

1. Si consideri un cristallo con reticolo cubico semplice impiegato come target in un esperimento di diffrazione a raggi X. Sapendo che il primo picco di diffrazione relativo ai piani {100} è osservabile ad un angolo $\theta_1^{(100)} = 41^\circ$, calcolare gli angoli di osservazione dei primi picchi di diffrazione associati rispettivamente ai piani {110} e {111}.
2. Si consideri un profilo di potenziale del tipo $V(x) = \alpha x^\beta$, con $\alpha = 0.1 \text{ eV/nm}^{5/2}$, $\beta = 5/2$. Dopo aver stimato a mezzo del principio di indeterminazione di Heisenberg l'esponente γ della progressione degli autovalori n^γ , determinare la lunghezza d'onda del fotone associato al rilassamento dal quarto al secondo autostato.
3. Si consideri il gradino di potenziale di altezza $V_0 = 0.75 \text{ eV}$ riportato in **Fig. 1**. Sapendo che il rapporto tra flusso trasmesso e flusso incidente è pari a $1/5$, calcolare l'energia cinetica E del fascio elettronico incidente e il rapporto tra flusso riflesso e flusso trasmesso.
4. Si consideri la barriera di potenziale in **Fig. 2**, dove $V_1 = 1 \text{ eV}$, $V_2 = 0.5 \text{ eV}$ e $a = 2 \text{ nm}$. Determinare la probabilità di tunneling P_T per un elettrone ad energia $E = 0.25 \text{ eV}$.
5. Si consideri il box di potenziale 2D a pareti infinite mostrato in **Fig. 3**, dove $a = 2 \text{ nm}$ e $b = 3 \text{ nm}$. Dopo aver calcolato l'energia dei primi quattro autostati, si scriva l'ampiezza dei corrispondenti vettori d'onda. È possibile avere autostati degeneri?
6. Un semiconduttore monodimensionale ha la propria banda di conduzione descritta dalla relazione di dispersione $E(k) = \frac{E_0}{2} [1 - \cos(ka)]$, con $E_0 = 3.1 \text{ eV}$ e $a = 0.9 \text{ nm}$. Nota la frequenza di oscillazione di Bloch $\nu_{\text{Bloch}} = 5 \text{ THz}$, calcolare il campo elettrico F applicato ai capi del semiconduttore. Valutare inoltre il numero medio di oscillazioni visibili, assumendo un tempo di rilassamento del momento $\tau_m^* = 1 \text{ ps}$.
7. Si consideri il diagramma a bande del semiconduttore 3D in **Fig. 4**, caratterizzato da due famiglie di minimi isoenergetici in banda di conduzione. Nota la massa efficace DOS per gli elettroni in banda di conduzione ($m_{\text{DOS}}^* = 1.63 m_e$), e le masse longitudinali e trasversali del minimo anisotropo ($m_l^* = 0.3 m_e$, $m_t^* = 0.8 m_e$), calcolare la massa efficace del minimo isotropo nel punto Γ . Determinare quindi la massa di conduzione per gli elettroni.
8. Stimare la temperatura alla quale la concentrazione intrinseca dell'arseniuro di gallio (GaAs, $E_g = 1.42 \text{ eV}$, $N_c(300 \text{ K}) = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_v(300 \text{ K}) = 7.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) è pari alla concentrazione intrinseca del silicio a temperatura ambiente, trascurando la dipendenza delle densità equivalenti di stati dalla temperatura. Commentare quindi qualitativamente come cambierebbe il risultato ottenuto se si considerassero tali dipendenze.
9. È dato un campione di silicio drogato n in regime di freeze-out a temperatura $T = 30 \text{ K}$. Note la concentrazione dei donori $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ e la concentrazione di elettroni in banda di conduzione $n = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, calcolare l'energia di legame $E_c - E_D$ e la differenza tra il livello di Fermi a 0 K e il livello di Fermi a $T = 30 \text{ K}$, $E_F(0 \text{ K}) - E_F(T)$.
10. Si consideri un semiconduttore caratterizzato da tempi di rilassamento del momento per elettroni e lacune pari a $\tau_{m,n}^* = 100 \text{ fs}$ e $\tau_{m,p}^* = 300 \text{ fs}$, rispettivamente. Sapendo che il rapporto fra le velocità è pari a $v_n/v_p = 2$ in presenza di un campo applicato $F < F_{\text{sat}}$, si stimi il valore del rapporto v_n/v_p per $F > F_{\text{sat}}$, trascurando la dipendenza della massa efficace dal campo elettrico.

