

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. І. І. МЕЧНИКОВА

Кафедра фізики твердого тіла і твердотільної електроніки

Птащенко О. О.

ЗБІРНИК ЗАДАЧ З ФІЗИЧНИХ ОСНОВ
ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ ТА КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

методичний посібник до курсів лекцій
“Нелінійна оптика і квантова електроніка”,
“Фізичні основи оптоелектроніки” та
“Квантова електроніка і оптоелектроніка”

для студентів 3 – 5 курсів

ОДЕСА – 2004 р.

Електронний варіант методичного посібника видано
згідно з рішенням Ради фізичного факультету

від 2 липня 2004 р., протокол № 9

Укладач: професор Птащенко О. О.

Рецензенти: професор Ваксман Ю. Ф.,
доцент Маслєєва Н. В.

© О. О. Птащенко, 2004

ВСТУП

В даному посібнику наведені типові задачі, що пропонуються для розв'язання студентам на практичних заняттях при вивченні курсу „Нелінійна оптика і квантова електроніка” (студентам 3-го курсу науково-педагогічного відділення), спецкурсів „Фізичні основи оптоелектроніки” і „Квантова електроніка і оптоелектроніка” (студентам 4-го і 5-го курсів спеціалізації „Фізика твердого тіла і твердотільна електроніка”).

Задачі з квантової електроніки охоплюють такі теми:

- фізика взаємодії оптичних фотонів з речовиною;
- фізика резонаторів квантової електроніки;
- будова і принцип дії газових, твердотільних і напівпровідникових лазерів.

Задачі з фізичних основ оптоелектроніки відповідають таким темам:

- механізми оптичного поглинання в напівпровідниках;
- механізми випромінювальної та невипромінювальної рекомбінації в напівпровідниках;
- статистика рекомбінаційних процесів у напівпровідниках;
- фотоелектричні явища в напівпровідниках.

В кінці посібника подаються списки основної та допоміжної літератури.

Теоретичні відомості, необхідні для рішення задач, наводяться у відповідних розділах курсів лекцій.

ЗАДАЧІ З КВАНТОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

ЗАДАЧА 1. Знайти коефіцієнт Ейнштейна B_{12} для поглинання електромагнітних хвиль у речовині, якщо відомий спектр поглинання $\alpha(h\nu)$ при даній концентрації поглинаючих центрів (атомів) N . Врахувати залежність $\alpha(h\nu) = \sigma_{12}(h\nu)N$ де σ_{12} - переріз даного фотопереходу. Знайти функцію форми спектральної лінії $S(\nu)$.

ЗАДАЧА 2. Для ансамблю частинок з двома стаціонарними енергетичними рівнями ймовірність спонтанного переходу з верхнього рівня на нижній дорівнює A_{12} . Нехай у момент часу $t=0$ частинки знаходяться на верхньому рівні. Знайти середній час перебування частинки на верхньому рівні (час життя верхнього стану).

ЗАДАЧА 3. Вивести формулу Планка для спектральної густини енергії рівноважного електромагнітного випромінювання, враховуючи, що фотони підкоряються статистиці Бозе-Ейнштейна.

ЗАДАЧА 4. Відповідно до моделі Томсона, атом водню складається з “краплини” позитивно зарядженої “рідини” та електрона, який рухається в даній “рідині”. Рух електрона в електричному полі електромагнітної хвилі напруженістю $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_0 e^{i\omega t}$, відповідно до моделі Лоренца, можна описати рівнянням $\frac{md^2x}{dt^2} = e\mathcal{E}_x - kx - \frac{m}{\tau} \frac{dx}{dt}$, де другий член справа описує силу кулонівської взаємодії електрона з “краплиною”, а третій враховує “тертя” – втрати енергії в атомі.

Знайти (з точністю до постійного множника) спектр поглинання атома, тобто частотну залежність відношення енергії, яка поглинається атомом, до

густини енергії електромагнітної хвилі. Вважати, що $\omega_0 \tau \gg 1$, де ω_0 - власна частота коливань атома. Знайти функцію форми спектральної лінії атома.

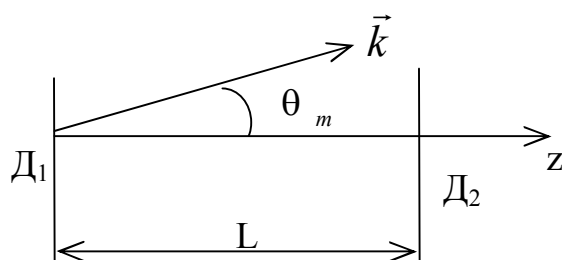
ЗАДАЧА 5. Частота випромінювання в лінії R_1 рубіна, який використовується в лазерах, $\nu_0 = 4,3 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 693$ нм). При кімнатній температурі ширина лінії, що має лоренцову форму, складає $\Delta\nu = 1,12 \cdot 10^{11}$ Гц. Час релаксації люмінесценції (спонтанного випромінювання) для цієї лінії дорівнює $\tau = 4$ мс. Показник заломлення рубіну $n = 1,76$.

