

1. Si consideri un semiconduttore a gap diretto ($m_{BC}^* = 0.04m_0$, $m_{BV}^* = 0.3m_0$, $E_g = 0.92$ eV). Determinare il momento iniziale k_i e finale k_f di un elettrone che venga promosso dalla banda di valenza alla banda di conduzione in presenza di un fotone di energia $E_{ph} = 1.2$ eV e un fonone di momento $k_{phn} = +2 \cdot 10^8$ m⁻¹ ed energia $E_{phn} = 200$ meV. Rappresentare le transizioni in un grafico E-k.
2. Un semiconduttore monodimensionale ha la propria banda di conduzione descritta dalla relazione di dispersione $E(k) = \frac{E_0}{2} [1 - \cos(ka)]$, con $E_0 = 3.1$ eV e $a = 0.9$ nm. Nota la frequenza di oscillazione di Bloch $\nu_{Bloch} = 5$ THz, calcolare il campo elettrico F applicato ai capi del semiconduttore. Valutare inoltre il numero di oscillazioni visibili in media se si assume un tempo di rilassamento del momento $\tau_m = 1$ ps.
3. Si consideri il diagramma a bande del semiconduttore 3D in **Fig.1**, caratterizzato da due famiglie di minimi isoenergetici in banda di conduzione. Nota la massa efficace DOS per gli elettroni in banda di conduzione ($m_{DOS}^* = 1.63m_e$), e le masse longitudinali e trasversali del minimo anisotropo ($m_t^* = 0.3m_e$, $m_l^* = 0.8m_e$), calcolare la massa efficace del minimo isotropo nel punto Γ . Calcolare infine la massa di conduzione per gli elettroni.
4. Si consideri un catodo di cobalto con funzione lavoro $W_{Co} = 5$ eV e superficie emissiva $A_{Co} = 15$ cm². Facendo ragionevoli approssimazioni, determinare la superficie di un catodo di osmio, avente funzione lavoro $W_{Os} = 4.8$ eV, affinché i due catodi producano la stessa corrente termoionica alla temperatura $T_1 = 1800$ K.
5. Un campione di silicio di tipo p è irraggiato da una sorgente luminosa che induce una fotogenerazione uniforme nel volume del materiale. Conoscendo la distanza tra il quasi livello di Fermi F_n e il livello di Fermi (E_F è $F_n - E_F = 300$ meV) nello stato stazionario, determinare il rapporto tra la concentrazione degli elettroni dopo l'irraggiamento e quella presente prima dell'irraggiamento a $T = 300$ K. Determinare il regime di iniezione del materiale.
6. Stimare la temperatura alla quale la concentrazione intrinseca dell'arseniuro di gallio (GaAs, $E_g = 1.42$ eV, $N_c(300$ K) = $4.7 \cdot 10^{17}$ cm⁻³, $N_v(300$ K) = $7.0 \cdot 10^{18}$ cm⁻³) è pari alla concentrazione intrinseca del silicio a temperatura ambiente, trascurando la dipendenza delle densità di stati equivalenti dalla temperatura. Commentare quindi qualitativamente come cambierebbe il risultato ottenuto se si considerassero tali dipendenze.
7. Si consideri un semiconduttore a $T = 300$ K con mobilità $\mu_n = 100$ cm²/(V · s) avente un profilo di concentrazione degli elettroni mostrato in **Fig.2** descritto dalla legge $n(x) = n(0) \cdot e^{-x/L_n}$, con $n(0) = 10^{16}$ cm⁻³. Sapendo che $n(1 \mu\text{m}) = 10^{15}$ cm⁻³, calcolare L_n . Calcolare inoltre il tempo medio di ricombinazione.
8. È dato un campione di silicio drogato n in regime di freeze-out a temperatura $T=30$ K. Note la concentrazione dei donori $N_D=10^{16}$ cm⁻³ e la concentrazione di elettroni in banda di conduzione $n = 10^{14}$ 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 $T=30$ K, $E_F(0K) - E_F(T)$.
9. Si consideri l'esperimento di effetto Hall riportato in **Fig.3**, dove è impiegata una barretta di silicio drogata p ($\mu_p=350$ cm²V⁻¹s⁻¹) a temperatura ambiente. Sapendo che $V_L = 2$ V, $B = 0.5$ T, $L = 30$ μm , $W = 5$ μm , determinare il modulo e il segno della tensione di Hall V_H . Discutere qualitativamente come cambierebbe il modulo di V_H al variare di B , W , T , t , L , V_L .
10. Si consideri un semiconduttore caratterizzato da tempi di rilassamento del momento per elettroni e lacune pari a $\tau_{m,n}^* = 100$ fs e $\tau_{m,p}^* = 300$ fs, rispettivamente. Sapendo che il rapporto fra le velocità è pari a $v_n/v_p = 2$ in presenza di un campo elettrico $F < F_{sat}$, si stimi il valore del rapporto v_n/v_p per $F > F_{sat}$, trascurando la dipendenza della massa efficace dal campo elettrico.

