



ФІЗИКА ТВЕРДОГО ТІЛА

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	15 Автоматизація та приладобудування ¹
Спеціальність	153 Мікро- та наносистемна техніка
Освітня програма	Мікро- та наноелектроніка
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна (денна)
Рік підготовки, семестр	2 курс, весняний семестр
Обсяг дисципліни	6 кредитів ЕКТС
Семестровий контроль/ контрольні заходи	Іспит / Модульна контрольна робота, ДКР
Розклад занять	
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., доц. Волхова Тетяна Любомирівна, t.volkhova@kpi.ua Практичні: к.т.н., доц. Волхова Тетяна Любомирівна, t.volkhova@kpi.ua , к.т.н., доц. Ільченко Валентин Іванович Лабораторні: к.т.н. Обухова Тетяна Юріївна, t.y.obukhova@gmail.com , к.т.н., доц. Ільченко Валентин Іванович
Розміщення курсу	код класу: ne42pak https://meet.google.com/lookup/gbje3qrcgf

Програма навчальної дисципліни

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

В навчальній дисципліні «Фізика твердого тіла» вивчаються: атомна структура, електричні, магнітні, теплові, механічні (пружні) властивості твердих тіл та вплив зовнішніх природних або штучно створених силових збуджуючих факторів на ці властивості.

Мета навчальної дисципліни - на засадах основних фізичних моделей структури кристалів, зонної теорії, динаміки кристалічної ґратки навчити основам наукового та інженерного підходу до застосування твердотільних матеріалів у сучасних та майбутніх пристроях електроніки, наноелектроніки та у приладобудуванні. Вивчення даної дисципліни забезпечить студентів наступні **компетентності**: будувати теоретичні моделі, що описують електро-фізичні властивості сучасних матеріалів електроніки.

Після засвоєння навчальної дисципліни студенти мають продемонструвати такі результати навчання:

¹ В полях Галузь знань/Спеціальність/Освітня програма:

Для дисциплін професійно-практичної підготовки зазначається інформація відповідно до навчального плану. Для соціально-гуманітарних дисциплін вказується перелік галузей, спеціальностей, або «для всіх».

знання: атомної структури та симетрії твердих тіл та можливі дефекти у них; механізмів електричних, теплових і магнітних процесів у твердих тілах, та їх взаємозв'язок із атомною структурою твердих тіл, тощо.

уміння: визначати фізичні причини виникнення тих чи інших електричних, магнітних, теплових ефектів у твердих тілах, що застосовуються у сучасних електронних приладах, уміння коректного вибору твердотільних матеріалів для ефективного їх застосування в мікро- та наноелектроніці.

досвід: практичної реалізації методів вимірювання та розрахунків електрофізичних параметрів матеріалів електронної техніки.

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

Для успішного вивчення даної дисципліни студенти мають засвоїти наступні дисципліни (**пререквізити дисципліни**):

- бакалаврські курси: «Математичний аналіз», «Загальна фізика», «Квантова механіка».

Результати навчання даної дисципліни використовуються для вивчення наступних дисциплін (**постреквізити дисципліни**):

- бакалаврські курси: «Фізика напівпровідників», «Фізика діелектриків». «Твердотільна електроніка», «Технологічні основи електроніки», «Функціональна електроніка», «Фізико-технологічні основи наноелектроніки», «Фізичні основи сенсорики», «Оптоелектроніка».
- переддипломна практика та дипломне проектування.

3. Зміст навчальної дисципліни

1. Атомна структура кристалів.
2. Динаміка кристалічної ґратки.
3. Енергетичний спектр електронів у кристалі (зонна теорія).
4. Напівпровідники.
5. Діелектрики.
6. Електрична поляризація, втрати та електрична міцність кристалів.
7. П'єзо-, Піро-, Сегнето- електрики.
8. Метали.
9. Магнітні властивості твердих тіл.
10. Оптичні властивості твердих тіл.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література, яку потрібно прочитати або використовувати для опанування дисципліни:

1. Фізичне матеріалознавство: навч. посіб. / Ю.М. Поплавко, Л.П. Переверзева, В.І. Ільченко, О.С. Воронов, Ю.І. Якименко. – К.:НТУУ «КПІ», 2011: Частина 1. Перспективні напрями матеріалознавства – 302 с.; Частина 2. Діелектрики – 392 с.; Частина 3. Провідники і магнетики -372 с.; Частина 4. Напівпровідники – 336 с.
2. Поплавко Ю.М. Структура і симетрія твердих тіл: Навчальний посібник – Київ: Аверс, 2012 – 226с.
3. Поплавко Ю. М. Основи фізики магнітних явищ у кристалах: Навчальний посібник. – Київ: НТУУ «КПІ», 2007. - 216 с.
4. Поплавко Ю. М, Якименко Ю. І. Фізичні механізми п'єзоелектрики. – Київ: Аверс, 1997. – 152 с.
5. Москалюк В.А., Синєкоп Ю.С., Кассинг Р. Фізика електронних процесов, часть І: Учеб. пособ. – Киев, УкрИНТЭИ, 2001.– 148 с.
6. Москалюк В.А. Фізика електронних процесов, часть ІІ: Учеб. пособ. – Киев, Аверс, 2004.– 186 с.

