

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 $\theta_1^{(100)} = 38^\circ$, calcolare gli angoli di osservazione dei primi picchi di diffrazione associati rispettivamente ai piani (110) e (111).
2. Si consideri una particella quantistica descritta da una generica funzione d'onda $\psi(x,t)$. Stabilire se il quadrato della posizione x^2 commuta con il momento p della particella.
3. Si consideri un elettrone di energia $E = 2.1$ eV e lunghezza di DeBroglie λ_e che incide da sinistra su un gradino positivo di altezza $V = 2.4$ eV situato in $x = 0$. Si calcoli di quanto si riduce la probabilità di trovare l'elettrone a distanza $+\lambda_e$ dal gradino rispetto alla probabilità di trovarlo in $x = 0$.
4. Si consideri una buca di potenziale armonica $V(x) = \frac{1}{2}\alpha x^2$ con costante elastica $\alpha = 0.5$ Nm⁻¹. Si calcoli l'energia dello stato fondamentale e la lunghezza d'onda del fotone emesso a causa della transizione di un elettrone dal secondo al primo autostato confinato. Come cambia tale lunghezza d'onda qualora si considerasse la transizione tra il quarto e il terzo autostato? Si giustifichi tale risultato.
5. Si consideri la buca di potenziale mostrata in **Fig. 1**. Disegnare in modo qualitativo l'autofunzione associata al nono autostato confinato di energia E_9 giustificandone l'andamento.
6. Si consideri un reticolo cristallino monodimensionale la cui banda di conduzione è descritta dalla relazione di dispersione $E_c(k) = E_0 - E_1 \cos(ka)$, con $E_0 = 1.5$ eV e $E_1 = 0.5$ eV. Nota la massa efficace dell'elettrone in $k = 0$ $m^*(0) = 0.955 m_0$, la tensione applicata ai capi del cristallo $V = 1$ V e il periodo delle oscillazioni di Bloch $T_B = 10.35$ ps, si determini il numero di atomi del reticolo e lo spostamento nello spazio k di un elettrone posto inizialmente in $k = 0$ dopo un tempo $t = 1$ ps in assenza di eventi di scattering.
7. Si consideri un semiconduttore 1D a gap indiretto ($E_G = 0.9$ eV) la cui struttura a bande mostrata in **Fig. 2** consiste in una banda di conduzione parabolica con minimo in $k_0 = 4 \cdot 10^9$ m⁻¹ ($m_e^* = 0.2 \cdot m_0$) e una banda di valenza parabolica con massimo in $k = 0$ ($m_h^* = 1.2 \cdot m_0$). Sapendo che il decadimento di un elettrone dal fondo della banda di conduzione in banda di valenza comporta l'emissione di un fotone di lunghezza d'onda $\lambda = 1.2$ μ m e di un fonone di energia trascurabile, si determini la velocità di gruppo dell'elettrone e della lacuna prima della transizione e il momento cristallino del fonone coinvolto nella transizione.
8. Si consideri un semiconduttore intrinseco in silicio. Noto il tempo medio di rilassamento del momento $\tau_m = 10^{-14}$ s a $T_1 = 150$ K, si determini il libero cammino medio λ degli elettroni ($m_e^* = 0.26 \cdot m_0$) alla temperatura T_1 e alla temperatura $T_2 = 450$ K.
9. Si consideri un semiconduttore in GaAs drogato p ($N_A = 10^{17}$ cm⁻³) a temperatura $T = 200$ K. Rappresentare in un plot quotato il diagramma a bande del semiconduttore indicando la posizione del livello di Fermi E_F e del livello di Fermi intrinseco E_i noti i seguenti parametri: $E_G = 1.424$ eV, $m_e^* = 0.067 \cdot m_0$, $m_{lh}^* = 0.082 \cdot m_0$ e $m_{hh}^* = 0.51 \cdot m_0$.
10. Si consideri un semiconduttore in germanio drogato n ($N_D = 10^{16}$ cm⁻³). Determinare l'energia di ionizzazione del drogante sapendo che la probabilità di non-ionizzazione a $T = 300$ K è $3 \cdot 10^{-3}$.

