

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Кафедра – Мікро та наноелектроніки

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,  
176 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітня програма – Стала та відновлювана енергетика: електрична та  
мікроелектронна інженерія

Форма навчання – Денна

Навчальна дисципліна – Фізика твердого тіла

Семестр – 1

**ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ТА ЗАВДАНЬ, ВКЛЮЧЕНИХ ДО**  
**ЕКЗАМЕНАЦІЙНИХ БІЛЕТІВ ІЗ ДИСЦИПЛІНИ**

Кількість білетів \_\_\_\_\_

Затверджено на засіданні кафедри  
протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Зав. кафедрою

\_\_\_\_\_ Роман ЗАЙЦЕВ

Екзаменатор

\_\_\_\_\_ Роман ЗАЙЦЕВ

1. Перелічіть типи зав'язків в твердих тілах та вказати, в якому типі твердих тіл вони реалізуються. Нарисувати якісний вигляд потенціальної енергії взаємодії між атомами та назвати причини появи сил відштовхування при зближенні атомів.

2. Причини виникнення сил Ван-дер-Ваальса, утворення кристалів інертних газів.

3. Іонні кристали, енергія Маделунга, метод Евальда-Ев'єна для її розрахунку.

4. Проаналізувати основні відмінності ковалентного і металевого зав'язків.

5. Коливання атомів в решітці, як змінюється їхній характер з температурою. Що таке фонон? Розподіл фононів по енергіях. Сенс температури Дебая.

6. Як виглядає спектр власних частот коливань ланцюжка з однакових атомів? Що таке дисперсія? Які значення може приймати хвилевий вектор фонона?

7. В чому полягають особливості коливань ланцюжка з атомів різних сортів у порівнянні з ланцюжком з атомів одного сорту?

8. Моделі теплоємності решітки.

9. Теплоємність решітки при температурах нижче температури Дебая для різної розмірності.

10. Спектральна щільність фононів, загальна формула для теплоємності.

11. Пояснити явища теплового розширення і теплопровідності решітки за допомогою поняття про фонони.

12. Особливості поведінки валентних електронів в металі. В чому сенс адіабатичного наближення? Функція розподілу і енергетичний спектр електронів. Поняття про поверхню Фермі і Фермі-газу електронів.

13. Вплив кристалічної решітки на рух електронів. Ортогоналізовані плоскі хвилі і ефективний потенціал. Теорема Блоха, блохівська хвилева функція.

14. Зони Бриллюена і їх границі, хвилевий вектор електрона. Об'єм фазового простору на один електрон. В чому полягає і з чим пов'язана різниця між імпульсом і квазіімпульсом?

15. Динаміка електрона в решітці. Поняття ефективної маси. Вид закону дисперсії в навколо точок екстремуму ізоенергетичної поверхні.

16. Поняття електронів і дірок в металі. Фізичний сенс ефективної маси, її залежність від імпульсу, періодичний рух електронів.

17. Закон дисперсії електронів в решітці, поява енергетичних зон. (Не приводить полного вывода, использовать формулы для энергии с

объяснением, как они получены и какой смысл слагаемых, входящих в эти формулы.)

18. Побудова зон Бриллюена. Причини появи складних поверхонь Фермі при заповненні зон електронами.

19. За яким алгоритмом в методі Харисона будують поверхні Фермі? Чим відрізняються електронні і діркові поверхні?

20. Щільність електронних станів, ефективна маса щільності станів.

21. Формула Ліфшица для електропровідності. (Написати формулу, позначення всіх величин, які в неї входять і коротко викласти основні міркування, які використані при її отриманні.) В чому полягає різниця між класичним і квантовим розумінням механізму електропровідності?

22. Привести вид феноменологічної залежності  $\rho(T)$ , нарисувати якісний вид відповідного графіку і пояснити, з чим пов'язані ділянки різної функціональної залежності  $\rho(T)$ .

23. Теплоємність електронного газу і теплопровідність металів. Закон Відемана – Франца.

