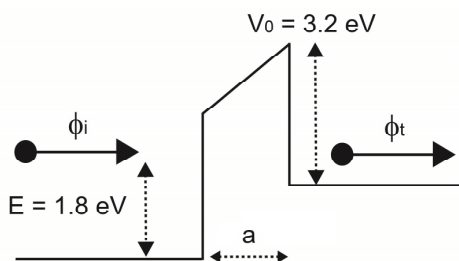
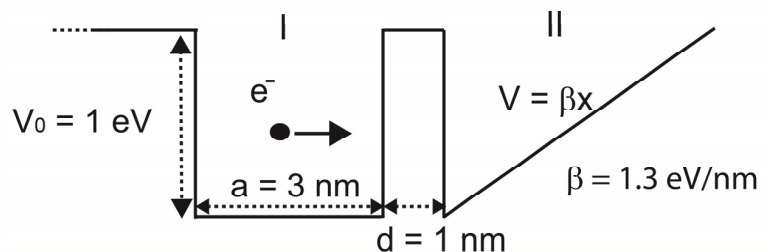


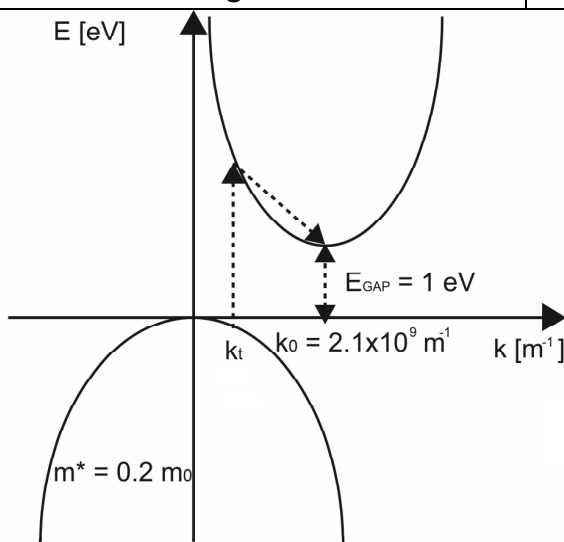
1. Una sorgente di temperatura  $T = 567$  K emette un fascio di neutroni termici ( $m_n = 1839 m_0$ ). I neutroni incidono su un cristallo a reticolo cubico semplice di passo  $a = 0.5$  nm. Si valutino il numero e la posizione angolare dei picchi associati ai piani (101).
2. Un fascio elettronico di flusso  $\phi_i = 10^{21} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ed energia  $E = 1.8$  eV viaggia da sinistra verso una barriera di potenziale di spessore "a" ed altezza  $V_0 = 3.2$  eV, **Fig. 1**. Dovuto all'applicazione di una tensione  $V_A = 1.72$  V, il flusso trasmesso  $\phi_t$  si riduce di un fattore 10 rispetto al caso con  $V_A = 0$  V. Calcolare la larghezza della barriera "a".
3. Si consideri un elettrone confinato nella buca "I" in **Fig. 2**, con  $V_0 = 1$  eV. Modellizzando la buca a pareti infinite, calcolare l'autovalore fondamentale  $E_0$  ed il tempo medio di tunneling dalla buca I ( $a = 3$  nm) alla buca II ( $\beta = 1.3$  eV/nm). Stimare infine se l'elettrone con energia  $E_0$  coincide con un autovalore della seconda buca entro un errore relativo del 5%.
4. Si consideri la relazione di dispersione  $E(k) = E_0 + E_0 \sin(2/3ka)$ , with  $E_0 = 1.78$  eV and  $a = 0.6$  nm. Si costruisca un pacchetto d'onda centrato in  $k_0 = 3\pi/4a$  con peso  $g(k)$  gaussiano di deviazione standard  $\sigma_k = 3 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ . Valutare la velocità di gruppo, la dispersione del pacchetto e la velocità di fase per  $t = 2$  ns.
5. Si definisca la funzione d'onda relativa all'elettrone libero. Considerato l'operatore  $O = 1/2 \cdot \partial^2 / (\partial x \partial t)$ , determinare l'autovalore della funzione d'onda di elettrone libero rispetto a O, assumendo un'energia dell'elettrone  $E = 2.5$  eV.
