

1. Il picco principale di diffrazione di un solido cristallino si trova ad un angolo  $\theta=32.824^\circ$ . Noto il coefficiente di dilatazione termica del materiale  $\gamma = \frac{\epsilon}{aT} = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , dove  $\epsilon$  è la variazione relativa del parametro reticolare, calcolare la posizione del picco quando la temperatura viene aumentata di 50K.
2. Si consideri un esperimento di effetto fotoelettrico in cui il catodo ( $W = 4.2 \text{ eV}$ ) è illuminato da un fascio di luce di lunghezza d'onda  $\lambda = 250 \text{ nm}$ . Calcolare la lunghezza d'onda di deBroglie di un elettrone emesso dal catodo e giunto all'anodo senza tensione applicata.
3. Si consideri la buca di potenziale in **Fig. 1**, dove un elettrone è intrappolato nello stato  $\psi_2$  ad energia  $E_2 = 1.5 \text{ eV}$ . Calcolare la lunghezza d'onda del fotone emesso quando l'elettrone rilassa allo stato fondamentale  $\psi_1$  ad energia  $E_1 = 1 \text{ eV}$ . È più probabile che l'elettrone venga emesso per tunneling attraverso la barriera di sinistra o di destra?
4. Si consideri un elettrone la cui parte reale dell'autofunzione  $\psi$  all'istante  $t = 0$  è rappresentata in **Fig. 2**. Stimare il potenziale  $V(x)$  a cui è soggetto l'elettrone e la sua energia  $E$ , noto  $a = 2.5 \text{ nm}$ .
5. Si consideri un elettrone in un oscillatore armonico quantistico con frequenza caratteristica  $\omega = 140 \text{ Grad/s}$ . Si calcoli il potenziale e la lunghezza d'onda del fotone emesso da un elettrone che rilassa dal primo stato eccitato  $\psi_1$  allo stato fondamentale  $\psi_0$ . Calcolare a che temperatura deve essere portato il sistema affinché la probabilità che l'elettrone occupi  $\psi_1$  sia metà della probabilità di occupare  $\psi_0$ , assumendo che entrambi i livelli energetici si trovino sufficientemente al di sopra dell'energia di Fermi del sistema.
6. Si consideri il semiconduttore in **Fig. 3** dove un fotone di energia  $h\nu = 2E_G$  viene assorbito in  $k_0$  e un fotone di energia  $E_G = 1\text{eV}$  viene emesso da fondo banda. Sapendo che la somma degli inversi delle masse efficaci nelle due bande è  $10^{31} \text{ kg}^{-1}$ , calcolare  $k_0$ .
7. Calcolare le masse efficaci di elettrone e di lacuna nell'esercizio precedente, sapendo che la mobilità dell'elettrone è doppia di quella della lacuna. Detto  $F_{\text{sat}}$  il campo critico per la saturazione della velocità, calcolare il rapporto tra le energie acquisite da elettrone e lacuna ad un campo  $F_1 < F_{\text{sat}}$  e ad un campo  $F_2 > F_{\text{sat}}$ .
8. Calcolare la massa DOS  $m^*_{3D}$  nella banda di conduzione anisotropa di un semiconduttore caratterizzato da degenerazione  $g = 6$ , massa longitudinale  $m^*_l = 0.5m_0$  e massa trasversale  $m^*_t = 0.1m_0$ . Disegnare una possibile configurazione delle valli in banda di conduzione nello spazio  $k$ .
9. Si consideri un campione in silicio drogato n a temperatura ambiente dove l'irraggiamento laser determina un tasso di fotogenerazione  $G = 10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  con un tempo di ricombinazione dei minoritari  $\tau_p = 100 \text{ ns}$ . Determinare il tempo necessario perchè la concentrazione in eccesso raggiunga il valore intrinseco.
10. Si consideri una barretta di silicio (drogaggio p,  $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , tempo di ricombinazione dei minoritari  $\tau_n = 5 \text{ ns}$ ) dove un fascio laser impone una concentrazione in eccesso di portatori minoritari in superficie pari a  $n'(0) = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Sapendo che la concentrazione di portatori è modificata rispetto all'equilibrio solo entro i primi  $100 \mu\text{m}$  dalla superficie irraggiata a temperatura ambiente, calcolare la mobilità elettronica.

