

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«Ужгородський національний університет»
Фізичний факультет
Кафедра фізики напівпровідників

Когутич А.А.



Фізика напівпровідників

Робоча програма та методичні рекомендації
для студентів вищих навчальних закладів
III - IV рівнів акредитації
Спеціальність 104 Фізика та астрономія

Ужгород 2017 рік

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Фізичний факультет
Кафедра фізики напівпровідників

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Декан фізичного факультету
Проф.Лазур В.Ю.

«_____» _____ 2017 року

РОБОЧА ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

с.к. ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ, ч. I і II

(шифр і назва навчальної дисципліни)

напрямок підготовки _____

6.040203 –фізика

(шифр і назва напрямку підготовки)

спеціалізація _____

фізика напівпровідників

(назва спеціалізації)

факультет _____

фізичний

(назва факультету)

Ужгород 2017 рік

Робоча програма з с.к. ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ _____ для студентів
(назва навчальної дисципліни)

за напрямом підготовки 6.040203 – фізика _____,

спеціальності фізика _____

" _____ " _____ 2017 року – _____ с.

Розробник: Когутич А.А., доцент кафедри фізики напівпровідників, канд. фіз.-мат. наук,
старший дослідник зі спеціальності 104 Фізика та астрономія
(вказати авторів, їхні посади, наукові ступені та вчені звання)

Робоча програма затверджена на засіданні кафедри _____ фізики напівпровідників
Протокол від «29» червня 2017 року № 9

Завідувач кафедри _____ (Височанський Ю.М.)
фізики напівпровідників _____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

Схвалено методичною комісією фізичного факультету ДВНЗ "УжНУ"

Протокол від "29" червня 2017 року № 11

Голова _____ (Карбованець М.І.)
_____ (підпис) _____ (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	5
2 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....	7
3. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ТА ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОЇ ПРОГРАМИ.....	8
4. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ.....	14
5. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РЕЙТИНГОВОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ 3 КУРСУ «ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ»..	16
6. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ НА ЕКЗАМЕНІЗ КУРСУ «ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ».....	17
7. БАЗОВА ТА ДОДАТКОВА НАВЧАЛЬНА ЛІТЕРАТУРА.....	19
8. ДОДАТКИ.....	20

1. ОПИС НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

1 семестра

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів – 6	Галузь знань <u>0402 – Фізико-математичні науки</u> (шифр і назва)	Нормативна	
	Напрямок підготовки <u>6.040203 – фізика</u> (шифр і назва)		
Модулів – 2	Спеціальність: <u>7.04020301, 8.04020301 –</u> <u>фізика</u>	Рік підготовки	
Змістовних модулів – 2		3-й	-
Індивідуальне науково-дослідне завдання (назва)		Семестр	
Загальна кількість годин – 180		6-й	
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних - 4 самостійної роботи студента – 7,25	Освітньо-кваліфікаційний рівень: <u>бакалавр</u>	Лекції	
		32 год.	- год.
		Практичні, семінарські	
		- год.	- год.
		Лабораторні	
		32 год.	- год.
		Самостійна робота	
		116	- год.
Індивідуальні завдання:			
- год.			
Вид контролю: залік			

Примітка.

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної і індивідуальної роботи становить:

для денної форми навчання – 64/116

для заочної форми навчання – відсутня

2 семестра

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни	
		денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів – 5	Галузь знань <u>0402 – Фізико-математичні науки</u> (шифр і назва)	Нормативна	
	Напрямок підготовки <u>6.040203 – фізика</u> (шифр і назва)		
Модулів – 2	Спеціальність: <u>7.04020301, 8.04020301 –</u> <u>фізика</u>	Рік підготовки	
Змістовних модулів – 2		4-й	-
Індивідуальне науково-дослідне завдання (назва)		Семестр	
Загальна кількість годин – 150		7-й	
Тижневих годин для денної форми навчання: аудиторних - 6 самостійної роботи студента – 3	Освітньо-кваліфікаційний рівень: <u>бакалавр</u>	Лекції	
		44 год.	- год.
		Практичні, семінарські	
		- год.	- год.
		Лабораторні	
		22 год.	- год.
		Самостійна робота	
		48	- год.
Індивідуальні завдання: - год.			
Вид контролю: іспит, залік			

Примітка.

Співвідношення кількості годин аудиторних занять до самостійної і індивідуальної роботи становить:

для денної форми навчання – 66/48

для заочної форми навчання – відсутня

2 МЕТА ТА ЗАВДАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.

Мета дисципліни. Ознайомити студентів із класом речовин, що належать до напівпровідників, зонною енергетичною структурою, кінетичними, оптичними, фотоелектричними та дифузійними явищами, контактними та люмінесцентними властивостями напівпровідників, їх практичним використанням у твердотільній електроніці.

Завдання курсу «Фізика напівпровідників» є оволодіння елементами зонної енергетичної структури напівпровідників, їх теплові, електричні, гальваномагнітні, термомагнітні, термоелектричні, оптичні, фотоелектричні, люмінесцентні та контактні властивості, області практичного використання цих властивостей у твердотільній електроніці;

Сформулювати вміння самостійно вибрати методику дослідження та визначення параметрів напівпровідників, проводити експериментальні дослідження їх властивостей та обробляти одержані результати вимірювань, дати задовільну інтерпретацію механізмів фізичних явищ і процесів у напівпровідниках та в дискретних напівпровідникових приладах.

У результаті вивчення цієї дисципліни студент повинен

Знати: кристалічну будову та енергетичну структуру електронів у напівпровідниках, основи зонної теорії, опис кінетичних явищ та контактних властивостей напівпровідників та гетероструктур. Вплив зовнішніх факторів, а саме: температури, електричного і магнітного полів, освітлення, на властивості напівпровідників

Вміти: Оцінювати тип твердого тіла за шириною забороненої зони, знати способи визначення термічної та оптичної ширини забороненої зони в напівпровідниках, пояснити різні температурні залежності рухливості носіїв заряду, розраховувати концентрацію, рухливість та тип носіїв заряду за результатами вимірів електропровідності та ефекту Хола, прогнозувати термічні ефекти з врахуванням явища Пельтьє.

Уявляти основні напрямки розвитку фізики напівпровідників та застосовності напівпровідникових матеріалів.