Допоміжна література, яку потрібно прочитати або використовувати для опанування дисципліни:

1. Болеста І.М. Фізика твердого тіла: Навчальний посібник. – Львів: Видавн. Центр ЛНУ ім. І.Франка, 2003. – 480 с.
2. Шалимова К.В. Фізика напівпровідників: Учебник. - М.:«Энергоатомиздат»,1985. – 392 с.
3. Ашкрофт, Н. Фізика твердого тіла (в двох томах) / Н. Ашкрофт, Н.Мермін. – М.: Мир, 1979. – 423 с.
4. Давыдов, А.С. Теория твердого тіла / А.С. Давыдов. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
5. Займан, Дж. Принципы теории твердого тіла/ Дж. Займан. – М.: Мир, 1974. – 478 с.
6. Киттель, Ч. Квантовая теория твердых тел: учебное пособие для вузов / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1979. – 366 с.

Зазначену літературу можна знайти в бібліотеці КПІ ім.І.Сікорського, на сайті кафедри мікроелектроніки (<http://me.kpi.ua/index.php?id=61>) або в інтернеті.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні заняття

Лекція 1. Значення фізики твердого тіла для вивчення властивостей діелектриків, металів та напівпровідників, а також їх застосування у сучасній та майбутній мікроелектроніці.

Лекція 2. Класифікація твердих тіл. Типи хімічного зв'язку у кристалах.

Лекція 3. Основи симетрії кристалічних структур та методи їхнього опису (ґратки Браве, індекси Міллера, пряма й зворотна решітки). Дефекти кристалічної структури.

Лекція 4. Моделі ізольованого атому та пружного континууму. Температура Дебая.

Лекція 5. Хвилі в одномірному ланцюжку та трьохвимірній ґратці. Закони дисперсії акустичних й оптичних коливань.

Лекція 6. Фонони, їхній енергетичний спектр в кубічних кристалах металів, напівпровідники та діелектрики. Теплоємність, теплопровідність та термічне розширення твердих тіл.

Лекція 7. Рівняння Шредінґера, адіабатичне наближення, самоузгоджений потенціал. Спектр електронів у діелектриках, напівпровідники та металах. Зони Бриллюена.

Лекція 8. Електрони та дірки, ефективна маса. Енергетичний спектр електронів в основних напівпровідниках.

Лекція 9. Власні та домішкові напівпровідники (донори, акцептори, глибокі центри), особливості поверхневих станів.

Лекція 10. Рівноважні носії заряду, функції розподілу. Рівень Фермі.

Лекція 11. Нерівноважна функція розподілу, кінетичне рівняння Больцмана. Час релаксації, механізми розсіювання. Рухливість носіїв заряду.

Лекція 12. Нерівноважні носії заряду (розподіл по енергії, генерація та рекомбінація, час життя, дифузія та дрейф). Рівняння неперервності, співвідношення Ейнштейна.

Лекція 13. Природа носіїв заряду (іони та полярони). Суперіонна провідність. Фазове перетворення діелектрик - метал. Позисторна провідність.

Лекція 14. Механізми поляризації та розрахунок діелектричної проникності. Механізми діелектричних втрат та їхня частотна залежність.

Лекція 15. Властивості діелектриків в сильних полях: нелінійність поляризації та провідності, електронний та тепловий пробій. Електричне старіння.

Лекція 16. Особливості симетрії та тензорний характер параметрів активних діелектриків. Фізика п'єзо- та піроэффекту.

Лекція 17. Сегнетоелектричні фазові перетворення й динаміка решітки. Електрети.

Лекція 18. Поверхня Фермі, участь електронів у теплоємності й теплопровідності. Температурний та частотний хід провідності.

Лекція 19. Надпровідність (НП) (куперовські пари, енергетична щільність). Високотемпературна НП.

Лекція 20-21. Природа діа-, пара-, феро- та антиферомагнетизму. Магнітні домени (анізотропія, динаміка, гістерезис). Феримагнетизм та роль феритів в електроніці.

Лекція 22-23. Відбиття, пропускання та поглинання світла металами, діелектриками та напівпровідниками (роль вільних носіїв заряду, край оптичного поглинання).

Лекція 24-25. Фотоелектричні явища в кристалах. Люмінесценція. Магніто- та електрооптичні явища.

