

1. Le intercette di un piano cristallino con gli assi cristallografici x y z sono (1 2 3). Determinare gli indici di Miller del piano in questione.
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  $\lambda = 180 \text{ nm}$ . Assumendo di applicare una tensione di accelerazione  $V_A = 0.2 \text{ V}$  tra i due elettrodi, calcolare la tensione di stopping  $V_{\text{stop}}$  e la lunghezza d'onda di DeBroglie dell'elettrone all'anodo.
3. Si consideri la buca triangolare di **Fig. 1**. Mediante il principio di indeterminazione, si stimi l'energia del livello fondamentale ( $\alpha = 3\beta = 3.2 \text{ eV/nm}$ ). Tracciare l'andamento qualitativo della parte reale della corrispondente autofunzione.
4. Un elettrone è posto sul primo livello della buca in **Fig. 2**. Facendo uso dell'approssimazione di buca a pareti infinite, si calcoli il campo da applicare alla barriera affinché il tempo medio di tunneling valga 25 ps.
5. Un elettrone in un cristallo è descritto dalla relazione di dispersione  $E(k) = E_0 \cdot \left[ \sin^2\left(\frac{3}{2}ka\right) - \cos\left(\frac{3}{2}ka\right) \right]$ , con  $E_0 = 1 \text{ eV}$  e  $a = 0.5 \text{ nm}$ . La relazione di dispersione è rappresentata in Fig. 3 nella prima regione di Brillouin ( $-\frac{\pi}{a} < k < \frac{\pi}{a}$ ). Si diano le coordinate dei punti di minimo e se ne calcoli la corrispondente massa efficace. In quali punti di minimo la mobilità è più alta?
6. Si consideri un sistema di elettroni liberi all'equilibrio termodinamico a temperatura  $T = 1500 \text{ K}$  con energia di Fermi  $E_F = 2 \text{ eV}$ . Si calcoli la probabilità che uno stato ad energia  $E = 2.05 \text{ eV}$  sia occupato, motivando la scelta della statistica di occupazione impiegata. La risposta dipende dalla dimensionalità del problema?
7. Si considerino due campioni metallici di pari area di litio ( $W_{\text{Li}} = 3 \text{ eV}$ ) e vanadio ( $W_{\text{V}} = 4.3 \text{ eV}$ ). Enunciare la formula della corrente termoionica. Calcolare a che temperatura deve essere portato il vanadio per garantire la stessa corrente termoionica del litio a temperatura ambiente (300 K), facendo ragionevoli approssimazioni.
8. Nell'esperimento di effetto Hall descritto in **Fig. 4** un semiconduttore drogato p ( $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), al quale è applicata una tensione longitudinale  $V_L = 3 \text{ V}$ , presenta una resistività a temperatura ambiente  $\rho = 0.78 \text{ }\Omega\text{cm}$ . Determinare la polarità e il valore della tensione di Hall  $V_H$  a  $T = 300 \text{ K}$ . Sapendo inoltre che il semiconduttore è percorso da corrente  $I = 78 \text{ }\mu\text{A}$  e che il campo elettrico di saturazione  $F_{\text{SAT}} = 20 \text{ kV/cm}$ , si calcoli lo spessore  $t$ .
9. Si consideri un campione in silicio drogato n a temperatura  $T = 3 \text{ K}$  che opera in regime di freeze-out. Sapendo che  $E_C - E_D = 4.5 \text{ meV}$  e  $n(3 \text{ K}) = 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , si calcoli la concentrazione di drogante donore  $N_D$ .
10. Una barretta di silicio ( $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) a temperatura ambiente contiene un eccesso di portatori minoritari  $n' = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Sapendo che il tempo di ricombinazione dei minoritari è  $\tau_n = 50 \text{ ns}$ , calcolare l'energia del quasi-livello di Fermi  $F_N$  ai tempi  $t = 0 \text{ s}$ ,  $75 \text{ ns}$  e  $2 \text{ }\mu\text{s}$ .

