономірностях створення функціональних неорганічних матеріалів з заданими властивостями;*

В результаті успішного засвоєння дисципліни здобувачі вищої освіти досягають таких **програмних результатів навчання:**

- *ПРН 1. Застосовувати знання принципів дії пристроїв і систем мікро- та наносистемної техніки при їхньому проектуванні та експлуатації;*
- *ПРН 2. Застосовувати знання і розуміння математичних методів для розв'язання теоретичних і прикладних задач мікро- та наносистемної техніки;*
- *ПРН 3. Застосовувати знання і розуміння фізики, відповідні теорії, моделі та методи для розв'язання практичних задач синтезу пристроїв мікро- та наносистемної техніки;*
- *ПРН 8. Будувати та ідентифікувати математичні моделі технологічних об'єктів, використовувати їх при розробці нової мікро- та наносистемної техніки та виборі оптимальних рішень;*
- *ПРН 14. Вміти засвоювати нові знання, прогресивні технології та інновації, знаходити нові нешаблонні рішення і засоби їх здійснення;*
- *ПРН 16. Застосовувати знання структурних особливостей, природи хімічного зв'язку та електрофізичних властивостей матеріалів електроніки для створення функціональних матеріалів та структур твердотільної, оптичної, мікрохвильової та наноелектроніки.*

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

Міждисциплінарний зв'язок: курс забезпечується з фаховими навчальними дисциплінами, такими як «Субмікронні та нанорозмірні структури електроніки», «Основи квантової механіки» «Твердотільна електроніка», «Фізика твердого тіла», «Фізика діелектриків», «Фізика напівпровідників», «Технологічні основи мікроелектроніки».

Знання, отримані при вивченні дисципліни «Наноелектроніка» можуть бути використані при проведенні наукових досліджень та при написанні диплома бакалавра.

Зміст навчальної дисципліни

3. Навчальні матеріали та ресурси

Розділ 1. Потенціальна яма.

Розділ 2. Потенціальний бар'єр.

Розділ 3. Вимірність системи і густина станів вільних електронів.

Розділ 4. Енергетичний спектр електронів у сильному магнітному полі.

Розділ 5. Двовимірні структури.

Розділ 6. Композиції двовимірних структур, напівпровідникові надгратки.

Розділ 7. Одновимірні структури, квантові нитки.

Розділ 8. Властивості систем з двовимірними електронами.

Розділ 9. Властивості надграток.

Розділ 10 Властивості нуль вимірних структур

Навчальні матеріали та ресурси

Базова література:

1. Основи наноелектроніки: у 2 кн. Кн.2 «Матеріали і наноелектронні технології : Підручник / Ю.І. Якименко, Д.М. Заячук, , В. М.Співак, А.Т. Орлов, О. В. Богдан, В.М. Коваль. – сайт <http://www.fel.ntukpi.kiev.ua>. – К: НТУУ «КПІ», 2016. - 400 с.
2. Поплавко Ю.М., Борисов О. В., Якименко Ю. І. Нанофізика, наноматеріали, наноелектроніка: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 300 с.
3. Наноматеріали і нанотехнології: навчальний посібник / Азаренков М. О., Неклюдов І. М., Береснєв В. М., Воєводін В. М., Погребняк О. Д., Ковтун Г. П., Соболев О. В., Удовицький В. Г., Литовченко С. В., Турбін П. В., Чижкало В. О. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 316 с.
4. Основи наноелектроніки. Квантово-механічні засади, структури, фізичні властивості .Під редакцією Д.М.Заячука. іїв 2011 рік. 469с.
5. Субмікронні та нанорозмірні структурителектроніки. Під редакцією З.Ю.Готри Чернівецький національний університет ім..Юрія Федьковича. 2014 рік 835 с.
6. Вакарчук І.О.Квантова механіка.-Львів. Львівський національний університет ім.. Івана Франка, 2004 р.
7. Д.М.Заячук. Нанорозмірні структури і надгратки. -Львів. В-во Національного університету»Львівська політехніка»,2006р.
8. ЗаячукД.М..Нанотехнології і наноструктури. –Львів В-во Національного університету «Львівська політехніка» 2009 р.