- Знайти: а) переріз стимульованого переходу в центрі цієї лінії;
б) радіаційну ширину лінії;
в) коефіцієнти Ейнштейна для переходів, що відповідають цій лінії.

ЗАДАЧА 6. Частота електромагнітних хвиль, випромінюваних при інверсному переході $I=K=3$ молекули аміаку NH_3 , дорівнює $\nu_0 = 23870 \cdot 10^6$ Гц ≈ 24 ГГц. Внаслідок ефекту Доплера при кімнатній температурі спектральна лінія має гаусову форму. Знайти ширину $\Delta\nu$ спектральної лінії випромінювання (поглинання) молекул аміаку при температурі 300 К.

ЗАДАЧА 7. Нехай ω_q - частота аксіальної моди резонатора Фабрі-Перо з безконечними дзеркалами D_1 і D_2 , що знаходяться на відстані L . Такий резонатор має також поперечні (неаксіальні) моди, для яких хвильовий вектор \vec{k} складає кути θ_m з віссю резонатора, де $m=1, 2, 3, \dots$ Знайти

величини кутів θ_m для неаксіальних мод резонатора, що відповідають



одній і тій же частоті ω_q .

Чисельно оцінити кут θ_1 , якщо

довжина резонатора $L=10$ см,

довжина хвилі аксіальної моди

$\lambda_q=633$ нм.

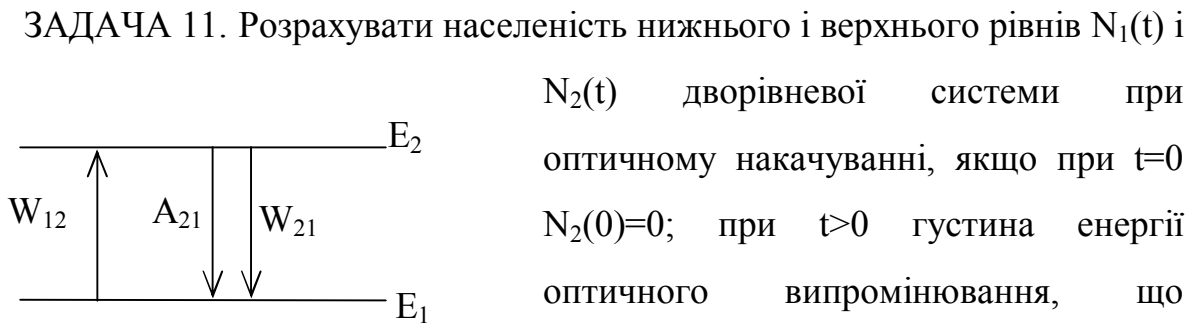
ЗАДАЧА 8. Виразити дифракційну добротність резонатора Фабрі-Перо через число зон Френеля, видимих на одному круглому дзеркалі з центра другого круглого дзеркала. Оцінити коефіцієнт дифракційних втрат за один прохід a_1 і максимально можливе значення добротності резонатора Фабрі-Перо з такими параметрами: довжина резонатора $L=50$ см; довжина хвилі $\lambda = 633$ мкм (гелій-неоновий лазер); $D = 0,8$ см (діаметр газової кювети в гелій-неоновому лазері).

ЗАДАЧА 9. Напівпровідниковий лазер являє собою кристал AlGaAs кубічної форми з ребром $0,3$ мм. Активна область – шар товщиною до 5 мкм поблизу площини р-п переходу. Показник заломлення AlGaAs складає $n=3,39$; довжина хвилі випромінювання $\lambda =0,8$ мкм.

При якому значенні коефіцієнта поглинання вільними носіями заряду втрати на поглинання в активній області зрівнюються з втратами, обумовленими неідеальністю відбивання від дзеркал резонатора. Дзеркалами служать вільні грані кристала.

ЗАДАЧА 10. Частота випромінювання в лінії R_1 рубіну $\nu_0 = 4,3 \cdot 10^{14}$ Гц ($\lambda = 693$ нм). Ширина спектральної лінії $\Delta\nu=1,12 \cdot 10^{11}$ Гц (при кімнатній температурі). Скільки аксіальних (поздовжніх) мод резонатора уміщується на

ширині спектральної лінії R_1 , якщо довжина резонатора $L=20$ см, показник заломлення рубіну $n=1,76$. Вважати, що рубіновий стержень займає весь об'єм резонатора.



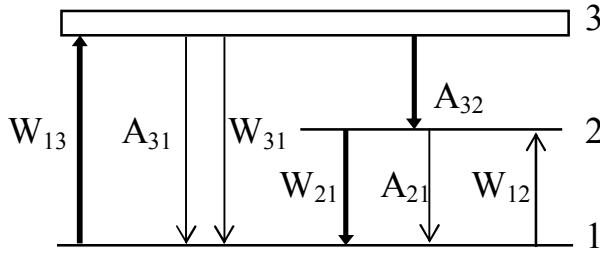
ЗАДАЧА 12. Плоска монохроматична електромагнітна хвиля поширюється в дворівневому активному середовищі вздовж осі OX . Знайти залежність густини потоку фотонів від координати x , якщо $L(0)=L_0$. Вважати заданими параметри дворівневої системи: концентрацію атомів N ; фактори виродження рівнів g_1, g_2 ; переріз σ_{12} переходу $1 \rightarrow 2$; коефіцієнт Ейнштейна A_{21} для спонтанного переходу $2 \rightarrow 1$. Розглянути два випадки:

- а) дуже слабкого потоку фотонів;
- б) дуже потужного потоку фотонів.