Вивчення курсу «Фізика напівпровідників» базується на знаннях, отриманих у курсах квантова механіка, статистична фізика, фізика твердого тіла, загальна фізика. Враховується, що детальне дослідження предметного середовища, яке вивчається у курсі «Фізика напівпровідників» може бути продовжено й поглиблено у різних спецкурсах, що читаються на окремих кафедрах, а також у процесі виконання курсових, науково-дослідних та кваліфікаційних робіт студентів.

3. ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ТА ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОЇ ПРОГРАМИ

Частина I (3-й рік навчання, 6 семестр)

Модуль I

Змістовний модуль 1

1. Вступ. Предмет і завдання курсу. Характерні властивості напівпровідників. Речовини, що відносяться до класу напівпровідників. Основні етапи історії розвитку фізики напівпровідників. Перспективи розвитку фізики напівпровідників.

2. Геометрія кристалічних решіток (граток). Трансляційна симетрія, основні вектори, елементарна комірка. Прості і складні гратки. Сингонії граток. Обернена гратка та її основні геометричні властивості. Зона Бріллюена для напівпровідників Ge, Si, $A^{III}B^V$. Індеси Міллера. Елементи симетрії кристалів. Застосування симетрії кристалів для зменшення числа незалежних компонент тензорів фізичних величин. Класифікація твердих тіл за щільністю пакування структурних одиниць у кристалічній гратці: метали, напівметали, напівпровідники та діелектрики.

3. Коливання атомів кристалічної гратки. Динаміка простої одномірної гратки. Закон дисперсії. Одновимірна зона Бріллюена. Умова циклічності Борна-Кармана. Густина коливних станів для 3Д, 2Д, 1Д-кристалів. Динаміка складної одномірної гратки. Акустичні та оптичні вітки коливань. Коливання тривимірних граток. Нормальні координати. Квантування енергії коливань. Фонони. Статистика фононів. Теплоємність і теплопровідність твердих тіл.

4. Електрони в ідеальному кристалі. Постановка задачі. Рівняння Шредінгера для кристалу. Адіабатичне наближення. Одноелектронне наближення Хартрі-Фока. Теорема Блоха. Квазіімпульс. К-нове квантове число, зв'язане з трансляційною симетрією. Періодичність $E(k)$. Зона Бріллюена. Зонна структура твердих тіл.: наближення майже вільних та сильно зв'язаних електронів. Властивості електрона, що рухається в періодичному полі. Закон дисперсії носіїв заряду. Швидкість та прискорення електрона. Тензор ефективної маси. Позитивні дірки у майже заповненій валентній зоні. Густина електронних станів. Ефективна маса густини станів. Структура енергетичних зон деяких конкретних напівпровідників. Особливості енергетичної структури електронів для металів, напівметалів, напівпровідників і діелектриків.

5. Домішки та дефекти в кристалах. Типи дефектів гратки. Домішки заміщення та проникнення. Атоми в міжвузлях та вакансії. Дислокації. Донори та акцептори. Локалізовані стани електрона в неідеальній гратці. Метод ефективної маси. Енергетичні рівні домішок. Екситони. Електрон-фононна взаємодія. Полярони. Локалізовані стани в аморфних напівпровідниках.

Модуль 2

Змістовний модуль 2

6. Статистика рівноважних носіїв заряду. Розподіл електронів і дірок по енергетичних рівнях. Статистика Фермі-Дірака та Максвелла-Больцмана. Концентрація електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні: загальний випадок, невироджений напівпровідник, сильно вироджений напівпровідник. Заповнення домішкових рівнів. Компенсація. Закон діючих мас. Рівняння електронейтральності. Залежність рівня хімпотенціалу від концентрації домішок та температури.

7. Кінетичне рівняння Больцмана. Механізми розсіювання Кінетичне рівняння Больцмана. Наближення часу релаксації та скалярної ефективної маси. Типи центрів розсіювання. Ефективний переріз розсіювання. Час релаксації. Розсіювання на нейтральних та іонізованих домішках. Розсіювання на дислокаціях. Розсіювання на акустичних та оптичних фонах. Міжелектронне розсіювання. Розв'язок кінетичного рівняння Больцмана для невиродженого напівпровідника в наближенні часу релаксації.

8. Електропровідність напівпровідників. Електропровідність напівпровідників: власна, домішкова, у виродженому стані. Механізми електропровідності та її температурна залежність. Провідність полікристалічних та аморфних напівпровідників.

Частина II.

Модуль 3

Змістовний модуль 3

9. Кінетичні явища в напівпровідниках. Гальваномагнітні явища. Рух електрона в магнітному полі. Класично слабкі і сильні магнітні поля. Ефект Холла: домішкова провідність, власна провідність (сильні та слабкі магнітні поля), Холл-фактор. Холлівська рухливість. Ефект Гаусса (магнітоопір). Залежність коефіцієнта магнітоопору від механізму розсіювання та індукції магнітного поля. Ефекти Нернста та Еттінгсгаузена.

10. Термоелектричні явища в напівпровідниках. Термоелектрорушійна сила (ефект Зеєбека). Явища Пельтьє та Томсона. Термоелектрична добротність матеріалу. Термоелектричні генератори і холодильники.

11. Термомагнітні явища. Поперечний та поздовжній ефекти Нернста-Еттінгсгаузена. Ефекти Ригі-Ледюка та Маджі-Ригі-Ледюка.

12. Напівпровідники в сильних електричних і магнітних полях. Напівпровідники в сильних електричних полях. Польове розігрівання електронного газу. Механізми впливу електричного поля на рухливість. Вплив сильного електричного поля на концентрацію вільних носіїв

заряду: ефект Пуля-Френкеля, ефект Зіннера, ударна іонізація. Міждолинне розсіювання в сильних електричних полях. Ефект Ганна. Генератори Ганна. N I S-вольтамперні характеристики. Поняття про від'ємний електроопір. Підсилення. Генерація.

11. Напівпровідники в сильних магнітних полях. Квантування орбіт і енергії в сильних магнітних полях. Рівні Ландау. Магніто-осциляційні ефекти. Циклотронний діаманітний резонанс та його використання для дослідження зонної структури.