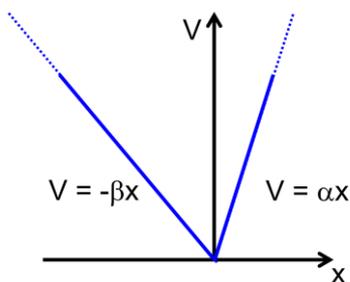


Fig. 1

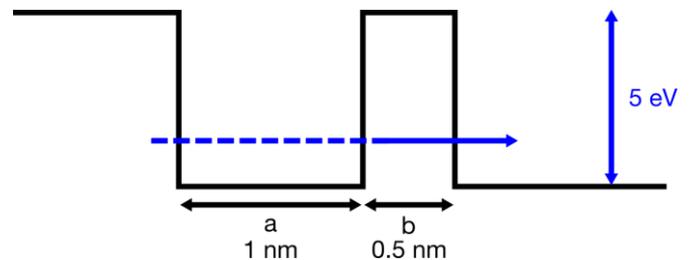


Fig. 2

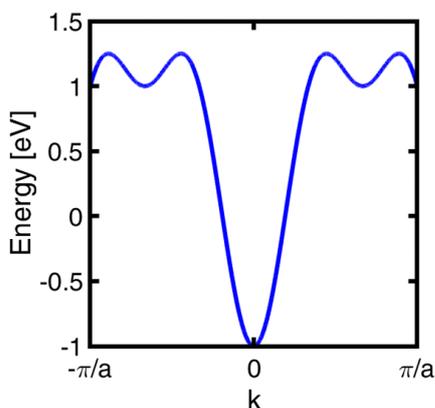


Fig. 3

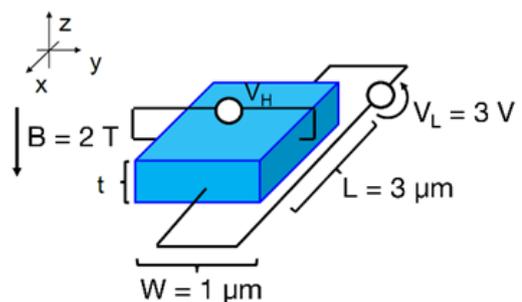


Fig. 4

1. The intercepts of a plane and the crystal axes  $x$   $y$   $z$  are (1,2,3). Determine the Miller indices of this plane.
2. Consider a photoelectric effect experiment where the cathode ( $W = 4.2$  eV) is irradiated by a light beam of wavelength  $\lambda = 180$  nm. Assuming to apply an accelerating voltage  $V_A = 0.2$  V between two metal electrodes, calculate the stopping voltage  $V_{\text{stop}}$  and the electron wavelength at anode.
3. Consider the triangular well in Fig. 1. Using the uncertainty principle, estimate the eigenvalue of the ground state ( $\alpha = 3\beta = 3.2$  eV/nm). Draw the qualitative behavior of the real part of the corresponding eigenfunction.
4. An electron is located on the ground state of the well in Fig. 2. Using the infinite-wall approximation, compute the electric field necessary to have an average tunneling time of 25 ps.
5. An electron in a crystal is described by the dispersion relation  $E(k) = E_0 \cdot \left[ \sin^2\left(\frac{3}{2}ka\right) - \cos\left(\frac{3}{2}ka\right) \right]$ , with  $E_0 = 1$  eV and  $a = 0.5$  nm. The dispersion law is shown in Fig. 3 for the first Brillouin zone ( $-\frac{\pi}{a} < k < \frac{\pi}{a}$ ). Find the coordinates of the minima and calculate the corresponding effective masses. In which minima the electron mobility is higher?
6. Consider a free electron system with Fermi energy  $E_F = 2$  eV. Calculate the probability that the state at energy  $E = 2.05$  eV is filled at temperature  $T = 1500$  K. Provide a brief justification of the occupation statistic used. Is the answer dependent on the problem dimensionality?
7. Consider two metallic samples with equal area consisting of lithium ( $W_{\text{Li}} = 3$  eV) and vanadium ( $W_{\text{V}} = 4.3$  eV). Provide the formula for the thermionic emission current. Estimate the temperature at which the thermionic current for vanadium is equal to the one of lithium at room temperature (300 K), under reasonable assumptions.
8. In the Hall experiment represented in Fig. 4 a p-doped semiconductor ( $N_A = 10^{16}$  cm $^{-3}$ ), on which is applied a longitudinal voltage  $V_L = 3$  V, has resistivity at  $T = 300$  K  $\rho = 0.78$   $\Omega$ cm. Determine the polarity and the value of Hall voltage  $V_H$  at room temperature. In addition, knowing that a current  $I = 78$   $\mu$ A flows, calculate the semiconductor thickness  $t$ .
9. Consider an n-doped silicon sample at temperature  $T = 3$  K operating in the freeze-out region. Knowing that  $E_C - E_D = 4.5$  meV and  $n(3\text{ K}) = 10^{13}$  cm $^{-3}$ , calculate the donor concentration  $N_D$ .
10. A silicon rod ( $N_A = 10^{18}$  cm $^{-3}$ ) at room temperature contains an excess of minority carriers  $n' = 10^{19}$  cm $^{-3}$ . Knowing that the recombination time of the minority carriers is  $\tau_n = 50$  ns, calculate the position of the quasi-Fermi level  $F_n$  at  $t = 0$  s, 75 ns and 2  $\mu$ s.

### Costanti fisiche:

massa dell'elettrone	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg
costante di Planck	$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J s
carica elettronica	$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C
costante di Boltzmann	$k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J K $^{-1}$
velocità della luce	$c = 2.998 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$
costante dielettrica nel vuoto	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m $^{-1}$
costante di Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W m $^{-2}$ K $^{-4}$
costante di Wien	$c_W = 2.8 \cdot 10^{-3}$ K m

	Si	Ge
costante dielettrica relativa $\epsilon_r$	11.7	16
concentrazione intrinseca $n_i$ [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 $N_C$ [cm $^{-3}$ ]	$2.8 \times 10^{19}$	$1.04 \times 10^{19}$
densità di stati effettiva in banda di valenza $N_V$ [cm $^{-3}$ ]	$1.04 \times 10^{19}$	$0.6 \times 10^{19}$