Допоміжна література:

1. 1. Ткач О. П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні: Навчальний посібник. - Суми: Сумський державний університет, 2014. - 127 с.
2. Яблонь Л.С., Бойчук В.М. Фізичні основи нанотехнологій. Курс лекцій. – Івано-Франківськ, 2015. – 103 с.
3. 4. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Смик С.Ю. Діагностика наносистем. - Київ: Академперіодика, 2003. - 149 с.
4. 5. Шпак А.П., Куницький Ю.А., Коротченко О.О., Смик С.Ю. Квантові низькорозмірні системи. - Київ: Академперіодика, 2003. - 308 с..
5. Сайт кафедри мікроелектроніки. Розділ електронна бібліотека: <http://me.kpi.ua/index.php?id=61>

Навчальний контент

4. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

5. Лекції План лекцій
6. №п.п

1	Просторові та енергетичні характеристики потенціальної ями.
2	Квантування енергетичного спектра частинки у потенціальній ямі.
3	Форма потенціальної ями і характер квантування енергетичного спектра.
4	Захоплення квантово-механічних частинок потенціальними ямами різної вимірності.
5	Повний енергетичний спектр квантово-механічної частинки в потенціальній ямі

6	Тунелювання квантово-механічної частинки через потенціальний бар'єр
7	Резонансно-тунельні структури
8	Вимірність системи і «к-об'єм» одного квантового стану вільного електрона
9	Алгоритм розрахунку густини станів вільних електронів
10	Густина станів і квадратичний закон дисперсії
11	Густина станів і лінійний закон дисперсії
12	Тривимірні системи.
13	Двовимірні системи
14	.Структури з двовимірними електронами: двовимірний електронний газ на гетеропереходах
15	.Структури з двовимірними електронами: двовимірний електронний газ у квантовій ямі
16	Структури з двовимірними електронами: двовимірний електронний газ в інверсних шарах польових транзисторів
17	Просторова структура надграток
18	Енергетична структура надграток
19	.Одновимірні кристали. Перехід Пейерлса.
20	Неможливість співіснування різних фаз в одновимірних структурах.
21	Квантовий ефект Холла
22	Цілочисловий квантовий ефект Холла.
23	Дробовий квантовий ефект Холла.
24	Густина станів у надгратках.
25	Оптичні властивості надграток
26	Електропровідність надграток
27	Квантові точки і бар'єрні структури. Кулонівська блокада.

Практичні заняття.

1. Методика розрахунку повного енергетичного спектру квантово-механічної частинки в одновимірній, двовимірній і тривимірній потенціальних ямах та сформулювати наслідки, які впливають з можливої поведінки електрона в таких ямах.
2. Енергетична відстань між основним і першим збудженим рівнями в одновимірній потенціальній ямі параболічного типу становить 0,5 еВ. Записати значення енергій перших п'яти енергетичних рівнів електрона в потенціальній ямі.
3. Енергетична відстань між основним і першим збудженим рівнями електрона в нескінченно глибокій одновимірній прямокутній потенціальній ямі становить 0,3 еВ. Запишіть значення енергії між другим і третім енергетичними рівнями.
4. Розрахуйте коефіцієнт прозорості прямокутного потенціального бар'єра висотою U і шириною a .
5. Побудуйте і порівняйте просторові енергетичні діаграми тунельної і резонансно-тунельної структур.
6. Покажіть залежність густини станів вільного електрона від його ефективної маси і обґрунтуйте фізичні засади і причини такої залежності.