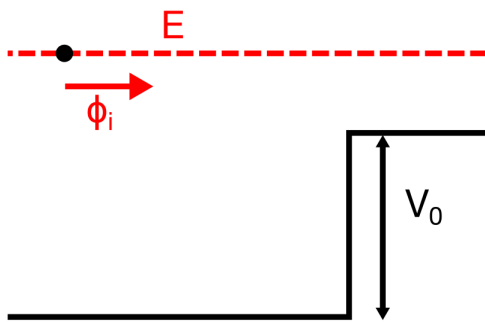


Fig. 1

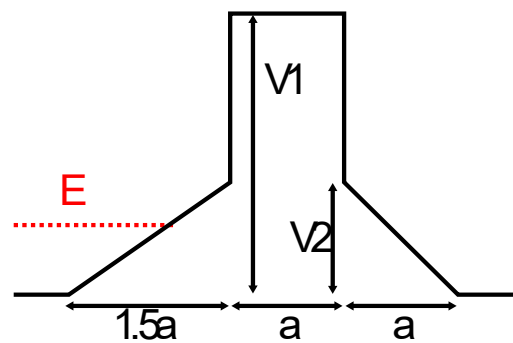


Fig. 2

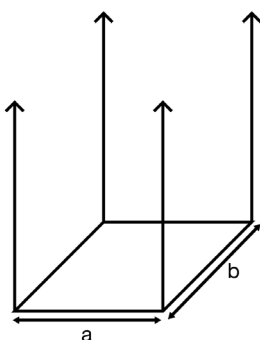


Fig. 3

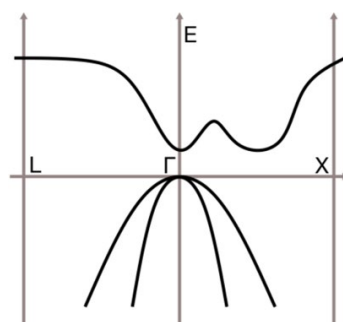


Fig. 4

1. A crystal with simple cubic lattice is used as target in an X-ray diffraction experiment. Knowing that the first diffraction peak associated with (100) planes can be observed at an angle $\theta_1^{(100)} = 41^\circ$, calculate the observation angles of first peaks associated with (110) and (111) planes, respectively.
2. Consider a potential profile $V(x) = \alpha x^\beta$, with $\alpha = 0.1 \text{ eV/nm}^{5/2}$, $\beta = 5/2$. After estimating through Heisenberg's uncertainty principle the exponent γ of the eigenvalue progression n^γ , determine the wavelength of the photon associated with the relaxation from the fourth to the second eigenstate.
3. Consider the potential step of height $V = 0.75 \text{ eV}$ shown in **Fig. 1**. Knowing that the ratio between the transmitted flux and the incident flux is equal to $1/5$, calculate the kinetic energy of the incident electron beam and the ratio between the reflected flux and the transmitted flux.
4. Consider the potential barrier shown in **Fig. 2**, where $V_1 = 1 \text{ eV}$, $V_2 = 0.5 \text{ eV}$, and $a = 2 \text{ nm}$. Determine the tunneling probability P_{T1} for an electron with energy $E_1 = 0.25 \text{ eV}$.
5. Consider the two-dimensional infinite potential well shown in **Fig. 3**, where $a = 2 \text{ nm}$ and $b = 3 \text{ nm}$. After calculating the energy of the first four eigenstates, compute the magnitude of the corresponding wave vectors. Is it possible to have degenerate eigenstates?
6. Consider a monodimensional semiconductor with conduction band described by the dispersion relation $E(k) = \frac{E_0}{2} [1 - \cos(ka)]$, with $E_0 = 3.1 \text{ eV}$ and $a = 0.9 \text{ nm}$. Evaluate the electric field F applied to the semiconductor given the Bloch oscillation frequency $\nu_{Bloch} = 5 \text{ THz}$. Evaluate also the average number of observable oscillations if a relaxation time of $\tau_m = 1 \text{ ps}$ is assumed.
7. Consider the band diagram of the 3D semiconductor in **Fig.4**, with two isoenergetic minima in the conduction band. Given the DOS effective mass for the electrons in the conduction band ($m_{DOS}^* = 1.63m_e$), and the longitudinal and transversal mass of the anisotropic minima ($m_t^* = 0.3m_e$, $m_l^* = 0.8m_e$), evaluate the effective mass of the isotropic minima in the Γ point. Provide also the value of the conduction mass for the electrons.
8. Estimate the temperature at which the intrinsic carrier concentration of gallium arsenide (GaAs, $E_g = 1.42 \text{ eV}$, $N_c(300 \text{ K}) = 4.7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_v(300 \text{ K}) = 7.0 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) is equal to the intrinsic carrier concentration of silicon at room temperature, neglecting the temperature dependence of the effective density of states. Discuss qualitatively how the result obtained would change if the temperature dependences of N_c and N_v were considered.
9. A n-doped silicon is working in the freeze-out regime at temperature $T=30 \text{ K}$. The donor concentration and the electron concentration in the conduction band are given ($N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ respectively). Find the binding energy E_C-E_D and the difference between the Fermi level at 0 K and $T=30\text{K}$ $E_F(0\text{K}) - E_F(T)$.
10. Consider a semiconductor characterized by momentum relaxation times of electrons and holes respectively equal to $\tau_{m,n}^* = 100 \text{ fs}$ and $\tau_{m,p}^* = 300 \text{ fs}$. For $F < F_{sat}$, the ratio between electron and hole velocities is equal to $v_n/v_p = 2$. Estimate the value of the ratio v_n/v_p for $F > F_{sat}$ neglecting the effective mass dependence on the electric field.

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	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
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	GaAs
costante dielettrica relativa ϵ_r	11.7	16	12.9
concentrazione intrinseca n_i [cm^{-3}]	1.45×10^{10}	2.4×10^{13}	2.73×10^6
gap di energia E_G [eV]	1.12	0.66	1.42
densità di stati effettiva in banda di conduzione N_C [cm^{-3}]	2.8×10^{19}	1.04×10^{19}	4.7×10^{17}
densità di stati effettiva in banda di valenza N_V [cm^{-3}]	1.04×10^{19}	0.6×10^{19}	7.0×10^{18}