6. Si consideri un semiconduttore a gap indiretto, **Fig. 3**. Sapendo che la transizione diretta a minima energia dalla banda di valenza a quella di conduzione è in  $k_t = 1.69 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ , determinare la velocità dell'elettrone dopo la transizione e la lunghezza d'onda  $\lambda$  del fotone assorbito. In seguito, l'elettrone rilassa sul fondo banda interagendo con dei fononi. Nota l'energia del singolo fonone  $E_{phn} = 22$  meV, calcolare quanti fononi sono generati in media e il loro momento cristallino medio  $k_{phn}$ .
7. Si calcoli il band gap nel diamante, sapendo che la sua concentrazione intrinseca è di  $2 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-3}$  a temperatura ambiente, con  $N_c = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  e  $N_v = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .
8. Si consideri il semiconduttore InAs (arseniuro di indio) con gap di energia  $E_G = 0.354$  eV e densità effettiva in banda di valenza  $N_v = 6.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Sapendo che all'equilibrio a temperatura ambiente ha una concentrazione intrinseca pari a  $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , determinare la densità effettiva in banda di conduzione  $N_c$ . Sapendo che il minimo della banda di conduzione è unico e isotropo, calcolare la massa efficace dell'elettrone.
9. Si consideri un metallo a temperatura  $T = 0$  K con  $m^* = 1.1 m_0$  con distanza fra il livello di Fermi ed il fondo della banda di conduzione pari a  $E_F - E_{C0} = 4$  eV. Calcolare la densità elettronica  $n_{bc}$  e l'energia media elettronica nel caso 3D.
10. Si consideri l'esperimento riguardo l'effetto Hall, **Fig. 4**. Applicando una tensione longitudinale  $V_L = 1.7$  V ad un semiconduttore con concentrazione di drogaggio accettore pari a  $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , si misura una corrente pari a  $I_L = 513 \mu\text{A}$ . Si valuti la tensione trasversale (in modulo e verso) e la mobilità dei portatori maggioritari.