24. Рух квазічастинок в постійному магнітному полі (квазікласичне наближення, оцінка величини магнітного поля для его межі застосування цього наближення). Траєкторія руху, як пов'язані і чим визначаються траєкторії руху електрона в **p**- і **r**- просторах?

25. Умова циклічності руху електронів в магнітному полі. Що таке циклотронна маса, як вона пов'язана з поверхнею Фермі і з ефективною масою? (Привести приклад для квадратичного ізоτροпного і анізотропного законів дисперсії.) Як розрахувати циклотронну масу, використовуючи траєкторію електронів на поверхні Фермі?

26. Електропровідність в слабких магнітних полях. В чому полягає відмінність підходу до розгляду електропровідності при наявності і відсутності магнітного поля? Формули для повздовжнього і поперечного струмів, як вони пов'язані? Відмінність для нескінченного і обмеженого в поперечному напрямку зразка.

27. Поле Холла, компенсація їм сили Лоренца, вид залежності  $\sigma_x(H)$  і  $\rho_x(H)$ . Як і чому на ці залежності впливає наявність різних груп носіїв одного знаку і різних знаків?

28. Траєкторії електронів в сильних магнітних полях, швидкість і напрямки дрейфу в схрещених електричному і магнітному полях. До яких наслідків приводить такий рух для необмеженого металу при  $l \rightarrow \infty$ ?

29. З чим пов'язана електропровідність реальних металів в схрещених електричному і сильному ( $l \gg r_H$ ) магнітному полях? Як при цьому залежать

від  $H$ ,  $\sigma$  і  $\rho$ ? Зобразити якісний вигляд залежності  $\sigma(H)$  і пояснити фізичні причини такого виду залежності.

30. Квантування енергії електрона в магнітному полі (рівні Ландау, спинове розщеплення для вільних електронів і електронів в твердому тілі). Розподіл електронів в  $\mathbf{p}$ - просторі в квантуючому магнітному полі (як змінюється вид поверхні Фермі).

31. Щільність станів в квантуючому магнітному полі, порівняти з тривимірною щільністю станів. Як поводить себе рівень Фермі і що відбувається з рівнями Ландау при зростанні величини магнітного поля?

32. Двзонний метал в магнітному полі. Від чого залежить напрямок руху зон при зростанні величини магнітного поля? Що відбувається при зменшенні перекриття зон? Причини зменшення концентрації носіїв заряду в магнітному полі.

33. Перелічіть експериментальні методи дослідження енергетичного спектра. В чому полягають гальваноманітні методи дослідження. Основні переваги і недоліки.

34. Циклотронний резонанс Азбеля – Канера. Основна ідея методу, що значить нормальний і аномальний скін ефект?

35. Що значить поняття розмірні ефекти? Основна ідея дослідження енергетичного спектра за допомогою радіочастотного ефекту Гантмахера.

36. Основна ідея дослідження енергетичного спектра за допомогою магнітоакустичного резонансу.

37. Основна ідея дослідження енергетичного спектра за допомогою квантовомеханічного магнітоакустичного резонансу.

38. Основна ідея дослідження енергетичного спектра за допомогою осциляційних квантових ефектів.

39. Як пов'язані діелектричної проникності і діелектричної сприйнятливості? Як пов'язані мікро і макроскопічні характеристик діелектриків? Назвіть можливі механізми поляризації діелектриків.

40. Опишіть механізм пружної електронної поляризації діелектриків. Яка при цьому залежність діелектричної проникності від частоти.

41. Опишіть механізм поляризації іонних кристалів. Яка при цьому залежність діелектричної проникності від частоти.

42. Опишіть механізм дипольної пружної поляризації діелектриків і її температурну залежність.

43. Що таке діелектрична релаксація? Яким рівнянням її описують.

44. Діелектричні втрати при релаксаційних і пружних механізмах поляризації.