ЗАДАЧА 13. Розрахувати величину інверсної населеності $\Delta N(t)$ рівнів 2 і 1 трирівневої системи при оптичному накачуванні в підпороговому режимі. Ймовірності переходів показані на рисунку.

Прийняти $A_{32} \gg W_{31}, A_{31}$, що веде до $N_3 \ll N_1, N_2$, де N_1, N_2, N_3 - населеності рівнів. Повна концентрація випромінювальних центрів N_0 .

Знайти порогову умову квантового підсилення світла з енергією фотонів

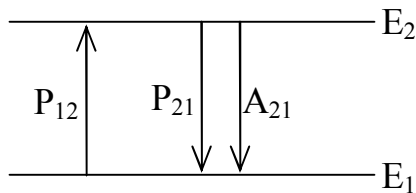


$h\nu = E_2 - E_1$, тобто величину W_{13} , при якій $\Delta N \geq 0$. Вважати кратності виродження рівнів 1 і 2 $g_1 = g_2 = 1$. Початкова умова: при $t=0$; $N_2=0$. При $t>0$

$$\rho_\nu = \text{const.}$$

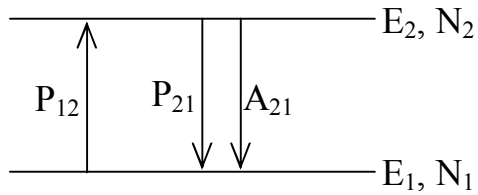
ЗАДАЧА 14. Розрахувати порогову потужність накачки рубіну плоскою монохроматичною світловою хвилею з довжиною хвилі $\lambda = 560 \text{ нм}$ ($h\nu = 2,2 \text{ eV}$), що відповідає центру однієї з смуг поглинання. Концентрація Cr^{3+} в кристалі $N = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Коефіцієнт поглинання світла при $\lambda = 560 \text{ нм}$ складає $\alpha = 3 \text{ см}^{-1}$. Час релаксації люмінесценції в спектральній лінії R_1 , що використовується для лазерної генерації, $\tau_{12} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. Показник заломлення рубіну $n = 1,76$.

ЗАДАЧА 15. Із умови детальної рівноваги між атомами (молекулами)



газу і вільними електронами в газі знайти зв'язок між ймовірностями P_{12} і P_{21} зіткнень 1-го і 2-го роду (див. рис.). Число зіткнень 1-го роду за одну секунду в одиниці об'єму визначається виразом $Z_{12} = n_e N_1 P_{12}$, а 2-го роду $Z_{21} = n_e N_2 P_{21}$, де N_1 , N_2 - концентрації атомів у станах 1 і 2; n_e - концентрація вільних електронів. Врахувати, що внаслідок сильної нерівності $m_e \ll m_a$, де m_e , m_a - маси електронів і атомів, ймовірності зіткнень визначаються ефективною температурою електронів T_e .

ЗАДАЧА 16. Нехай ми маємо атоми (молекули) з двома енергетичними рівнями E_1 і E_2 . Розрахувати залежність населеності N_2 збудженого рівня



атомів від електронної температури.

Вважати, що атоми переходять у збуджений стан, в основному, за рахунок непружних зіткнень з електронами. З 2-го стану на 1-й

відбуваються переходи різної природи: випромінювальні спонтанні переходи з ймовірністю A_{21} і невипромінювальні переходи при непружних зіткненнях другого роду з ймовірністю P_{21} . Чи можливо створення інверсної населеності в 2-рівневій системі за допомогою газового розряду?

ЗАДАЧІ З ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ОПТОЕЛЕКТРОНІКИ

ЗАДАЧА 1. Залежність векторного потенціалу плоскої монохроматичної електромагнітної хвилі від часу та просторових координат має вигляд

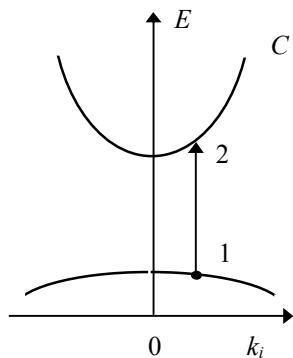
$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \vec{A}_0 e^{i(\omega t - \vec{q}\vec{r})} + \vec{A}_0^* e^{-i(\omega t - \vec{q}\vec{r})},$$

причому напруженість електричного поля $\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$, вектор магнітної індукції $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$. При відсутності об'ємних зарядів, $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$. Знайти залежність густини енергії електромагнітного поля ρ від амплітуди векторного потенціалу A_0 та від циклічної частоти ω_0 .