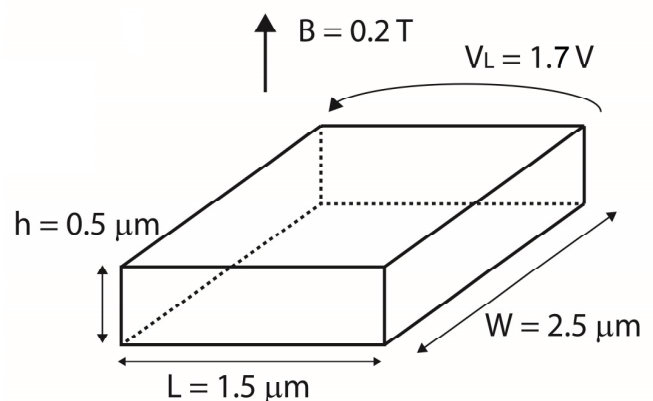
**Fig. 1**



**Fig. 2**



**Fig. 3**



**Fig. 4**

1. A beam of thermal neutrons ( $m_n = 1839 m_0$ ) is emitted from a source at  $T = 450$  K. Neutrons impinge on a cubic crystal with lattice parameter  $a = 0.7$  nm. Calculate the number and angle of peaks associated with plane (101).
2. An electronic flux with  $\phi_i = 10^{21} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  and energy  $E = 1.8$  eV impinges from left a barrier with width "a" and  $V_0 = 3.2$  eV, **Fig.1**. Knowing that the transmitted flux is reduced by a factor 10 when a potential  $V_A = 1.72$  V is applied (with respect to the case in which  $V_A = 0$  V), calculate "a".
3. Consider an electron confined in the "well I" of **Fig.2**, with  $V_0 = 1$  eV. Under the approximation of infinite walls, compute the fundamental eigenvalue  $E_0$  and the average time to go from "well I" ( $a = 3$  nm) to "well II" ( $\beta = 1.3$  eV/nm). Calculate if the eigenvalue  $E_0$  is equal to one of the eigenvalues of "Well II" under a relative error of 5%.
4. Consider the dispersion relationship  $E(k) = E_0 + E_0 \sin(2/3 ka)$ , with  $E_0 = 1.78$  eV and  $a = 0.6$  nm. Build the wave packet centered in  $k_0 = 3\pi/4a$  and a gaussian weight  $g(k)$  with standard deviation  $\sigma_k = 3 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ . Calculate the group velocity, the packet dispersion, and the phase velocity at  $t = 2$  ns.
5. Define the free-electron wave-function. Considering the operator  $O = 1/2 \cdot \partial^2 / (\partial x \partial t)$ , find the eigenvalue of the free-electron wave-function with respect to O, assuming an electron energy  $E = 2.5$  eV.
6. Consider the indirect bandgap semiconductor shown in **Fig. 3**. If the direct transition at minimum energy from valence to conduction band occurs at  $k_i = 1.69 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ , determine the electronic speed at the end of transition and the wavelength  $\lambda$  of absorbed photon. Then, the electron relaxes at the bottom of conduction band emitting phonons. Knowing the phonon energy  $E_{\text{phn}} = 22$  meV, calculate how many phonons are emitted on average and their average crystal momentum  $k_{\text{phn}}$ .
7. Calculate the band gap of diamond, knowing that its intrinsic concentration is  $2 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-3}$  at room temperature, with  $N_C = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  and  $N_V = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .
8. Consider an InAs semiconductor (indium arsenide) with energy gap  $E_G = 0.354$  eV and effective density in valence band  $N_V = 6.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Knowing that at equilibrium at room temperature it has an intrinsic concentration equal to  $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , determine the effective density in the conduction band  $N_C$ . Knowing that the minimum of the conduction band is single and isotropic, calculate the electronic effective mass.
9. Consider a metal at  $T = 0$  K with  $m^* = 1.1 m_0$  and energetic distance between the Fermi level and the bottom of the conductive band equal to  $E_F - E_{C0} = 4$  eV. Compute the electronic density  $n_{bc}$  and the electronic average energy for the 3D case.
10. Consider the Hall effect experiment in **Fig. 4**. The application of a longitudinal voltage  $V_L = 1.7$  V to a semiconductor slab with doping concentration  $N_A = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  induces a current  $I_L = 513 \mu\text{A}$ . Evaluate the transversal voltage (both amplitude and direction) and the mobility of the majority carriers.

**Costanti fisiche:**

massa dell'elettrone  
 costante di Planck  
 carica elettronica  
 costante di Boltzmann  
 velocità della luce  
 costante dielettrica nel vuoto  
 costante di Stefan-Boltzmann  
 costante di Wien

$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$   
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$   
 $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$   
 $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$   
 $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$   
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$   
 $c_W = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ K m}$

costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$   
 concentrazione intrinseca  $n_i [\text{cm}^{-3}]$   
 gap di energia  $E_G [\text{eV}]$   
 densità di stati effettiva in banda di conduzione  $N_C [\text{cm}^{-3}]$   
 densità di stati effettiva in banda di valenza  $N_V [\text{cm}^{-3}]$

| Si                    | Ge                    |
|-----------------------|-----------------------|
| 11.7                  | 16                    |
| $1.45 \times 10^{10}$ | $2.4 \times 10^{13}$  |
| 1.12                  | 0.66                  |
| $2.8 \times 10^{19}$  | $1.04 \times 10^{19}$ |
| $1.04 \times 10^{19}$ | $0.6 \times 10^{19}$  |