1. Si consideri una cavità all'equilibrio termico a temperatura T = 2000 K. Calcolare l'energia media del modo associato alla lunghezza d'onda di picco della cavità.

2. Un fascio di neutroni ($m_n = 1839 \cdot m_0$) di energia cinetica 2 eV è inviato sulla superficie di un cristallo per osservare picchi di diffrazione da piani cristallini distanti 1.1 Å. Determinare il massimo ordine di diffrazione per cui si può osservare diffrazione alla Bragg. Cosa cambia se si utilizza un fascio di elettroni di pari energia cinetica?

3. Fotoni di energia E_A = 4.25 eV incidono su un metallo A causando l'emissione di fotoelettroni di energia cinetica K_A [eV] e lunghezza d'onda di DeBroglie λ_A mentre fotoni di energia E_B = 4.7 eV incidenti su un metallo B causano l'emissione di elettroni con energia cinetica $K_B = K_A$ - 1.5 eV. Sapendo che la lunghezza d'onda di DeBroglie $\lambda_B = 2\lambda_A$, determinare K_A, K_B e le funzioni lavoro dei due metalli W_A e W_B.

4. Si consideri un elettrone in una regione di potenziale $V(x) = \alpha x^\beta$. Determinare i parametri α e β affinché $E_n \sim n^{4/3}$ e l'energia dello stato fondamentale sia E_1 = 530 meV.

5. Si consideri la banda di conduzione di un semiconduttore di passo reticolare a = 0.3 nm descritta dalla relazione di dispersione $E(k) = E_0 - E_1 \cdot \cos(ka) + E_2 \cdot \cos(2ka)$, con E_0 = 0.5 eV, E_1 = 0.2 eV e E_2 = 0.3 eV (**Fig. 1**). Calcolare la velocità di gruppo e la massa efficace di un pacchetto di elettroni centrato rispettivamente in k = 0, k = π/2a e k = π/a. Si giustifichino i risultati ottenuti.

6. Si consideri un metallo bidimensionale bivalente con cella quadrata di passo a = 0.4 nm. Sapendo che $m^*_{DOSn} = 0.95 \cdot m_0$, calcolare la concentrazione di elettroni in banda di conduzione e la velocità degli elettroni con energia $E = E_F$.

7. Si considerino le bande di valenza delle lacune pesanti ($m^*_{hh} = 0.537 \cdot m_0$) e delle lacune leggere ($m^*_{lh} = 0.153 \cdot m_0$) del silicio. Calcolare la frazione di lacune che popolano la banda delle lacune pesanti.

8. Si consideri un materiale semiconduttore caratterizzato da $N_C = 5\times10^{18}$ cm^{-3}, $N_V = 7\times10^{17}$ cm^{-3} ed E_G = 1.2 eV. Calcolare la concentrazione intrinseca a temperatura ambiente e la concentrazione di donori N_D tale per cui $E_F = E_C$ - 3kT. È corretto utilizzare la statistica di Maxwell-Boltzmann per concentrazioni di donori superiori rispetto a quella calcolata?

9. Si consideri un semiconduttore in arseniuro di indio (InAs) (E_{GAP} = 0.354 eV) drogato n con $N_D = 10^{17}$ cm^{-3}. Sapendo che $m^*_{n,DOS} = 0.023 \cdot m_0$, $m^*_{p,hh} = 0.41 \cdot m_0$ e $m^*_{p,lh} = 0.026 \cdot m_0$, stimare la minima temperatura per cui il semiconduttore diventa intrinseco.

10. Un campione in germanio drogato p ($N_A = 10^{18}$ cm^{-3}) a temperatura T = 300 K è sottoposto ad un irraggiamento ottico con tasso di fotogenerazione uniforme G_{ph} che induce un eccesso di portatori a regime n' = p' = 10^{16} cm^{-3} (**Fig. 2**). Al termine del transitorio la sorgente luminosa viene spenta. Sapendo che il quasi livello di Fermi degli elettroni $F_n(x)$ raggiunge il livello di Fermi intrinseco E_i dopo 40 µs dallo spegnimento della sorgente, determinare G_{ph}.