ЗАДАЧА 2. Поблизу екстремума енергетичної зони енергія електрона в ізотропному напівпровіднику дорівнює

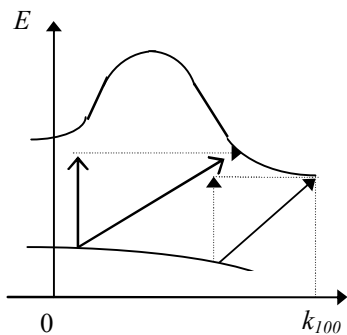
$$E_{n,k} = E_n + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_n} = E_n + E_k,$$

де E_n - енергія в екстремумі n -ї зони, k - хвильовий вектор, m_n - ефективна маса в даній зоні. Знайти енергетичну щільність станів електронів поблизу екстремума n -ї зони.



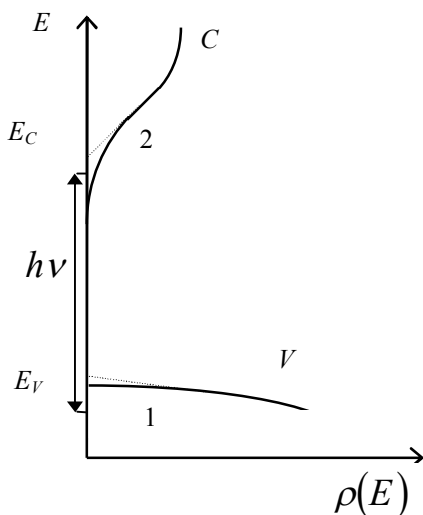
ЗАДАЧА 3. Знайти швидкість електрона в s -зоні GaAs, який “народився” при поглинанні фотона з енергією $h\nu = 1,5\text{eV}$. Ширина забороненої зони GaAs $E_g = 1,43\text{eV}$; ефективна маса електрона $0,068 m_0$, дірки – $0,5 m_0$; маса спокою електрона $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{г}$.

ЗАДАЧА 4. Знайти, у якому інтервалі знаходяться значення хвильового



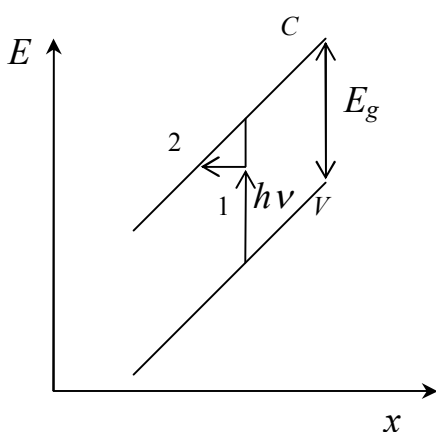
вектора фононів, які народжуються в *GaP* при поглинанні світла з енергією фотонів $h\nu = 2,4 \text{ eV}$. Ширина забороненої зони *GaP* дорівнює $2,25 \text{ eV}$. Ефективні маси електрона $m_n = 0,13m_0$, дірки - $m_p = 0,8m_0$. Період ґратки $a = 0,545 \text{ nm}$, маса спокою електрона $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{ g}$. Мінімум с-зони знаходиться в точці $X=[100]$. Енергія фононів, які “народжуються”, дорівнює $0,035 \text{ eV}$.

ЗАДАЧА 5. У сильно легovanому компенсованому напівпровіднику



спостерігається оптичне поглинання, пов'язане з переходами електронів з валентної зони у “хвіст” с-зони. Знайти спектр поглинання при таких переходах у області енергій фотонів $h\nu < E_g$. Вважати, що густина станів в валентній зоні $\rho_1(E)$ при легуванні напівпровідника не змінюється, а у “хвості” с-зони $\rho_2(E) = \rho_0 \exp\left(\frac{E}{E_0}\right)$, де

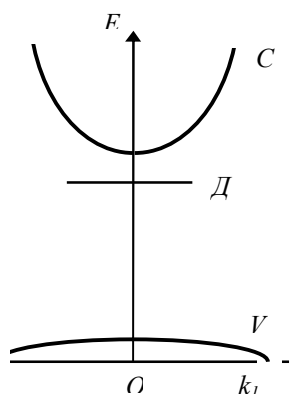
ρ_0 , E_0 – сталі величини. Врахувати, що виконання закону збереження квазіімпульсу забезпечується за рахунок розсіювання на домішкових атомах.



ЗАДАЧА 6. У сильному електричному полі довгохвильова межа смуги власного поглинання напівпровідника зміщується в сторону менших енергій фотонів. Розрахувати спектр поглинання

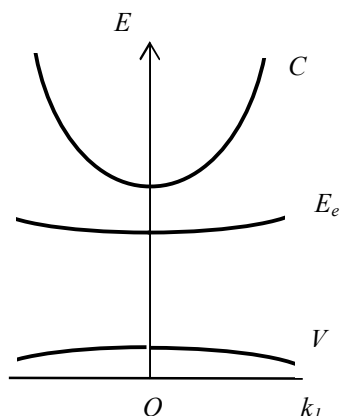
напівпровідника, тобто залежність коефіцієнта поглинання від енергії фотонів $\alpha(h\nu)$, з точністю до постійного множника при $h\nu < E_g$. Вважати, що перехід електрона з валентної зони до зони провідності являє собою результат двох переходів, які вказані на рисунку. При цьому ймовірність переходу 1 практично не залежить від енергії фотона, тобто $W_1 = const$, а ймовірність тунельного переходу 2 W_2 відповідає прозорості потенціального бар'єру.