Лекція 26-27. Рідинні кристали. Акустооптика і електрооптика. Нелінійна оптика.

Тематика практичних занять

1. Основи симетрії кристалів. Центр та осі симетрії, площини симетрії. Операції симетрії.
2. Механічні (пружні) властивості кристалів. П'єзо- й піроелектричні класи кристалів.
3. Вектори поля, індукції та поляризованості й співвідношення між ними. Вибір граничних умов при визначенні матеріальних констант кристалів.
4. Основні механізми магнетизму. Особливості діа-, пара- та феромагнетизму. Ферити.
5. Зонна теорія. Спектр електронів у діелектриках, напівпровідниках та металах.
6. Зони Бриллюєна. Електрони та дірки, ефективна маса. Енергетичний спектр електронів в основних напівпровідниках.
7. Основні ефекти в напівпровідниках і металах. Оптичні властивості кристалів.
8. Границі застосування зонної теорії. Фазові переходи із стрибком провідності. Надпровідники. Сегнетоелектрики.

Тематика лабораторних робіт

1. Оптичні властивості твердих тіл.
2. Визначення дифузійної довжини компенсаційним методом.
3. Гальваномагнітні ефекти Холла і Гаусса.
4. Тензорезистивний ефект.
5. Вивчення властивостей нелінійних діелектриків.

6. Самостійна робота студента/аспіранта

1. Класи симетрії кристалічних структур, методи дослідження структур кристалів - 10 годин.
2. Теорія надпровідності Бардіна — Купера — Шріффера, Ефект Мейснера - 4 години.
3. Вивчення явища гістерезису у феромагнетиків – 4 години.
4. Ефекти Дембера та фотомагнітний. Фізичні моделі ефектів – 4 години
5. Спонтанна поляризація. Температура Кюрі, закон Кюрі – Вейсса – 4 години.
6. Електропровідність чистих металів та неупорядкованих сплавів – 4 години.
7. Підготовка індивідуального завдання (ДКР) - 20 годин.
8. Підготовка до контрольної роботи – 20 годин.
9. Підготовка до іспиту – 30 годин.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Лекційні, практичні та лабораторні заняття проводяться в системі Google Classroom. Відвідування лекційних занять не є обов'язковим, однак для одержання іспиту “автоматом” потрібно набрати більше 60 балів, які можна одержати за виконання обов'язкових завдань (виконання ДКР, написання модульної контрольної роботи, захист лабораторних робіт) та відвідавши лекційні заняття (пройшовши експрес-тест по матеріалу лекції).

Під час всіх видів занять студенти зобов'язані відімкнути звук та відео, окрім доповідача.

Бали за **роботу під час лекції** нараховуються на основі експрес-опитування у вигляді тесту в системі Google Classroom. Кожний тест містить 2 запитання до матеріалу лекційного заняття, правильна відповідь на які дасть змогу отримати 2 бали.

Модульна контрольна робота проводиться на практичному занятті письмово, після чого робиться скан (або фото) роботи і надсилається в систему Google Classroom.

Лабораторні роботи Виконання лабораторної роботи полягає у тому, що студент практично виконав технічне завдання, зробив необхідні розрахунки і побудував графічні залежності (якщо вони передбачені), оформив протокол (висновки по роботі обов'язкові). Максимальний бал отримує той, хто подав вірні результати з першого пред'явлення протоколу лабораторної роботи. Виконання усіх передбачених на поточний навчальний рік лабораторних робіт обов'язкове. Захист: письмова відповідь на 5 контрольних питань.

В умовах онлайн-навчання виконання лабораторних робіт зводиться до розрахунків величин на основі даних отриманих від викладача (в електронному або відео-форматі), оформлення протоколу, написання висновків. Захист: відповідь на 5 контрольних питань в Google формі.

Індивідуальне завдання (ДКР) – виконується під час самостійної роботи. Тематика завдань відповідає змістовним модулям. Звіт про виконання роботи подається у письмовому (або в електронному) вигляді (скан/фото або файл) і надсилається в систему Google Classroom у визначений термін.

Студенти, які набрали протягом семестру кількість балів ≥ 60 мають можливість не складати іспит, а отримати оцінку “автоматом” відповідно до набраного рейтингу з дисципліни. Студенти, які не набрали 60 балів, або набрали ≥ 60 , однак одержана оцінка не влаштовує, складають іспит без урахування семестрових рейтингових балів.

Умова допуску до іспиту – написання МКР, здача ДКР та виконання усіх запланованих лабораторних робіт.

Іспит є письмовим. Білет на іспиті складається з 3-х завдань (теоретичні питання) по тематиці змістовних модулів, що виносяться на аудиторні заняття, та окремих питань, які виносяться на самостійне опрацювання.