7. Знайдіть повну кількість квантових станів вільного тривимірного електрона у кристалі одиничного об'єму в енергетичній смузі шириною 0,1 еВ над екстремумом зони провідності 0,1 еВ і співвідношення між ними. Закон дисперсії – параболічний.
8. Порівняйте концентрацію 2D електронів при 0К у квантових шарах товщиною 4, 10 і 20 нм, якщо енергія Фермі у всіх трьох випадках дорівнює 0,1 еВ.
9. Охарактеризуйте процес формування двовимірного електронного газу на гетеропереході та проаналізуйте можливості підвищення рухливості 2D у таких структурах.
10. Поясніть чому і як систему «затвор – підзатворний шар SiO₂ – канал 2D електронів» можна розглядати як плоский конденсатор і яку функцію у формуванні такого конденсатора відіграє кожен із названих елементів транзистора.
11. Поясніть що таке заборонена зона надгратки і як вона пов'язана з забороненою зоною вихідних матеріалів у композиційних і легованих надграток.
12. Визначте без урахування розмиття міні зон у легованій надгратці енергетичне положення основної міні зони над дном зони провідності, якщо його діелектрична проникність $\epsilon = 20\epsilon_0$, ефективна маса електронів $m_0 = 0,04m_0$, а рівень легування шарів надгратки донорами $N_d = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
13. Поясніть механізм виникнення щілини Пейєрпса при охолодженні одновимірного кристалу
14. Сформулюйте фізичні причини та механізм виникнення цілочислового квантового ефекту Холла.
15. Рівні Ландау та їх роль у виникненні цілочислового ефекту Холла
16. Поясніть природу енергетичної щілини в спектрі збуджень у режимі дробового квантового ефекту Холла.
17. Розрахуйте максимально можливий опір балістичного контакту, сформованого на 2D структурах, при зміні поперечних розмірів перемички контакту

Рекомендований перелік робіт для самостійної роботи.

Для стимуляції самостійної роботи студентів, заохочення їх до самовдосконалення та знайомства з новітніми явленнями квантово-механічних явищ в структурах напівпровідників і поглибленого знайомств з фізичними процесами передбачено в якості індивідуальних наступні завдання:

- 1 Дайте визначення потенціальної ями, її глибини, вимірності і форми.
2. Обґрунтуйте і проаналізуйте поєднання елементів квантування і неперервності енергетичного спектра електронів в 2D і 1D структурах.
- 3 Опишіть спільні і відмінні риси енергетичного спектру електронів у параболічній і гіперболічній потенціальних ямах.
4. Доведіть, що у будь-якій потенціальній ямі квантово-механічна частинка ніколи не падає на її дно.
5. Поясніть принципову відмінність хвильових функцій квантово-механічних частинок у потенціальних ямах скінченної і нескінченної глибини.
6. Поясніть суть, умови і механізм виникнення магніто-домішкових станів у кристалах.
7. Проілюструйте зв'язок між процесом тунелювання квантово-механічних частинок крізь потенціальний бар'єр і співвідношенням невизначеності Гейзенберга для енергії.
8. Поясніть чому квантово-механічна частинка в принципі не може тунелювати крізь нескінченно високий потенціальний бар'єр.
9. Поясніть що таке резонансно-тунельні структури й охарактеризуйте особливості тунелювання квантово-механічних частинок крізь них.