ЗАДАЧА 7. Домішкові стани можна умовно представити на зонній діаграмі напівпровідника, як показано на рисунку. Такий стан



представляється у вигляді відрізка прямої, довжина якої відповідає невизначеності хвильового вектора електрона, локалізованого в даному стані. Знайти невизначеність хвильового вектора електрона в основному стані поблизу донорного центру в напівпровіднику. Чисельно оцінити область “розмазування” основного донорного стану у k -просторі в арсеніді галію, де

ефективна маса електрона $m_n = 0,068m_0$; $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ – маса спокою електрона.



ЗАДАЧА 8. Екситонні стани можна умовно представити на зонній схемі напівпровідника, як показано на рисунку. При якій швидкості руху V та при якому значенні хвильового вектора k екситона в арсеніді галію його енергія в стані, що відповідає квантовому числу $n=1$, буде

дорівнювати енергії пари вільних електрона та дірки. Ефективні маси носіїв заряду в арсенді галію: $m_n = 0,068m_0$; $m_p = 0,5m_0$; маса вільного електрона $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-28}$ г. Діелектрична проникність арсеніду галію $\varepsilon = 12$.

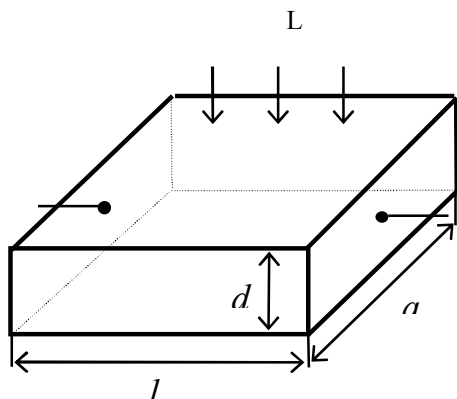
ЗАДАЧА 9. Оптичне поглинання, пов'язане з наявністю вільних електронів у напівпровіднику, можна розрахувати у класичному наближенні, розв'язуючи рівняння Максвела для слабо провідної середовища. Знайти залежність коефіцієнта поглинання плоскої монохроматичної електромагнітної хвилі від дійсної частини електропровідності напівпровідника.

ЗАДАЧА 10. Спектр поглинання, пов'язаний з наявністю вільних носіїв заряду в напівпровідниках, можна розрахувати у класичному наближенні, вважаючи, що коефіцієнт поглинання пропорційний до дійсної частини електропровідності при даній частоті $\alpha = \sigma_r n / (\varepsilon_0 \varepsilon c)$, де n - показник заломлення, ε - діелектрична проникність. Знайти частотну залежність коефіцієнта поглинання вільними носіями заряду у напівпровіднику при умові, що час релаксації квазіімпульсу τ не залежить від енергії. Врахувати розсіювання носіями заряду введенням сили "гальмування" (згідно з теорією Друде-Лоренца) $\vec{F}_r = -\frac{m^*}{\tau} \vec{V}$, де \vec{V} - швидкість носіїв, m^* - ефективна маса.

ЗАДАЧА 11. Знайти температурну залежність квазірівня Фермі для електронів у напівпровіднику, на який падає потік фотонів густиною L з області власного поглинання. Коефіцієнт поглинання $\alpha \ll d^{-1}$, де d - товщина кристалу, так що генерація носіїв заряду в об'ємі

напівпровідника рівномірна. Вважати, що час життя τ нерівноважних носіїв не залежить від температури.

ЗАДАЧА 12. Знайти люкс-амперну характеристику власного



фотоструму у напівпровіднику (залежність фотоструму від густини потоку фотонів).

Розглянути випадок малого коефіцієнта поглинання, тобто $\alpha \ll d^{-1}$, де d – товщина кристалу.

Напівпровідник вважати квазімонополярним, тобто концентрація нерівноважних електронів $\Delta n \gg \Delta p$.

Час життя електронів вважати відомим та незалежним від рівня збудження

(рекомбінація лінійна). До контактів (див. рисунок) прикладена напруга U .

Розміри напівпровідникової пластини l, a, d показані на рисунку.

Визначити коефіцієнт підсилення фотопровідника K , тобто відношення числа електронів, які проходять через контакти за 1с , до числа електронів, які народжуються в кристалі за той же час при поглинанні світла.

ЗАДАЧА 13. Знайти залежність стаціонарної фотопровідності квазімонополярного ($\Delta n \gg \Delta p$) напівпровідника від інтенсивності генерації електронно-діркових пар, вважаючи рекомбінацію нелінійною. Прийняти,

що інтенсивність рекомбінації електронів $R_n = \gamma(\Delta n)^m$, де $m > 1$. Як по

вимірній залежності $\sigma_\phi(G)$ знайти показник m у наведеній формулі?