45. Чим відрізняються напівпровідники від металів та діелектриків? Зобразити зонну діаграму власного напівпровідника в рівноважному стані з усіма позначеннями і розшифрувати ці позначення. Як зміниться вигляд зонної діаграми в присутності нерівноважних носіїв заряду? 46. Як зв'язані концентрації електронів і дірок в неvirодженому напівпровіднику з їхніми хімічними потенціалами і одна з одною в рівноважному стані? (записати вирази з розшифруванням усіх позначень) Як зв'язані хімічні потенціали електронів і дірок в рівноважному стані? Яке значення при  $T = 0 \text{ K}$  має хімічний потенціал для власного напівпровідника?

47. Зобразити зонну діаграму напівпровідника з домішками з усіма позначеннями і розшифрувати ці позначення. Яка умова використовується для визначання положення хімічного потенціалу? Яке поводить себе хімічний потенціал в легованому напівпровіднику в залежності від температури?

48. Як за виглядом зонної діаграми визначити тип провідності напівпровідника? Що таке вироджений і неvirоджений напівпровідник? Який вигляд має залежність концентрації носіїв заряду від хімічного потенціалу для кожного з цих випадків? Який вид має залежність концентрації носіїв заряду в напівпровіднику від температури і яким умовам відповідає кожна ділянка?

49. Що таке неоднорідний напівпровідник? До яких процесів і яких наслідків приводить неоднорідність? Зобразити зонну діаграму неоднорідного напівпровідника після встановлення рівноваги. Записати систему рівнянь, з якої можна знайти розподіл концентрацій носіїв заряду і електричного потенціалу в неоднорідному напівпровіднику. Дати коментар проте, що це за рівняння і які доданки вони містять. Співвідношення Ейнштейна.

50. Що таке нерівноважні носії заряду і як вони з'являються в напівпровіднику? Написати рівняння, які описують еволюцію нерівноважних носіїв і дати коментар про що те, які доданки вони містять. Як змінюється концентрація нерівноважних носіїв заряду після вимкнення зовнішнього впливу, і який параметр є основною характеристикою нерівноважних носіїв заряду?

51. Фотопровідність, який фізичний ефект її обумовлює? Які види фотопровідності бувають? Які характеристики має оптична генерація нерівноважних носіїв заряду? Як за допомогою дослідження фотопровідності встановити основну характеристику нерівноважних носіїв заряду? Коли вводять і квазірівні Фермі і яке основне припущення дозволяє це зробити? Який вид мають вирази для концентрацій носіїв заряду при введенні квазірівнів Фермі?

52. Дайте визначення інжекції і амбіполярної дифузії. Які умови повинні виконуватися для існування амбіполярної дифузії? Запишіть вирази для

коефіцієнта амбіполярної дифузії і амбіполярної рухливості. Чи справедливе для них співвідношення Ейнштейна? Які носії заряду контролюють рух квазінейтрального пакету?

53. Запишіть рівняння неперервності в амбіполярній формі. Дати коментар про те, які доданки воно містить. Який вид має стаціонарний просторовий розподіл нерівноважних носіїв заряду? Що таке довжини дифузії і дрейфу?

54. Коли виникають термоелектричні ефекти в напівпровідниках? Як це відбивається на рівняннях для струму? Опишіть фізичні причини виникнення кожного з термоелектричних ефектів. Які застосування знаходять ці ефекти?

### Задачі

1. В кристалі, в якому сили взаємодії обумовлені силами Ван-дер-Ваальса, рівноважна відстань між атомами  $r_0 = 1.8 \text{ \AA}$ , а енергія на 15% менша, ніж для випадку, коли враховуються тільки сили притягнення. Чому дорівнює характерна довжина  $\rho$  у виразі для потенціалу?

2. Для потенціалу відштовхування  $V/r^n$ , знайти як зміниться рівноважна відстань  $r_0$  між іонами і енергія решітки, якщо заряд іонів збільшити вдвічі?

3. Рівноважна відстань  $r_0$  між найближчими сусідами в KBr (іонний кристал, структура типу NaCl, постійна Маделунга  $1.747756 \approx 1.75$ ) дорівнює  $3.30 \text{ \AA}$ . Стисливість цієї речовини дорівнює  $\chi = 6.6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Н}$ . Знайти характерну довжину  $\rho$  потенціалу відштовхування і енергію зв'язку.