10. Нарисуйте схематично вольт-амперну характеристику резонансно-тунельної структури за наявності одного квантового рівня в ямі.
11. Чим визначається стан вільного електрона?
12. Яку розмірність має густина станів вільного електрона у системах різної вимірності?
13. Охарактеризуйте закономірності модифікації енергетичної залежності густини станів вільних носіїв заряду у разі зміни вимірності структури у системах з фіксованої вимірності
14. Поясніть специфіку формування повної густини станів систем з вільними 2D електронами з урахуванням великої кількості їхніх двовимірних енергетичних зон.
15. Поясніть що таке густина станів для OD електронів і запишіть її аналітичний вираз.
16. Дайте визначення циклотронної частоти і охарактеризуйте від яких параметрів вона залежить.
17. Охарактеризуйте траєкторії руху електронів у слабких і сильних магнітних полях.
18. Поясніть причини і сформулюйте наслідки впливу сильних магнітних полів на енергетичний спектр вільних електронів.
19. Дайте визначення рівнів Ландау, поясніть як вони розташовуються на шкалі енергій і якими чинниками визначається відстань між ними.
20. Знайдіть для тривимірного кристала відношення між максимальними кількостями електронів, які без урахування вирождення за спіном можуть розміститися на першому і другому рівнях Ландау, якщо третій рівень Ландау залишається вільним.
21. Виконайте порівняльний аналіз впливу симетрії і термодинаміки на існування двовимірних систем з дальнім порядком.
22. Поясніть чому і як спорідненості до електрона і ширини заборонених зон напівпровідників впливають на характер просторових енергетичних діаграм їх гетеро пар.
23. Охарактеризуйте енергетичну діаграму одиничних гетеро структур на прикладі конкретних напівпровідникових гетеро пар.
24. Охарактеризуйте процес формування двовимірного електронного газу на гетеропереході та проаналізуйте можливості підвищення рухливості 2D електронів у таких структурах.
25. Дайте визначення польового транзистора, охарактеризуйте його енергетичну діаграму та її трансформації під впливом потенціалу затвора.
26. Дайте визначення композиційних, легованих, композиційних легованих і політичних надграток.
27. Охарактеризуйте спільні і відмінні риси енергетичної структури та поведінку електронів і дірок у контрваріантних і коваріантних надгратках, причини їх виникнення.
28. Поясніть умови і причини виникнення напівпровідникових і напівметалевих композиційних коваріантних надграток.
29. Поясніть що таке підбар'єрні і надбар'єрні енергетичні міні зони надграток, охарактеризуйте їх спільні та відмінні риси.
30. Поясніть що таке пряма і не пряма в реальному просторі заборонена зона надгратки, за яких умов вона виникає і до яких наслідків приводить.

- 31 Доведіть, що у композиційних коваріантних і легованих надграток технологічно можна реалізувати перехід надрати з напівпровідникового у напівметалевий стан і навпаки і поясніть як це можна зробити.
32. Поясніть роль крайових ефектів у виникненні цілочислового квантового ефекту Холла.
33. Охарактеризуйте чинники, які сприяють появі плато на залежності холлівської провідності від концентрації 2D електронів й індукції магнітного поля та збільшенню плато в режимі цілочислового квантового ефекту Холла.
34. Поясніть яку роль відіграють домішки і дефекти кристалічної 2D структури у виникненні цілочислового квантового ефекту Холла.
35. Поясніть механізм переходу від плато до плато холлівської провідності в режимі цілочислового КЕХ при зміні концентрації 2D електронів у фіксованому магнітному полі.
36. Опишіть можливості застосування цілочислового квантового ефекту Холла для метрологічних потреб.
37. Сформулюйте суть концепції дробового заряду в режимі дробового КЕХ.

Політика та контроль

5. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

В рамках дисципліни заплановано наступні види навчальних занять:

- лекції;
- практичні заняття;
- самостійна робота.

Теми дисципліни взаємозв'язані, матеріал вивчається в логічній послідовності. На заняттях розкриваються найбільш суттєві теоретичні питання, які дозволяють забезпечити здобувачам можливість глибокого самостійного вивчення всього програмного матеріалу. Теми та порядок виконання практичних занять сформовано в логічній послідовності і повністю узгоджуються з лекційним матеріалом. Теоретичні та практичні знання поглиблюються шляхом самостійної роботи з використанням рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів мережі Internet.

На заняттях використовуються персональний комп'ютер, загальнонавчальні комп'ютерні програми і операційні системи, проектор, інтерактивна дошка, інтернет-ресурси.

Контроль засвоєння навчального матеріалу здійснюється індивідуальним опитуванням (тестуванням), модульною контрольною роботою та заліком. Заплановане індивідуальне завдання (реферат).

Система рейтингових (вагових) балів:

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість	Макс. бал	Число балів на відмінно
1.	Лекції:			
	конспектування	13	2	26
	експрес-опитування	13	2	26
2.	Модульна контрольна робота	1	20	24
3.	Індивідуальне завдання	1	30	24
	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

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус)

складено професором кафедри мікроелектроніки, д.т.н. професором Вербицьким В.Г.

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки (протокол № 19 від 15.06.2022)

Погоджено Методичною комісією факультету¹ (протокол № 06/22 від 28.06.2022)

¹ Методичною радою університету – для загальноуніверситетських дисциплін.