12. Явища, обумовлені дією світла на напівпровідник. Оптичні властивості. Взаємодія електромагнітного поля із провідним середовищем. Оптичні постійні. Власне поглинання при прямих і непрямих переходах. Вплив температури, тиску та концентрації носіїв заряду на границю власного поглинання. Екситонне поглинання. Домішкове поглинання. Поглинання ґраткою. Поглинання вільними носіями.

Фотопровідність в напівпровідниках. Монополярна та біполярна фотопровідність. Кінетика фотопровідності. Механізми рекомбінації. Лінійна та квадратична рекомбінація. Час життя нерівноважних носіїв заряду та час релаксації фотопровідності. Індукована фотопровідність. Фотовольтаїчні явища в напівпровідниках.

Дифузія нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках. Дифузійний та дрейфовий струми. Співвідношення Ейнштейна. Рівняння неперервності. Рівняння Пуассона. Дифузія та дрейф у випадку монополярної провідності. Дифузія і дрейф неосновних носіїв заряду. Дифузія і дрейф надлишкових носіїв заряду у напівпровідниках з біполярною провідністю.

Модуль 4

Змістовний модуль 4.

12. Поверхневі властивості напівпровідників. Поверхневі рівні. Область просторового заряду. Поверхнева провідність. Ефект поля. Вплив адсорбції на поверхневі властивості. Квантові ефекти у вузьких поверхневих каналах та двомірних структурах. Квантовий ефект Холла.

13. Контактні явища в напівпровідниках Термоелектронна робота виходу. Термоелектронна емісія і контактна різниця потенціалів. Контакт метал-напівпровідник, розподіл густини заряду, напруженості і потенціалу електричного поля. Діодна та дифузійна теорії випрямлення. Вплив поверхневих станів. Процеси в р-п-переході. Розподіл неосновних носіїв заряду. Товщина області просторового заряду. Бар'єрна ємність. Теорія випрямлення на р-п-переході. Гетеропереходи. Варізонні напівпровідники. Явища інжекції, екстракції, акумуляції та ексклюзії.

14. Люмінесценція напівпровідників. Види люмінесценції. Мономолекулярна та рекомбінаційна люмінесценція. Релаксація люмінесценції. Температурне гасіння люмінесценції. Електролюмінесценція. Світлодіоди. Спонтанне та індуковане випромінювання. Інверсне заповнення енергетичних рівнів та способи його одержання. Напівпровідникові лазери.

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Частина I. 3 курс. 6-й семестр.

- ЛР-1. Методи визначення питомої електропровідності напівпровідників.
- ЛР-2. Дослідження температурної залежності електропровідності напівпровідників та оцінка енергії активації домішкових рівнів і ширини забороненої зони.
- ЛР-3. Дослідження температурної залежності питомої теплоємності напівпровідника-сегнетоелектрика в області фазового переходу.
- ЛР-4. Дослідження впливу сильного електричного поля на електропровідність напівпровідників та з'ясування можливих механізмів цього впливу.
- ЛР-5. Дослідження залежності коефіцієнта магнітоопору від індукції магнітного поля та температури.

Частина II. 4 курс. 7-й семестр.

- ЛР-6. Дослідження температурної залежності сталої Холла та питомої електропровідності в широкому інтервалі температур і визначення концентрації та рухливості основних носіїв заряду.
- ЛР-7. Вивчення термоелектричних явищ у напівпровідниках.
- ЛР-8. Дослідження ефекту поля та ознайомлення з методикою визначення концентрації та характеру енергетичного розподілу поверхневих електронних станів.
- ЛР-9. Дослідження процесів у контакті метал-напівпровідник: визначення контактної різниці потенціалів, термоелектронної роботи виходу, концентрації вільних носіїв на поверхні та в об'ємі, електронної спорідненості.
- ЛР-10. Визначення висоти потенціального бар'єру на контакті метал-напівпровідник методом мостика змінного струму.
- ЛР-11. Дослідження процесів у р-п - переході.
- ЛР-12. Дослідження впливу адсорбції на параметри біполярного транзистора.
- ЛР-13. Визначення бар'єрної ємності р-п переходу. Визначення висоти потенціального бар'єру та оцінка товщини області просторового заряду.
- ЛР-14. Дослідження впливу адсорбції на контактну різницю потенціалів методом вібруючого конденсатора.
- ЛР-15. Визначення часу релаксації фотопровідності методом одиночних прямокутних імпульсів світла.

Структура навчальної дисципліни

Опис структурованого навчального плану з дисципліни "Фізика напівпровідників" для студентів фізичного факультету спеціальності "Фізика"

Структура навчальної дисципліни	Кількість годин, із них				Рік навчання, семестр	Вид контролю
	Всього годин/кредити	Аудиторних		СРС		
		Л	ЛЗ			
Частина I						
Модуль 1	180/6	32	32	116	3 н.р.,	Підсумковий контроль (письмові завдання), усне опитування, спів-бесіда, рівень на-вичок виконання лабораторних робіт
Змістових модулів 2						
1. Динаміка ґратки. Електрон у періодичному полі кристалів.	82	16	12	55	6 семестр	
Підсумковий контроль 1.	1		1			
2. Статистика електронів у напівпровідниках. Кінетичне рівняння Больцмана.	94	16	18	61		
Підсумковий контроль 2	1		1			
Частина II						
Модуль 2.	150/5	58	44	48	4 н.р.,	Підсумковий контроль (письмові завдання), усне опитування, спів-бесіда, рівень на-вичок виконання лабораторних робіт
Змістових модулів 2						
3. Вплив зовнішніх факторів (температури, електричного і магнітного полів, освітлення) на властивості напівпровідників.	80	30	22	25	7 семестр	
Підсумковий контроль 3	1		1			
4. Явища та процеси в контактах напівпровідник-напівпровідник та гетероструктурах.	68	28	22	23		
Підсумковий контроль 4	1		1			
Всього годин по курсу	330	90	76	164		