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

Поточний контроль: експрес-опитування (тест) наприкінці кожної лекції.

Календарний контроль: проводиться один раз на семестр як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу (модульна контрольна робота).

Семестровий контроль: екзамен

Умови допуску до семестрового контролю: написання МКР, здача ДКР та виконання усіх запланованих лабораторних робіт.

1. Система рейтингової оцінки по видам занять:

№ п/п	Заняття, що підлягають рейтинговій оцінці	Загальна кількість завдань	Максимальний бал за 1 завдання	Кількість балів на "відмінно"
1.	Лекції: експрес-опитування	27	1	27
2.	Модульна контрольна робота	1	18	18
3.	Індивідуальне завдання (ДКР)	1	20	20
4.	Лабораторні роботи - виконання (протокол) - захист	5	2 5	35
Семестрові бали				100

2. 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

3. Якщо з об'єктивних обставин кількість занять змінюється, семестрові бали, наведені у п.п. 1, відповідним чином корегуються.

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

Перелік додаткових теоретичних питань для модульної контрольної роботи та іспиту, на основі яких формуються білети:

1. Енергія електрона у зонному спектрі напівпровідників. Екстремальні точки. Наближення ефективної маси. Фізичні та геометричні властивості ефективної маси.
2. Динамічні властивості носіїв заряду. Рівняння дрейфового руху, дрейфова швидкість та мобільність у електричному полі.
3. Дифузійний механізм електропереносу. Дифузія і дрейф. Співвідношення Ейнштейна.
4. Власний напівпровідник. Залежність концентрації носіїв заряду та рівня Фермі від температури.
5. Домішкові напівпровідники. Залежність концентрації носіїв заряду та рівня Фермі від температури. Критичні температури. Глибокі домішки.
6. Компенсовані напівпровідники. Ефективна концентрація домішок. Порівняння з власними напівпровідниками.
7. Домішкові зони та концентраційне виродження у напівпровідниках.
8. Електрон – фононна взаємодія. Час фононної релаксації.
9. Іонне розсіювання. Час іонної релаксації.
10. Термоелектричний ефект Зеєбека. Фізична модель. Умова стаціонарної рівноваги процесів. Коефіцієнт термоерс, його залежність від рівня легування та типу домішок. Порівняння термоерс напівпровідників і металів.
11. Термоелектричний ефект Пельтьє. Фізична модель процесів. Термоелектричне охолодження. Термоелектрична якість матеріалів.
12. Рекомбінація. Кількісні характеристики та механізми рекомбінації.
13. Рекомбінація через центри захвату. Природа центрів захвату. Схеми електронних переходів. Залежність часу життя від температури, рівня легування основними домішками.
14. Дифузія, дрейф, генерація, рекомбінація. Дифузійна довжина та час життя.
15. Електрично активне поглинання світла. Квантовий вихід внутрішнього фотоефекту. Стаціонарна та релаксаційна фотопровідність. Спектральна характеристика.
16. Умови порушення нейтральності освітленого напівпровідника. Ефекти Дембера та фотоманітний. Фізичні моделі ефектів.
17. Поглинання світла у напівпровідниках з градієнтом концентрації домішок. Максимальне та граничне значення фотоерс для напівпровідникового матеріалу.
18. Теплові коливання атомів. Фононні спектри. Особливості оптичних коливань іонних твердих тіл.
19. Діелектрична поляризація твердих тіл. Кількісні характеристики. Класифікація механізмів поляризації.
20. Пружні механізми поляризації. Частотна дисперсія діелектричної проникності для пружних механізмів поляризації.
21. Теплова (релаксаційна) поляризація. Частотна дисперсія діелектричної проникності для теплових (релаксаційних) механізмів поляризації.
22. Параелектрики. Спонтанна поляризація. Сегнетоелектрики, піроелектрики, електрети. Фазові переходи. Температура Кюрі, закон Кюрі - Вейсса.
23. Прямий та обернений п'єзоефекти. Електрострикція.
24. Магнітні властивості твердих тіл. Діамагнетизм, парамагнетизм локалізованих електронів. Сильний магнетизм. Феромагнетика, антиферомагнетика, ферити.

25. Енергетичний розподіл електронів у металах. Поверхня Фермі. Електропровідність чистих металів та неупорядкованих сплавах. Надпровідність металів та їх сплавів.
26. Фононний спектр металів. Теплоємність та теплопровідність металів. Закон Відемана-Франца-Лоренца.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доц., к.т.н., доц. Волхова Т.Л.

Ухвалено кафедрою мікроелектроніки (протокол № 13 від 20.01.2021)

Погоджено Методичною комісією факультету² (протокол № __ від _____)

² Методичною радою університету – для загальноуніверситетських дисциплін.