ЗАДАЧА 14. Розповсюдженим методом дослідження рекомбінаційних процесів у напівпровідниках є аналіз кінетики фотопровідності. Знайти

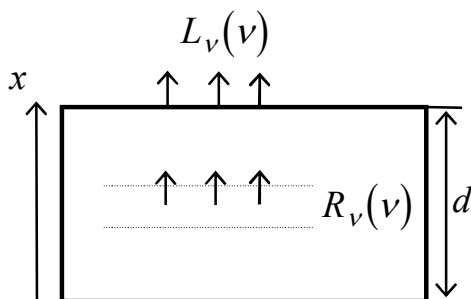
залежність фотопровідності від часу після освітлення монополярного

$(\Delta n \gg \Delta p)$ напівпровідника дуже коротким $(\Delta t \ll \tau_n)$ імпульсом світла з області власного поглинання, яке слабо поглинається. Вважати рекомбінацію квадратичною, тобто інтенсивність рекомбінації $R_n = \gamma(\Delta n)^2$.

ЗАДАЧА 15. Знайти положення максимуму спектра люмінесценції прямозонного напівпровідника при прямій міжзонній рекомбінації електронів та дірок. Скористуватися співвідношенням Ван-Русбрека-Шоклі.

ЗАДАЧА 16. Використовуючи співвідношення Ван-Русбрека-Шоклі, знайти положення максимуму спектра люмінесценції непрямозонного напівпровідника при непрямих переходах електронів з зони провідності до валентної зони.

ЗАДАЧА 17. Самопоглинання, тобто поглинання випромінюваного



напівпровідником світла в тому ж напівпровіднику, веде до залежності спектра люмінесценції, який вимірюється, від товщини зразка. Знайти спектральну густину потоку фотонів $L_v(\nu)$, яку спостерігаємо у повітрі, якщо відома спектральна

густина числа фотонів $R_v(\nu)$, які випромінюються у напівпровіднику. Вважати інтенсивність рекомбінації у напівпровіднику однорідною, а спектр поглинання $\alpha(\nu)$ - відомим. Товщина кристалу d , коефіцієнт відбивання на поверхні кристалу - r .

ЗАДАЧА 18. При низьких температурах основним механізмом рекомбінації електронів та дірок в достатньо якісних напівпровідникових

кристалах є екситонна рекомбінація. Знайти температурну залежність інтенсивності екситонної випромінювальної рекомбінації. Вважати, що екситони з'являються за рахунок “об'єднання” вільних електронів та дірок та зникають шляхом випромінювальної анігіляції та термічної дисоціації. Вважати, що ймовірність випромінювальної анігіляції екситона не залежить від температури.

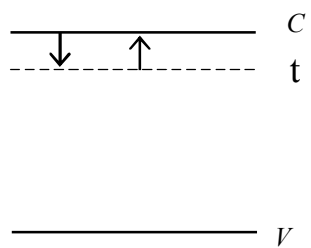
ЗАДАЧА 19. У напівпровідниках з ізоелектронними домішками при низьких температурах спостерігається випромінювальна рекомбінація носіїв заряду через зв'язані екситони. Знайти $R(n,p)$, тобто залежність інтенсивності рекомбінації через зв'язані екситони від величин n,p , де n,p - концентрації нерівноважних електронів та дірок. Вважати, що екситони з'являються за рахунок “об'єднання” вільних електронів та дірок поблизу “вільного” (не зайнятого екситоном) ізоелектронного центра та зникають шляхом випромінювальної анігіляції та термічної дисоціації. Які особливості залежності $R(n,p)$ при високих рівнях збудження?

ЗАДАЧА 20. При ударній рекомбінації (рекомбінації Оже) енергія електронно-діркової пари передається третьому носію (електрону чи дірці). Знайти залежність часу життя нерівноважних електронів від рівня легування напівпровідника (від положення рівня Фермі). Вважати концентрацію глибоких (не іонізованих) центрів малою, що дає для концентрацій нерівноважних носіїв $\Delta n = \Delta p$, а рівень збудження – низьким, тобто $\Delta n \ll n_0, p_0$, де n_0, p_0 - концентрації рівноважних носіїв. При яких умовах легування напівпровідника Оже-рекомбінація може бути суттєвою?

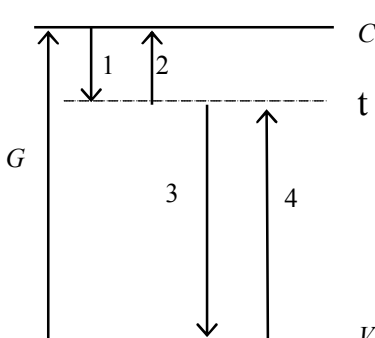
ЗАДАЧА 21. При високих концентраціях нерівноважних електронно-діркових пар суттєву роль може відігравати рекомбінація Оже. Вважаючи

Оже-рекомбінацію основним механізмом рекомбінації електронів та дірок при високому рівні інжекції, знайти: а) залежність концентрації нерівноважних носіїв $\Delta n = \Delta p$ від інтенсивності генерації пар G ; б) часову залежність концентрації носіїв $\Delta n(t)$ після зникнення збудження. Вважати рівень збудження високим, тобто $\Delta n = \Delta p \gg n_0, p_0$.