Примітка: Л – лекції, ЛЗ – практичні заняття, СРС – самостійна робота студента,

Тематичний план лекцій

№ п/п	Тема	Кількість годин
Семестр 6. Частина I. Модуль 1.		
Змістовий модуль 1. Симетрія ґратки. Динаміка кристалічної ґратки. Електрон у періодичному полі кристалів.		
1.	Вступ. Кристалічна будова твердих тіл.	2
2.	Динаміка простої і складної одномірних ґраток.	2
3.	Коливання тривимірних ґраток. Фонони	2
4.	Теплоємність і теплопровідність твердих тіл.	2
5.	Електрон в ідеальному кристалі	2
6.	Зонна енергетична структура кристалів.	2
7.	Енергетична структура металів, напівметалів, напівпровідників і діелектриків	2
8.	Домішки та дефекти в кристалах	2
Змістовий модуль 2. Статистика електронів у напівпровідниках. Модуль 2. Кінетичне рівняння Больцмана		
9.	Статистика електронів у напівпровідниках.	2
10.	Залежність рівня хімпотенціалу від концентрації домішок і температури.	2
11.	Кінетичне рівняння Больцмана	2
12.	Механізми розсіювання вільних носіїв заряду.	2
13.	Розв'язок кінетичного рівняння для невідродженого напівпровідника	2
14.	Електропровідність напівпровідників	2
15.	Механізми електропровідності в напівпровідниках.	2
16.	Електропровідність аморфних матеріалів та скло	2
Семестр 7. Частина II. Модуль 3.		
Змістовий модуль 3. Вплив зовнішніх факторів на властивості напівпровідників		
17.	Гальваномагнітні явища. Ефект Холла.	2
18.	Ефекти Гаусса, Нернста, Етінгсгаузена.	2
19.	Термоелектричні явища в напівпровідниках.	2
20.	Термомагнітні явища в напівпровідниках	2
21.	Напівпровідник в сильних електричних полях	2
22.	Міждолинне розсіювання. Генератори Ганна.	2
23.	Напівпровідники в сильних магнітних полях. Рівні Ландау.	2
24.	Магнітоосциляційні ефекти. Резонанси.	2
25.	Взаємодія світла із провідним середовищем.	2
26.	Механізм поглинання світла в напівпровідниках.	2
27.	Фотопровідність в напівпровідниках. Механізми рекомбінації.	2
28.	Фотовольтаїчні явища в напівпровідниках.	2

Змістовий модуль 4 . Явища та процеси в контактах напівпровідник-напівпровідник та гетероструктурах.

29	Дифузійний та дрейфовий струми. Рівняння неперервності.	2
30	Поверхневі властивості напівпровідників	2
31	Вплив адсорбції на властивості напівпровідників	2
32	Квантові ефекти у вузьких поверхневих каналах та двомірних структурах.	2
33	Контакт метал-напівпровідник. Діодна теорія випрямлення.	2
34	Процеси в р-п-переході.	2
35	Вольт-амперна характеристика р-п-переходу.	2
36	Гетеропереходи. Варізонні напівпровідники.	2
37	Явища інжекції, екстракції, акумуляції та ексклюзії.	2
38	Люмінесценція напівпровідників.	2
	Всього аудиторних годин	76

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ

Студенти повинні самостійно опрацювати наступні питання програми:

1. Структура енергетичних зон електронів деяких конкретних напівпровідників (Ge, Si, GaAs, InSb, PbS).
2. N- і S- подібні вольтамперні характеристики. Поняття про від'ємний електроопір. Підсилення. Генерація.
3. Магнітофононний резонанс.

4. МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

Протягом вивчення дисципліни студент зобов'язаний:

- систематично відвідувати заняття;
- вести конспекти лекційних;
- виконувати вимоги до підготовки, виконання і оформлення завдань

лабораторного практикуму.

Поточний контроль проводиться у формі короткого опитування студентів перед лекцією, усних відповідей під час обговорення суті і методики проведення експерименту при допуску до виконання завдань лабораторної роботи, написання підсумкових контрольних робіт за змістовним модулем у терміни, передбачені графіком навчального процесу по курсу. Підсумковий контроль проводиться у формі екзамену з курсу.

**РОЗПОДІЛ БАЛІВ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬ СТУДЕНТИ
З КУРСУ «ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ» ЧАСТИНА І.**

№ тижня	Залікові модулі	Змістовні модулі	Теми курсу	Кількість балів
8	Модуль 1	Змістовний модуль1	Вступ. Кристалічна будова твердих тіл. Динаміка простої і складної одномірних ґраток. Коливання тривимірних ґраток. Фонони. Теплоємність і теплопровідність твердих тіл. Електрон в ідеальному кристалі. Зонна енергетична структура кристалів. Енергетична структура металів, напівметалів, напівпровідників і діелектриків. Домішки та дефекти в кристалах	30
1-9			Лабораторні роботи	20
17	Модуль 2	Змістовний модуль2	Залежність рівня хімпотенціалу від концентрації домішок і температури. Кінетичне рівняння Больцмана. Механізми розсіювання вільних носіїв заряду. Розв'язок кінетичного рівняння для невиродженого напівпровідника. Електропровідність напівпровідників. Механізми електропровідності в напівпровідниках.	30
10-17			Лабораторні роботи	20

**РОЗПОДІЛ БАЛІВ, ЯКІ ОТРИМУЮТЬ СТУДЕНТИ
З КУРСУ «ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ» ЧАСТИНА ІІ.**

№ тижня	Залікові модулі	Змістовні модулі	Теми курсу	Кількість балів
8	Модуль 3	Змістовний модуль3	Гальваномагнітні явища. Ефект Холла Ефекти Гаусса, Нернста, Етінгсгаузена. Термоелектричні явища в напівпровідниках. Термомагнітні явища в напівпровідниках Напівпровідник в сильних електричних полях Міждолинне розсіювання. Генератори Ганна. Напівпровідники в сильних магнітних полях. Рівні Ландау. Магнітоосциляційні ефекти. Резонанси. Взаємодія світла із провідним середовищем. Механізм поглинання світла в напівпровідниках. Фотопровідність в напівпровідниках. Механізми рекомбінації. Фотовольтаїчні явища в напівпровідниках. Дифузійний та дрейфовий струми. Рівняння неперервності. Дифузія і дрейф нерівноважних основних і неосновних носіїв заряду. Дифузія і дрейф при біполярній провідності.	30
1-9			Лабораторні роботи	20

17	Модуль 4	Змістовний модуль4	Поверхневі властивості напівпровідників. Вплив адсорбції на властивості напівпровідників. Квантові ефекти у вузьких поверхневих каналах та двомірних структурах. Контакт метал-напівпровідник. Діодна теорія випрямлення. Процеси в р-п-переході. Вольт-амперна характеристика р-п-переходу. Гетеропереходи. Варізонні напівпровідники. Явища інжекції, екстракції, акумуляції та ексклюзії. Люмінесценція напівпровідників. Електролюмінесценція. Світлодіоди. Умови виникнення генерації та підсилення в квантових генераторах Напівпровідникові лазери	30
10-17			Лабораторні роботи	20

5. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РЕЙТИНГОВОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ 3 КУРСУ «ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ»

1. Рейтинг - це комплексний показник успішності студента, рівня його обізнаності в предметі, що вивчається. Цей показник характеризує якість знань, систематичність в роботі студента, його творчість, активність і самостійність.