4. Оцінити температуру Дебая для міді, вважаючи, що швидкості розповсюдження поздовжніх і поперечних хвиль однакові і дорівнюють  $v_s = 5.8 \text{ км/с}$ . Густина міді  $\rho = 8.9 \text{ г/см}^3$ .

5. Оцінити швидкість звуку в кремнії, якщо температура Дебая для кремнію дорівнює  $670^\circ\text{K}$  і мінімальна відстань між атомами в решітці  $a = 1.485 \text{ \AA}$ .

6. Довжина хвилі  $\lambda$  фонона, який відповідає частоті  $\omega = 0.02\omega_{max}$ , дорівнює  $98 \text{ нм}$ . Не беручи до уваги дисперсію звукових хвиль, визначити характеристичну температуру Дебая, якщо середня швидкість звуку в кристалі дорівнює  $4.2 \text{ км/с}$ .

7. Температура Дебая для вольфраму  $385^\circ \text{ K}$ . Визначити постійну квазіпружної сили між атомами (не використовувати макроскопічні пружні характеристики).

8. Розрахувати постійну Маделунга для лінійного ланцюжка рівновіддалених іонів з чергуванням позитивного і негативного зарядів.

9. Розрахувати, як зміниться концентрація електронів у власному напівпровіднику при зміні температури від 200 К до 300 К, якщо ширина забороненої зони напівпровідника  $\varepsilon_g = 0.785$  еВ

10. Концентрація електронів у власному напівпровіднику при температурі 400 К виявилася рівною  $1.38 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Знайти значення добутку ефективних мас електрона і дірки, якщо ширина забороненої зони  $\varepsilon_g = 0.785 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot T$  еВ. Результат представити нормованим на масу вільного електрона.

11. Знайти ширину забороненої зони напівпровідника, якщо відомо, що за даними експериментів вимірювання ефекту Холла концентрація носіїв заряду при температурі 400 К склала  $1.3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , а при температурі 350 К  $6.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,

12. Розрахувати ефективну масу щільності станів для електронів в зоні провідності в германії і кремнії, якщо закон дисперсії в них має вигляд еліпсоїда обертаня при цьому в германії є 4 еквівалентних мінімуми з поперечною і повздовжньою ефективною масою  $m_{\perp} = 0.08152m_0$  і  $m_{\parallel} = 1.588m_0$ , відповідно, а в кремнії є 6 еквівалентних мінімуми з поперечною і повздовжньою ефективною масою  $m_{\perp} = 0.1905m_0$  і  $m_{\parallel} = 0.9163m_0$ .

13. Розрахувати власні концентрації носіїв заряду в Ge при температурі  $T = 300$  К. Ефективну масу щільності станів в валентній зоні  $m_{dp}$  прийняти рівною  $0.362m_0$ . Ширина забороненої зони при температурі  $T = 300$  К в Ge 0.66 еВ.

14. Розрахувати власну концентрацію носіїв заряду в Si при температурі  $T = 300$  К. Ефективну масу щільності станів в валентній зоні  $m_{dp}$  прийняти рівною  $0.595m_0$ . Ширина забороненої зони при температурі  $T = 300$  К в Si 1.1 еВ.

15. Розрахувати питомий опір власних Ge і Si при температурі  $T = 300$  К. Для рухливості електронів і дірок ( $u_n = bu_p$ ) прийняти наступні значення Ge:  $u_n = 3.8 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ,  $b = 2.1$ ; Si:  $u_n = 1.45 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Вс}$ ,  $b = 2.9$ .

16. Розрахувати відносну зміну провідності при стаціонарному освітленні з інтенсивністю  $J = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Коефіцієнт поглинання  $\gamma = 100 \text{ см}^{-1}$  товщина зразка набагато менша за  $\gamma^{-1}$ , рекомбінація на простих дефектах  $n_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ,  $\tau = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ .  $b = 2.1$  - Ge