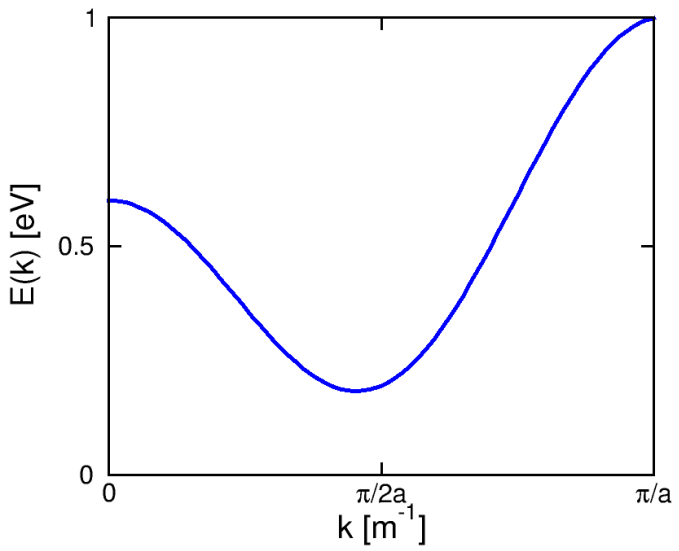

Fig. 1

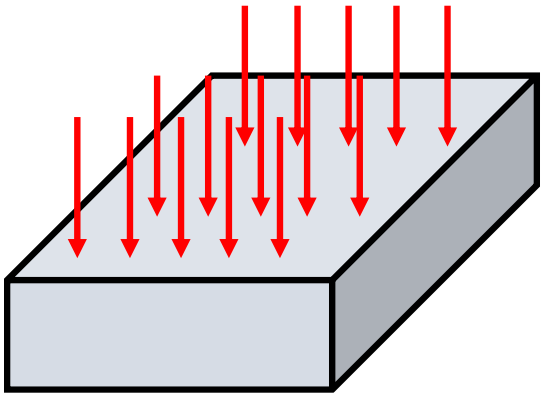

Fig. 2

1. Consider a cavity at thermal equilibrium at temperature T = 2000 K. Calculate the average energy of the mode associated with the cavity peak wavelength.

2. A neutron beam ($m_n = 1839 \cdot m_0$) with kinetic energy 2 eV impinges on a crystal surface to observe diffraction peaks by crystal planes with distance equal to 1.1 Å. Determine the maximum diffraction order. What does it change if an electron beam with equal kinetic energy is used?

3. Photons with energy E_A = 4.25 eV impinge on a metal A inducing the emission of photoelectrons of kinetic energy K_A [eV] and DeBroglie wavelength λ_A while photons with energy E_B = 4.7 eV impinging on a metal B cause the emission of photoelectrons of kinetic energy $K_B = K_A$ - 1.5 eV. Knowing that the DeBroglie wavelength $\lambda_B = 2\lambda_A$, determine K_A, K_B and the metal work functions W_A and W_B.

4. Consider an electron confined in a potential profile $V(x) = \alpha x^{\beta}$. Determine the parameters α and β so that $E_n \sim n^{4/3}$ and the fundamental eigenstate has energy E_1 = 530 meV.

5. Consider the conduction band of a semiconductor with lattice constant a = 0.3 nm described by the dispersion law $E(k) = E_0 - E_1 \cdot \cos(ka) + E_2 \cdot \cos(2ka)$, where E_0 = 0.5 eV, E_1 = 0.2 eV and E_2 = 0.3 eV (**Fig. 1**). Calculate the group velocity and the effective mass of an electron packet centered in k = 0, k = π/2a and k = π/a, respectively. Explain the results.

6. Consider a 2D bivalent metal with squared unit cell of lattice constant a = 0.4 nm. Knowing that $m^*_{DOSn} = 0.95 \cdot m_0$, calculate the electron concentration in the conduction band and the electron velocity at energy $E = E_F$.

7. Consider the silicon valence bands of heavy holes ($m^*_{hh} = 0.537 \cdot m_0$) and light holes ($m^*_{lh} = 0.153 \cdot m_0$). Calculate the hole percentage populating the heavy hole valence band.

8. Consider a semiconductor with $N_C = 5 \times 10^{18}$ cm^{-3}, $N_V = 7 \times 10^{17}$ cm^{-3} and E_G = 1.2 eV. Calculate the intrinsic concentration at room temperature and the donor concentration N_D such that $E_F = E_C - 3kT$. Is it allowed to use the Maxwell-Boltzmann statistics for higher donor concentrations compared to the calculated value?

9. Consider a n-doped InAs semiconductor sample (InAs) (E_{GAP} = 0.354 eV) where doping concentration is $N_D = 10^{17}$ cm^{-3}. Knowing that $m^*_n = 0.023 \cdot m_0$, $m^*_{p,hh} = 0.41 \cdot m_0$ and $m^*_{p,lh} = 0.026 \cdot m_0$, provide an estimate of the minimum temperature such that the semiconductor becomes intrinsic-type.

10. A p-doped germanium sample ($N_A = 10^{18}$ cm^{-3}) at temperature T = 300 K is irradiated by a light source with uniform photo-generation rate G_{ph} inducing a steady state carrier excess n' = p' = 10^{16} cm^{-3} (**Fig. 2**). After the end of transient, the light source is switched off. Knowing that the electron quasi-Fermi energy level $F_n(x)$ reaches the intrinsic energy level E_i after 40 μs from the source switching off, determine G_{ph}.

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	$\varepsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ 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 ε_r	11.7	16
concentrazione intrinseca n_i [cm^{-3}]	1.45 x 10^{10}	2.4 x 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 x 10^{19}	1.04 x 10^{19}
densità di stati effettiva in banda di valenza N_V [cm^{-3}]	1.04 x 10^{19}	0.6 x 10^{19}