2. Максимальна сума балів за всі види робіт (лабораторні, контрольні, самостійне вивчення, підсумковий екзамен) з даного курсу становить 100 бали

За роботу на протязі семестру в залежності від виду рубіжного контролю виставляється така максимальна кількість балів:

Модуль 1.

- Енергетична структура та основні властивості напівпровідників – 30 балів
- Лабораторні роботи – 20 балів

Модуль 2.

- Нерівноважні процеси в напівпровідниках. – 30 балів
- Лабораторні роботи – 20 балів

3. Окремо встановлюється рейтинг за виконання лабораторних робіт. За кожен виконану і захищену лабораторну роботу виставляється максимально 5 балів. При цьому враховується результати допуску до виконання завдань (1 бали), якість одержаних результатів та оформлення роботи (2 бали), розуміння суті досліджуваних явищ, вміння користуватись фізичними приладами – захист роботи (2 бали).

4. Викладачі можуть встановлювати заохочувальні бали за активну участь в обговоренні теоретичного матеріалу, творче виконання завдань, за додаткову індивідуальну роботу, яка сприяє поглибленому вивченню курсу

(підготовка рефератів, участь в студентських олімпіадах, наукових конференціях, конкурсах наукових робіт, активна робота в наукових гуртках, публікація статей), однак загальна сума балів курсу не може перевищувати максимальну суму балів, визначену в п. 2.

5. Таким чином, рейтинг - це сума набраних студентом балів в першому семестрі 4-го курсу за різнобічну діяльність в опануванні курсом "Мікропроцесорна техніка", яка виступає чисельним показником якості його роботи в порівнянні з максимально можливою кількістю балів та результатами однокурсників.

6. Для переводу кількості набраних балів в оцінку ECTS (Європейська система трансферу кредитів) використовують наступну систему:

Сума балів за всі види навчальної діяльності	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	
		Для екзамену, курсового проекту (роботи), практики	Для заліку
90-100	A	відмінно	зараховано
82-89	B	добре	
74-81	C		
64-73	D	задовільно	
60-63	E		
35-59	FX	незадовільно з можливістю повторного складання	не зараховано з можливістю повторного складання
0-34	F	незадовільно з обов'язковим повторним вивченням дисципліни	не зараховано з обов'язковим повторним вивченням дисципліни

6. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ НА ЕКЗАМЕНІ З КУРСУ «ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ».

Оцінки «відмінно» (A) заслуговує студент, який виявив всебічне і глибоке знання програмового матеріалу, вміння вільно виконувати завдання, передбачені програмою, засвоїв основну і ознайомився з додатковою літературою, розуміє взаємозв'язок головних понять дисципліни та їх значення для майбутньої професії.

Оцінки «добре» (B) заслуговує студент, що виявив повне знання програмового матеріалу, успішно виконує передбачені програмою завдання,

засвоїв основну літературу, рекомендовану програмою, виявив систематичний характер знань з дисципліни і здатний до їх самостійного поповнення, але під час відповіді допустив незначні неточності.

Оцінки «добре» (С) заслуговує студент, що виявив повне знання програмового матеріалу, успішно виконує передбачені програмою завдання, засвоїв основну літературу, рекомендовану програмою, виявив систематичний характер знань з дисципліни і здатний до їх самостійного поповнення, але під час відповіді допустив неточності і помилки.

Оцінки «задовільно» (D) заслуговує студент, що виявив знання основного програмового матеріалу в обсязі, необхідному для подальшого навчання та майбутньої роботи за професією, вміє виконувати завдання, передбачені програмою, знайомий з основною рекомендованою літературою. Як правило, оцінка «задовільно» виставляється студентам, що допустили помилки у відповіді на екзамені та при виконанні екзаменаційних завдань, але які володіють необхідними знаннями для їх усунення.

Оцінки «задовільно» (E) заслуговує студент, що виявив знання основного програмового матеріалу в обсязі, необхідному для подальшого навчання та майбутньої роботи за професією, вміє виконувати завдання, передбачені програмою, знайомий з основною рекомендованою літературою. Як правило, оцінка «достатньо» виставляється студентам, що допустили грубі помилки у відповіді на екзамені та при виконанні екзаменаційних завдань, але які володіють необхідними знаннями для їх усунення за допомогою викладача.

Оцінка «незадовільно» (FX) виставляється студенту, який виявив суттєві прогалини в знаннях основного програмового матеріалу, допустив принципові помилки у виконанні передбачених програмою завдань. Студенти, які не з'явилися на екзамен без поважних причин, вважаються такими, що одержали незадовільну оцінку.

Оцінка «незадовільно» (F) виставляється студенту, не виконав повністю план навчальної дисципліни, виявив суттєві прогалини в знаннях основного програмового матеріалу, допустив принципові помилки у виконанні передбачених програмою завдань, не виявив знання основного програмового матеріалу в обсязі, необхідному для подальшого навчання та майбутньої роботи за професією.

За результатами рейтингового контролю знань студентів, дозволяється виставлення залікової відмітки «*зараховано*» або екзаменаційної оцінки (без складання заліку чи іспиту) із відповідною оцінкою за системою ECTS у випадку набору кількості балів, що відповідає мінімальній оцінці. Студент має право підвищити оцінку за системою ECTS, складаючи залік або екзамен.