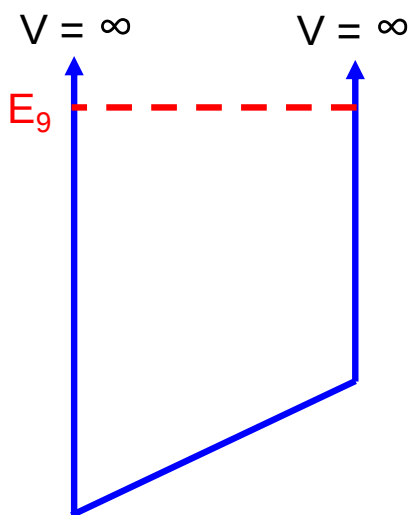


Fig. 1

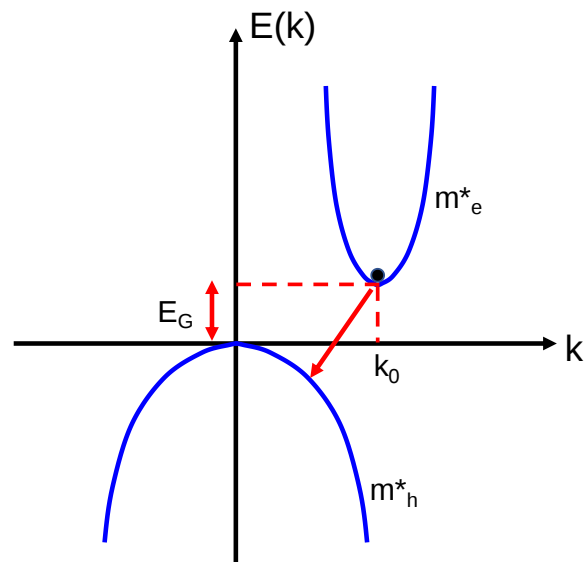


Fig. 2

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 $\theta_{1(100)} = 38^\circ$, calculate the observation angles of first peaks associated with (110) and (111) planes, respectively.
2. Consider a quantum particle with wavefunction $\psi(x,t)$. State if x^2 commutes with particle momentum p .
3. Consider an electron of energy $E = 2.1$ eV and DeBroglie wavelength λ_e impinging on a positive potential step of height $V = 2.4$ eV located in $x = 0$. Calculate how much the probability to find the electron at a distance of $+\lambda_e$ from the step decreases compared with the probability to find it at $x = 0$.
4. Consider a harmonic potential well $V(x) = \frac{1}{2}\alpha x^2$ with elastic constant $\alpha = 0.5$ Nm⁻¹. Calculate the energy of first eigenstate and the wavelength of the photon emitted as a result of an electron transition from 2nd to 1st eigenstate. How does photon wavelength change if the electron relaxes from the 4th to 3rd eigenstate?
5. Consider the potential well shown in **Fig. 1**. Draw qualitatively the eigenfunction associated to 9th eigenstate of energy E_9 motivating its behavior.
6. Consider a 1D crystal lattice with conduction band of dispersion law $E_c(k) = E_0 - E_1 \cos(ka)$, where $E_0 = 1.5$ eV and $E_1 = 0.5$ eV. Given the electron effective mass in $k = 0$ $m^*(0) = 0.955 \cdot m_0$, the voltage across the crystal $V = 1$ V and the Bloch oscillation period $T_B = 10.35$ ps, determine the number of atoms of the crystal and the shift in k space of an electron starting from $k = 0$ after a time $t = 1$ ps with no scattering events.
7. Consider a 1D indirect gap semiconductor ($E_G = 0.9$ eV) whose band structure shown in **Fig. 2** consists of a parabolic conduction band with minimum in $k_0 = 4 \cdot 10^9$ m⁻¹ ($m_e^* = 0.2 \cdot m_0$) and a parabolic valence band with maximum in $k = 0$ ($m_h^* = 1.2 \cdot m_0$). Knowing that the electron transition from the bottom of conduction band to the valence band leads to the emission of photon of wavelength $\lambda = 1.2$ μ m and a phonon with negligible energy, determine the group velocity of electron and hole before transition and the phonon crystal momentum.
8. Consider an intrinsic silicon semiconductor. Given the electron conductivity mass $m_e^* = 0.26 \cdot m_0$ and the momentum relaxation time $\tau_m = 10^{-14}$ s at $T_1 = 150$ K, calculate the electron mean free path λ at temperature T_1 and at temperature $T_2 = 450$ K.
9. Consider a p-doped GaAs semiconductor with acceptor concentration $N_A = 10^{17}$ cm⁻³ at $T = 200$ K. Sketch the semiconductor band diagram calculating the Fermi energy E_F and intrinsic Fermi energy E_i given the following parameters: $E_G = 1.424$ eV, $m_e^* = 0.067 \cdot m_0$, $m_{lh} = 0.082 \cdot m_0$ and $m_{hh} = 0.51 \cdot m_0$.
10. Consider a n-doped Ge semiconductor with donor concentration $N_D = 10^{16}$ cm⁻³. Determine the donor ionization energy knowing that the non-ionization probability at $T = 300$ K is $3 \cdot 10^{-3}$.

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

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

costante dielettrica relativa ϵ_r
 concentrazione intrinseca n_i [cm⁻³]
 gap di energia E_G [eV]
 densità di stati effettiva in banda di conduzione N_C [cm⁻³]
 densità di stati effettiva in banda di valenza N_V [cm⁻³]

Si	Ge
11.7	16
1.45×10^{10}	2.4×10^{13}
1.12	0.66
2.8×10^{19}	1.04×10^{19}
1.04×10^{19}	0.6×10^{19}