ЗАДАЧА 22. Нехай у напівпровіднику є локальні рівні, пов'язані з точковими дефектами (див. рисунок, t-рівні). З умови детальної рівноваги знайти зв'язок між коефіцієнтом захвату електрона на t-рівень C_t та ймовірністю термічного вивільнення електрона з t-рівня в c-зону α_t .



ЗАДАЧА 23. Ймовірність заповнення домішкового рівня електронами f_t в нерівноважному випадку визначається інтенсивностями захвату та термічного вивільнення електронів та дірок (див. рисунок). Знайти залежність $f_t(n, p)$, де n, p - концентрації електронів та дірок. Чому дорівнює величина f_t при високому рівні інжекції, коли $\Delta n \approx n \approx p \approx \Delta p$, процесами термічного вивільнення носіїв можна знехтувати? Чому дорівнює час життя електронів у цьому випадку?



ЗАДАЧА 24. При розрахунках рекомбінаційних процесів у широкозонних напівпровідниках локальні рівні в забороненій зоні розподіляють на рівні рекомбінації та рівні прилипання. Знайти положення

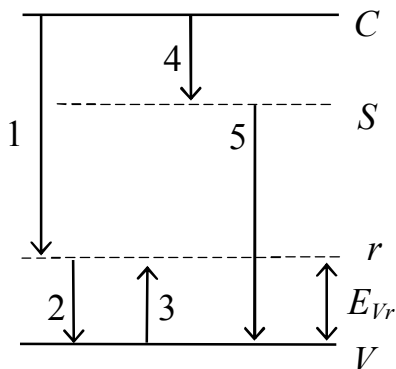
демаркаційного рівня, що розмежовує рівні прилипання для електронів та рівні рекомбінації.

ЗАДАЧА 25. Знайти залежність стаціонарної величини фотоструму, пропорційної до концентрації нерівноважних електронів у квазімонополярному напівпровіднику від інтенсивності генерації електронів G_n . Вважати, що рекомбінація електронів відбувається через глибокий рівень, частково заповнений електронами в рівновазі. Розглянути випадок високого рівня збудження $\Delta n \approx n \gg n_0$. Термічними переходами знехтувати. Концентрація r -рівнів N_r , рівноважна концентрація електронів на r -рівні n_r^0 . Як із залежності $\Delta n(G_n)$ знайти величину $p_r^0 \equiv N_r - n_r^0$? Вважати, що $p_r^0 \ll N_r$.

ЗАДАЧА 26. Рівні прилипання при їх невисокій концентрації можуть суттєво підвищувати інерційність фотоприймачів (збільшувати час релаксації фотоструму), практично не впливаючи на величину фоточутливості (не змінюючи часу життя електронів τ_n). Розрахувати час релаксації фотоструму у напівпровіднику при наявності “швидких” рівнів прилипання для електронів, які практично завжди знаходяться у квазірівновазі з зоною провідності. Напівпровідник вважати квазімонополярним ($\Delta n \gg \Delta p$), рівень збудження – високим ($\Delta n \gg n_0$), час життя електронів – сталим, заповнення рівнів прилипання – слабким, тобто $n_t \ll N_t$, де n_t, N_t – концентрації всіх та зайнятих електронами центрів прилипання.

ЗАДАЧА 27. У світлодіодах широко використовується випромінювальна рекомбінація електронів через мілкі акцептори (перехід 1 на рисунку) в р-

області. Термічна іонізація акцепторів (переходи 3) веде до зменшення



інтенсивності люмінесценції при зростанні

температури (це явище називається

термічним гасінням люмінесценції).

Розрахувати температурну залежність

люмінесценції $\Phi(T)$, вважаючи, що

концентрація нерівноважних електронів

$\Delta n \approx n = const$, тобто $\tau_n = const$. Цей

випадок може бути реалізованим, коли (при

низькому квантовому виході люмінесценції) рекомбінація відбувається, в

основному, через не випромінювальні S-центри (переходи 4 та 5).

Як з одержаної залежності $\Phi(T)$ визначити енергію термічної іонізації

E_{Vr} випромінювального r-центру? Вважати, що r-центри знаходяться у

квазірівновазі з V-зоною, тобто для інтенсивностей переходів 1, 2, 3 на

рисунок мають місце співвідношення $z_1 \ll z_2 \approx z_3$.

ЛІТЕРАТУРА

зі спецкурсу “Квантова електроніка та оптоелектроніка”

Література основна

1. Григорук В. І., Коротков П. І., Хижняк А. І. Лазерна фізика: Підручник. – К.: «МП Леся», 1997. – 480 с.: іл.
2. Страховский Г.М., Успенский А.В. Основы квантовой электроники. 2-е изд. -М.: Высшая школа, 1979.
3. Карпов Н.В. Лекции по квантовой электронике. -М.: Наука, 1988.
4. Звелто О. Принципы лазеров. -М.: Мир, 1990.
5. Верещагин И.К., Косяченко Л.А., Кокин С.М. Введение в оптоэлектронику. -М.: Высшая школа, 1991. - С.191.
6. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры. -Минск : изд. “Университетское”, 1988.
7. Микаэлян А.Л. Оптические методы в информатике. -М.: Наука, 1990.