7. БАЗОВА ТА ДОДАТКОВА НАВЧАЛЬНА ЛІТЕРАТУРА

Базова

1. Попик Ю.В. Фізика напівпровідників: підруч. для студентів вищих навч. закл. Ужгород : ТОВ “ІВА”, 2014. – 820 с.
2. Фізика напівпровідників: лабораторний практикум (навч. посіб. для студентів вищих навч. закл.) / Т.Ю. Попик, Л.Ю. Хархаліс, Ю.В. Попик – Ужгород: ТОВ “ІВА”, 2015. – 344 с.
3. Савчин В.П., Іжнін І.І., Веков М.М. Напівпровідникова фотоелектроніка.- Львів: Вид-во ЛНУ.-2010.-728 с.
4. Савчин В.П. Електронне перенесення в напівпровідниках та напівпровідникових структурах.- Львів: Вид-во ЛНУ.- 2008.-688 с.
5. Болеста І. Фізика твердого тіла.-Львів: Вид-во ЛНУ.-2003.-480 с.
6. Бонч-Бруєвич В.Л., Калашников С.Г. Фізика напівпровідників.- М.: Наука.- 1990.- 658 с.

Додаткова

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука.- 1978.- 615 с.
2. Киреев П.С. Физика полупроводников.- М.: Высшая школа.- 1975.- 584 с.
3. Фистуль В.И. Введение в физику полупроводников.- Москва: Высшая школа. – 1984.- 352 с.
4. Панков К. Оптические процессы в полупроводниках.- М.: Мир.- 1973.- 456 с.
5. Рембеза С.И. Методы измерения основных параметров полупроводников: Воронеж.- Изд-во Воронеж.ун-та.- 1989.- 221 с.
6. Шефер И.И. Практикум по физике полупроводников. Оренбург.- 1970.- 288 с.
7. Практикум по физике полупроводников и полупроводниковым приборам.- Томск: Изд.Томск.ун-та.-1971.- 165 с.
8. Шалимова К.В. Физика полупроводников. М.: Энергия, 1976.- 416 с.
9. Зеегер К. Физика полупроводников. М.: Мир, 1977.- 615 с.
10. Смит Р. Полупроводники.- М.: Мир.- 1982.- 558 с.
11. Сильбанс Л.С. Физика полупроводников.- М.: Советское радио.- 1967.- 451 с.
12. Пека Г.П., Стріха В.І. Поверхневі та контактні явища у напівпровідниках.- Київ: “Либідь”.- 1992.- 238 с.
13. Киселев В.Ф., Козлов С.Н., Зотеев А.В. Основы физики поверхности твердого тела.- Москва: Изд-во МГУ им.М.В.Ломоносова. 1999.- 284 с.
14. Фізичні основи електронної техніки. За ред. З.Ю.Готри.-Львів: „Бескид”-Б/Т”, -2004.-880 с.

8. ДОДАТКИ

Додаток А

**ПЕРЕЛІК ТЕОРЕТИЧНИХ ПИТАНЬ, ЯКІ ВІНОСЯТЬСЯ НА
ЕКЗАМЕН
З КУРСУ ”ФІЗИКА НАПІВПРОВІДНИКІВ”**

Частина I, Модуль I

Змістовний модуль 1

1. Класифікація твердих тіл по щільності пакування атомів у кристалічній гратці: метали, напівметали, напівпровідники, діелектрики.
2. Характерні властивості напівпровідників. Речовини, що відносяться до класу напівпровідників.
3. Основні етапи історії розвитку фізики напівпровідників. Перспективи розвитку фізики напівпровідників.
4. Геометрія кристалічних ґраток. Трансляційна симетрія, основні вектори. Елементарна комірка. Прості і складні ґратки. Сингонії ґраток.
5. Обернена ґратка та її основні геометричні властивості. Комірки Вігнера-Зейтца. Зона Бріллюена. Індокси Міллера.
6. Коливання струни як суцільного середовища (одномірний випадок).
7. Динаміка простої одномірної ґратки. Закон дисперсії. Одномірна зона Бріллюена. Умова циклічності Борна-Кармана. Густина коливних станів.
8. Динаміка складної одномірної ґратки. Акустичні та оптичні вітки коливань.
9. Коливання тривимірних ґраток. Фонони. Статистика фононів.
10. Теплоємність і теплопровідність твердих тіл. Модель Ейнштейна. Модель Дебая. Електронна теплоємність.
11. Теплопровідність твердих тіл.
12. Електрони в ідеальному кристалі. Постановка задачі. Рівняння Шредінгера для кристалу. Адіабатичне наближення.
13. Одноелектронне наближення Хартрі-Фока. Теорема Блоха. Квазіімпульс. Зона Бріллюена.
14. Зонна структура електронного енергетичного спектру твердих тіл: наближення майже вільних та сильно зв'язаних електронів.
15. Властивості електрона, що рухається в періодичному полі. Закон дисперсії носіїв заряду. Швидкість та прискорення електрона.
16. Тензор ефективної маси. Позитивні дірки у майже заповненій валентній зоні. Структура енергетичних зон деяких конкретних напівпровідників (PbS, Ge, Si, GaAs).
17. Густина електронних станів. Ефективна маса густини станів.

18. Особливості енергетичної структури електронів для металів, напівметалів, напівпровідників і діелектриків.
19. Домішки та дефекти в кристалах. Типи дефектів ґратки. Домішки заміщення та проникнення.
20. Теплові дефекти ґратки. Дислокації. Донори та акцептори.
21. Локалізовані стани електрона в неідеальній ґратці. Метод ефективної маси. Енергетичні рівні домішок.
22. Екситони. Полярони. Локалізовані стани в аморфних напівпровідниках

Змістовний модуль 2

23. Статистика рівноважних носіїв заряду . Розподіл електронів і дірок по енергетичних рівнях. Статистика Фермі-Дірака та Максвелла-Больцмана.
24. Концентрація електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні: загальний випадок.
25. Концентрація електронів у зоні провідності та дірок у валентній зоні для невиродженого і сильно виродженого напівпровідника.
26. Заповнення домішкових рівнів. Компенсація. Закон діючих мас.
27. Рівняння електронейтральності. Залежність рівня хімпотенціалу від природи і концентрації домішок та температури.
28. Кінетичне рівняння Больцмана. Наближення часу релаксації та скалярної ефективної маси.
29. Типи центрів розсіювання. Ефективний переріз розсіювання. Час релаксації.
30. Розсіювання носіїв заряду на нейтральних та іонізованих домішках. Розсіювання на дислокаціях.
31. Розсіювання носіїв заряду на акустичних та оптичних фононах.
32. Розв'язок кінетичного рівняння Больцмана для невиродженого напівпровідника в наближенні часу релаксації.
33. Розрахунок електропровідності напівпровідників. Усереднення по енергії часу релаксації.
34. Електропровідність напівпровідників: власна, домішкова, у виродженому стані. Механізми електропровідності та їх температурна залежність.
35. Провідність полікристалічних та аморфних напівпровідників. Термістори.