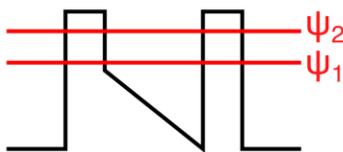


Fig. 1

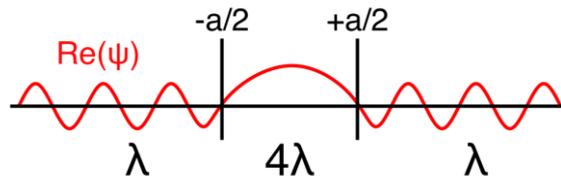


Fig. 2

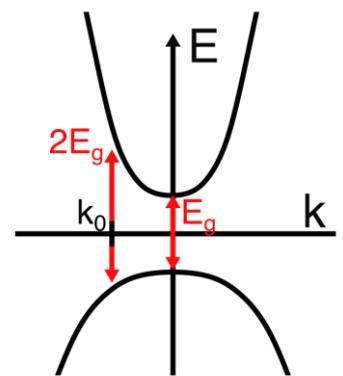


Fig. 3

- The main diffraction peak of a crystalline solid is located at an angle  $\theta=32.824^\circ$ . Knowing the thermal expansion coefficient of the material  $\gamma = \frac{\varepsilon}{dT} = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , where  $\varepsilon$  is the relative variation of the reticular parameter, calculate the peak location when the temperature is raised by 50K.
- Consider a photoelectric experiment setup in which the cathode ( $W = 4.2 \text{ eV}$ ) is illuminated by a light beam with wavelength  $\lambda = 250 \text{ nm}$ . Calculate the deBroglie wavelength of an electron emitted at the cathode and impinging on the anode in absence of applied voltage.
- Consider the potential well in **Fig. 1**, where an electron is trapped in the  $\psi_2$  state with energy  $E_2 = 1.5 \text{ eV}$ . Calculate the wavelength of the photon emitted when the electron relaxes to the ground state  $\psi_1$  with energy  $E_1 = 1 \text{ eV}$ . Is tunneling more likely through the right-side or left-side barrier?
- Consider an electron whose eigenfunction  $\psi$  at time  $t = 0$  is shown in **Fig. 2**. Estimate the potential  $V(x)$  applied to the electron and its energy  $E$ , given  $a = 2.5 \text{ nm}$ .
- Consider an electron in an harmonic quantum oscillator with characteristic frequency  $\omega = 140 \text{ Trad/s}$ . Compute the potential  $V(x)$  and the wavelength of a photon emitted by an electron relaxing from the first excited state  $\psi_1$  to the ground state  $\psi_0$ . Calculate the temperature at which the system must be operated in order for the occupancy probability for the excited state to be half of the occupancy probability for the ground state, assuming both energy levels to be sufficiently larger than the Fermi energy of the system.
- Consider the semiconductor in **Fig. 3** where a photon with energy  $h\nu = 2E_G$  is absorbed in  $k_0$  and a photon with energy  $E_G = 1 \text{ eV}$  is emitted from the bottom of the conduction band. Knowing that the sum of the inverses of the effective masses in the valence and conduction bands is  $10^{31} \text{ kg}^{-1}$ , calculate  $k_0$ .
- Calculate the effective masses for holes and electron in the previous exercise, knowing that the electron mobility is twice the hole mobility. Given  $F_{\text{sat}}$  the critical field for velocity saturation, calculate the ratio between the energy acquired by electrons and holes for a field  $F_1 < F_{\text{sat}}$  and a field  $F_2 > F_{\text{sat}}$ .
- Calculate the DOS mass  $m_{3D}^*$  in the anisotropic conduction band of a semiconductor characterized by degeneracy  $g = 6$ , longitudinal mass  $m_l^* = 0.5m_0$  and transversal mass  $m_t^* = 0.1m_0$ . Draw a possible configuration of the conduction band valleys in the  $k$ -space.
- Consider an n-doped silicon sample at room temperature undergoing laser illumination resulting in a photogeneration rate  $G = 10^{18} \text{ cm}^{-3}\text{s}^{-1}$  with a minority carrier recombination time  $\tau_p = 100 \text{ ns}$ . Calculate the time needed for the excess minority concentration to reach the intrinsic concentration.
- Consider a silicon slab (p-doped  $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , minority carrier recombination time  $\tau_n = 5 \text{ ns}$ ) where a laser beam forces an excess minority carriers' concentration at the surface of  $n'(0) = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Knowing that the carrier concentration is modified with respect to the equilibrium only for the first  $100 \mu\text{m}$  from the illuminated surface at room temperature, calculate the electron mobility.

### Costanti fisiche:

massa dell'elettrone	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
costante di Planck	$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
carica elettronica	$e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
costante di Boltzmann	$k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
velocità della luce	$c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
costante dielettrica nel vuoto	$\varepsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
costante di Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
costante di Wien	$c_W = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ K m}$

	Si	Ge
costante dielettrica relativa $\varepsilon_r$	11.7	16
concentrazione intrinseca $n_i$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.45 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{13}$
gap di energia $E_G$ [eV]	1.12	0.66
densità di stati effettiva in banda di conduzione $N_C$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$2.8 \times 10^{19}$	$1.04 \times 10^{19}$
densità di stati effettiva in banda di valenza $N_V$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.04 \times 10^{19}$	$0.6 \times 10^{19}$