Література допоміжна

1. Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. В 2-х т. - М.: Мир, 1981. - Т.1 - 304с., Т.2 – 364 с.
2. Елисеев П.Г. Введение в физику инжекционных лазеров. - М.: Наука, 1983. - 294 с.
3. Грибковский В.П. Полупроводниковые лазеры. - Минск: Университетское, 1983. - 304 с.
4. Adams C.S., Cassidy D.T. Effects of Stress on Threshold, Wavelength and Polarization of the Output of InGaAsP Semiconductor Lasers// Journ. Appl. Phys. - 1988. - V.12, '64. - P. 6631 - 6638.
5. Cassidy D.T., Adams C.S. Polarization of the Output of InGaAsP Semiconductor Diode Laser// IEEE Journal of Quantum Electronics. - 1989. - V.25, '6. - P. 1156 - 1160.
6. Berger G., Mueller R., Klehr A., Voss M. Polarization bistability in strained ridge waveguide InGaAsP/InP lasers: Experiment and theory// J. Appl. Phys. - 1995.- V.77, N 6.- P.6135 - 6144.
7. Chen Y.C., Liu J.M. Temperature Dependent Polarization Behavior of Semiconductor Lasers// Appl. Phys. Lett. - 1984. - V.45, '3. - P. 731-733.
8. Ptashchenko A.A., Deych M. V., Mironchenko N. V., Ptashchenko F. A. Polarization of the spontaneous radiation of stressed laser heterostructures// Solid - State Electronics.- 1994.- V.37, ' 4-6.- P. 1255 - 1258.

9. Ptashchenko A.A., Prokopovich L.P., Deych M.V. Polarization of the subthreshold emission and diagnostic of mechanical strain in semiconductor lasers and light-emitting diodes// Proceedings of SPIE. - 1993. - V.2113.- P. 216 - 222.
10. Petermann K. Some relations for the far-field distribution in semiconductor lasers with gain guiding// Opt. Quantum Electron. - 1981.- V.13, 17. - P. 323 - 333.
11. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и лазерные пучки.- М.: Наука, 1990.- 264 с.
12. Ptashchenko A.A., Ptashchenko F.A. “Excess” polarization of the spontaneous emission in laser heterostructures// Solid-State Electronics. - 1996. - V.39, №10. - P.1495-1500.
13. Птащенко О.О., Птащенко Ф.О. Механічні напруження та деградаційні процеси в лазерних гетероструктурах// Фізика і хімія твердих тіл. Вісн. Ів.-Франк. кр. відд. УФТ та Прикарпатського ун-ту ім. В.Стефаника. - 1998. - №6. - С. 67 - 75.
14. Птащенко Ф.А. Влияние температуры на поляризацию излучения полупроводниковых лазеров //Фотоэлектроника.- 1999. - Вып.8. - С.72-76.
15. Птащенко А.А., Птащенко Ф.А. Тонкая структура углового распределения излучения полупроводниковых лазеров //Фотоэлектроника.- 1999. - Вып.8. - С.6-12.
16. Птащенко А.А., Птащенко Ф.А. Астигматизм излучения полупроводниковых лазеров с полосковой геометрией //Журнал прикладной спектроскопии.- 2000.- Т. 67, № 4. - С. 461 – 464.
17. Птащенко А. А., Птащенко Ф. А., Волков И. А., Групп А. Г. Влияние окружающей диэлектрической среды на характеристики полупроводниковых лазеров //Фотоэлектроника.–2000. – вып. 9. – С. 103 – 107.
18. Ptashchenko A. A., Ptashchenko F. A., Maslejeva N. V., Sadova G. V. Mechanical strain and degradation of laser heterostructures// Proc. SPIE. -2000. – V. 4355. – P. 79 – 86.
19. Коротеев Н.И., Шумай И.Л. Физика мощного лазерного излучения. – М.: Наука, 1991. –312 с.
20. Справочник по лазерной технике / Пер. с немецкого. Под ред. А.П.Напартович. - М.: Энергоатомиздат, 1991.- 544 с.
21. Птащенко. О. О. Короткий українсько-російсько-англійський словник термінів квантової електроніки. Методичний посібник. Електронний варіант. Одеса, 2002. – 14 с.
22. Птащенко. О. О. Керований термоядерний синтез. Електронний варіант. Одеса, 2002. – 36 с.

ЛІТЕРАТУРА

зі спецкурсу “Фізичні основи оптоелектроніки”

Література основна

1. Шалимова К.В. Физика полупроводников. -М.: “Энергия”, 1-е изд. 1971, 2-е изд. 1976, 3-е изд. 1986.
2. Киреев П.С. Физика полупроводников. -М.: “Выща школа”, 1-е изд. 1969, 2-е изд. 1975.
3. Бонч-Бруневич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. -М.: “Наука”, 1977.
4. Зеегер К. Физика полупроводников. -М.: “Мир”, 1977.
5. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. -М.: “Мир”, 1973.

Література допоміжна

1. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. -М.: “Наука”, 2-е изд. 1978 (1-е изд. 1962).
2. Грибковский В.П. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. -Минск: “Наука и техника”, 1975.
3. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. -М.: “Физматгиз”, 1963.