Частина П. Модуль П

Змістовний модуль 3

36. Гальваномагнітні явища (загальна характеристика). Рух електрона в магнітному полі. Класично слабі і сильні магнітні поля.
37. Ефект Холла: домішкова провідність, власна провідність (випадки сильних та слабих магнітних полів), Холл-фактор. Холлівська рухливість.

38. Ефект Гаусса (магнітоопір). Залежність коефіцієнта магнітоопору від механізму розсіювання та індукції магнітного поля.
39. Ефекти Нернста та Еттінгсгаузена.
40. Термоелектричні явища в напівпровідниках. Термоелектрорушійна сила (ефект Зеебека). Формула Питсаренко.
41. Явища Пельтьє та Томсона.
42. Термоелектрична добротність матеріалу. Термоелектричні генератори і холодильники.
43. Термомагнітні явища. Поперечний та поздовжній ефекти Нернста-Еттінгсгаузена.
44. Термомагнітні явища. Ефекти Ригі-Ледюка та Маджі-Ригі-Ледюка.
45. Напівпровідники в сильних електричних полях. Польове розігрівання електронного газу. Механізми впливу електричного поля на рухливість.
46. Вплив сильного електричного поля на концентрацію вільних носіїв заряду: ефект Пуля-Френкеля, ефект Зіннера, ударна іонізація.
47. Міждолинне розсіювання в сильних електричних полях. Ефект Ганна. Генератори Ганна.
48. N- і S-вольтамперні характеристики. Поняття про від'ємний електроопір. Підсилення. Генерація.
49. Напівпровідники в сильних магнітних полях. Квантування орбіт і енергії в сильних магнітних полях. Рівні Ландау.
50. Магніто-осциляційні ефекти. Циклотронний резонанс.
51. Взаємодія світла (електромагнітного поля) із провідним середовищем. Оптичні постійні
52. Власне поглинання світла при прямих і непрямих переходах електронів у напівпровідниках.
53. Вплив температури, тиску та концентрації вільних носіїв заряду на край власного поглинання світла. Екситонне поглинання світла.
54. Поглинання світла домішками, ґраткою, вільними носіями.
55. Фотопровідність в напівпровідниках. Монополярна та біполярна фотопровідність.
56. Кінетика фотопровідності. Механізми рекомбінації. Лінійна та квадратична рекомбінація.
57. Час життя нерівноважних носіїв заряду та час релаксації фотопровідності. Індукована фотопровідність.
58. Фотоопори, фотодетектори. Фотовольтаїчні явища в напівпровідниках.
59. Дифузія нерівноважних носіїв заряду в напівпровідниках. Дифузійний та дрейфовий струми. Співвідношення Ейнштейна.
60. Рівняння неперервності. Рівняння Пуассона.
61. Дифузія та дрейф у випадку монополярної провідності.
62. Дифузія і дрейф неосновних носіїв заряду.
63. Дифузія і дрейф надлишкових носіїв заряду у напівпровідниках з біполярною провідністю.

Модуль Ш

Змістовний модуль 4.

64. Природа поверхневих електронних станів. Рівні Тамма. Рівні Шоклі.
65. Приповерхнева область просторового заряду. Поверхнева провідність.
66. Ефект поля та його використання для визначення параметрів поверхневих станів.
67. Вплив адсорбції на поверхневі властивості напівпровідників.
68. Квантові ефекти у вузьких поверхневих каналах та двомірних структурах. Квантовий ефект Холла.
69. Контакт метал-напівпровідник. Термоелектронна робота виходу. Термоелектронна емісія і контактна різниця потенціалів. Утворення омичних, антизапірних і запирних контактів. Діоди Шоткі.
70. Контакт метал-напівпровідник: розподіл густини заряду, напруженості і потенціалу електричного поля.
71. Контакт метал-напівпровідник: діодна теорія випрямлення струму.
72. Контакт метал-напівпровідник: дифузійна теорія випрямлення струму. Вплив поверхневих станів.
73. Процеси в р-п-переході. Розподіл неосновних носіїв заряду. Товщина області просторового заряду. Бар'єрна ємність.
74. Теорія випрямлення на р-п-переході.
75. Гетеропереходи. Варізонні напівпровідники. Сонячні батареї.
76. Явища інжекції, екстракції, акумуляції та ексклюзії.
77. Люмінесценція напівпровідників. Види люмінесценції. Моно-молекулярна та рекомбінаційна люмінесценція.
78. Релаксація люмінесценції. Температурне гасіння люмінесценції.
79. Електролюмінесценція. Світлодіоди.
80. Спонтанне та індуковане випромінювання. Інверсне заповнення енергетичних рівнів та способи його одержання
81. Умови підсилення та генерації в квантових генераторах. Роль резонатора у квантових генераторах світла.
82. Напівпровідникові лазери.

ТИПОВІ ЗАДАЧІ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Зобразіть графічно в кубічній ґратці кристалографічні площини $(2\ 1\ 1)$, $(0\ 0\ 2)$, $(0\ 2\ 0)$, $(0\ 0\ 1)$, $(1\ 1\ 1)$.
2. Визначте відстань d між двома сусідніми площинами $(h\ k\ l)$ в кубічній ґратці, ребро елементарної комірки якої дорівнює a .
3. Побудуйте елементарні комірки оберненої ґратки для простої кубічної, кубічної об'ємцентрованої та кубічної гранецентрованої елементарних комірок прямої ґратки.
4. Користуючись формулою $\omega = \sqrt{4\beta/M} |\sin(qa/2)|$, справедливою для простої одновимірної ґратки, покажіть, що групова швидкість v_g дорівнює $v_0 \cos(qa/2)$, де $v_0 = \sqrt{\beta a^2/M}$.
5. Знайти вираз для числа станів на одиницю довжини частотного інтервалу в задачі про просту одновимірну ґратку. При якій максимальній частоті повинно мати місце обрізання частотного розподілу для того, щоб число ступенів свободи відповідало лінійному ланцюжку атомів?
6. Для одновимірного складного кристала з масами атомів M_1 і M_2 при $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ закон дисперсії визначається формулою $\omega^2 = \beta(1/M_1 + 1/M_2) \pm \beta \left[(1/M_1 + 1/M_2)^2 - 4 \sin^2(qa)/(M_1 M_2) \right]^{1/2}$. Визначити групову v_g і фазову v_f швидкості для оптичної і акустичної гілок коливань. Продемонструйте хід v_g і v_f в межах першої зони Бріллюена.
7. Показати, що теплоємність одновимірної ґратки з однакових атомів (лінійний ланцюжок) в наближенні Дебая в області низьких температур ($T \ll \theta_D$) пропорційна T/θ_D де θ_D ефективна температура Дебая в одно вимірному випадку ($\theta_D = \hbar \omega_{\max}/k$).
8. Показати, що теплоємність простої двовимірної ґратки з однакових атомів (ізотропний випадок) у наближенні Дебая при низьких температурах пропорційна $(T/\theta_D)^2$. Зобразити наближено температурну залежність C_V .
9. Поясніть, чому тільки гармонічне наближення при розкладі в ряд потенціальної енергії дає можливість замінити коливання атомів ґратки на набір мод коливань. Чому в гармонічному наближенні відсутній тепловий опір і лінійне теплове розширення твердих тіл?
10. Обґрунтуйте математично, як наявність ангармонізму ($U(x) = -U_0 + \beta x^2 - \gamma x^3 + \dots$) приводить до появи лінійного теплового розширення твердих тіл.
11. Доведіть, що кількість дискретних значень хвильового вектора в першій зоні Бріллюена дорівнює числу елементарних комірок у кристалі.

12. Побудуйте першу зону Бріллюена для двовимірного випадку, коли площа оберненої ґратки має вісь симетрії шостого порядку.
13. Пояснити відмінність між металом, напівметалом, напівпровідником і діелектриком з точки зору структури їх енергетичних зон та характеру їх заповнення електронами.
14. Знайти відносну частку простору, заповненого сферичними кулями, у таких структурах: проста кубічна ґратка, об'ємоцентрована і гранецентрована кубічна ґратка, ґратка типу алмазу. Нехай чотири сфери торкаються одна одної у вершинах тетраедра. Яка частина простору тетраедра заповнена цими сферами? Чому реально не можна так щільно заповнити простір?
15. Оцініть концентрацію дефектів за Шоттки в об'ємоцентрованій кубічній ґратці зі сталою $a = 3 \cdot 10^{-10}$ м при $T = 300$ К, якщо $E_{sh} = 1.2$ еВ: а) без урахування коливань атомів ґратки; б) при врахуванні фононної поправки в моделі Ейнштейна, якщо частота фононів у періодичній частині кристала $\hbar\omega = 0.05$ еВ, а в околі вакансії $\hbar\omega' = 0.045$ еВ.
16. Визначте концентрацію дефектів за Френкелем у простій кубічній ґратці зі сталою $a = 3 \cdot 10^{-10}$ м при $T = 300$ К і $T = 800$ К, якщо $E_f = 1.2$ еВ: а) без урахування вкладу коливань ґратки; б) із урахуванням фононної поправки в моделі Ейнштейна, якщо енергія фононів у періодичній частині $\hbar\omega = 0.04$ еВ, а в околі вакансії $\hbar\omega' = 0.035$ еВ.
17. Зробіть оцінку можливої кількості дефектів за Френкелем, які виникнуть при бомбардуванні кристала частинкою з енергією 100 кеВ, якщо порогова енергія для утворення дефектів $E_d \approx 25$ еВ.
18. Вирахуйте енергію основного стану і першого збудженого стану атома домішки заміщення V групи періодичної системи в матриці германію, якщо прийняти $\varepsilon = 15.8$ і $m_n^*/m_0 = 1.3$ вздовж напрямку [111], і енергію основного стану домішкового атома III групи періодичної системи ($m_p^*/m_0 = 0.34$).
19. Знайдіть енергію основного стану та першого збудженого стану домішкових атомів заміщення елементів III і V груп періодичної системи в матриці кремнію в напрямку [001], прийнявши $\varepsilon = 11.7$ і $m_n^*/m_0 = 0.97$ і $m_p^*/m_0 = 1.3$. Порівняйте отримані результати з даними, одержаними при розв'язку попередньої задачі.
20. Визначте енергію основного стану екситону та його радіус у кристалі германію, якщо вважати, що $\varepsilon = 15.8$ і $m_n^*/m_0 = 0.32$ і $m_p^*/m_0 = 0.12$.
21. Концентрація електронів у власному напівпровіднику при $T = 400$ К виявилась рівною $1.38 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Визначити величину добутку ефективних мас густини станів електрона і дірки, якщо відомо, що ширина забороненої зони змінюється за законом $\Delta E_g = (0.785 - 4 \cdot 10^{-4}T)$ еВ.
22. Знайти температуру, при якій рівень хімічного потенціалу збігається з рівнем донорної домішки для германію, легованого сурмою (Sb): $N_d =$

$= 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\Delta E_d = E_c - E_d = 0.01 \text{ eV}$, фактори виродження $g_0 = 1$, $g_1 = 2$. Яка концентрація електронів при цій температурі?

23. Дослідити температурний хід рівня хімічного потенціалу E_F та концентрації електронів у напівпровіднику з одним типом одновалентних донорів у домішковій області. Яка концентрація вільних електронів і дірок при $T = 300 \text{ K}$ в германії, легovanому сурмою при $N_d = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.
24. Зразок кремнію p -типу вміщує 10^{18} см^{-3} акцепторів і 10^{17} см^{-3} донорів. Оцініть відносну роль розсіювання на коливаннях ґратки, іонізованих і нейтральних домішках при $T = 10, 20, 100$ і 200 K .
25. Опір зразка германію n -типу при $T = 300 \text{ K}$ дорівнює $50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Використавши значення ефективної маси $m_n^* = 0.56 \cdot m_0$, визначте: а) час релаксації; б) довжину вільного пробігу електронів.