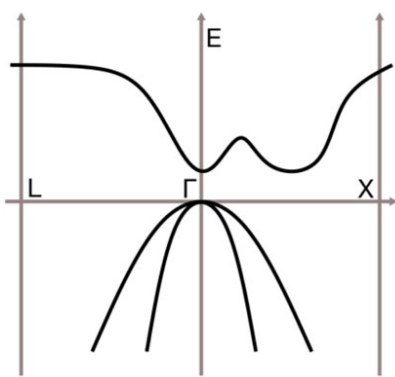


Fig.1

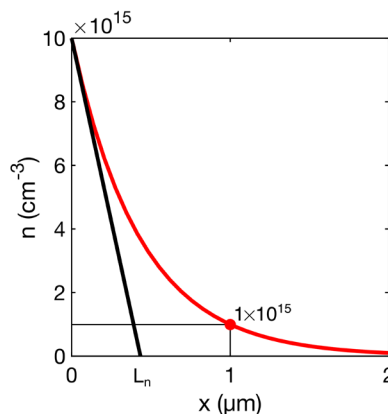


Fig.2

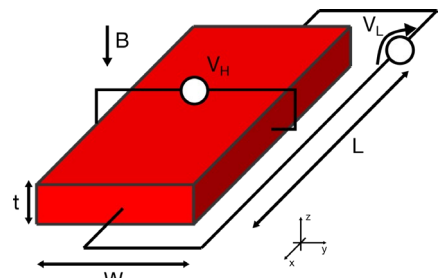


Fig.3

1. Consider a direct bandgap semiconductor ($m_{BC} = 0.04m_0$, $m_{BV} = 0.3m_0$, $E_{gap} = 0.92$ eV). Determine the initial momentum k_i and the final momentum k_f of an electron that is promoted from the valence band to the conduction band in the simultaneous presence of a photon with energy $E_{ph} = 1.2$ eV and a phonon with momentum $k_{phn} = +2 \cdot 10^8$ m⁻¹ and energy $E_{phn} = 200$ meV. Represent the transitions on an E-k diagram.
2. Consider a monodimensional semiconductor with conduction band described by the dispersion relation $E(k) = \frac{E_0}{2} [1 - \cos(ka)]$, with $E_0 = 3.1$ eV and $a = 0.9$ nm. Evaluate the electric field F applied to the semiconductor given the Bloch oscillation frequency $\nu_{Bloch} = 5$ THz. Evaluate also the average number of observable oscillations if a relaxation time of $\tau_m = 1$ ps is assumed.
3. Consider the band diagram of the 3D semiconductor in **Fig.1**, 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.
4. Consider a cobalt cathode with work function $W_{Co} = 5$ eV and emitting surface area $A_{Co} = 15$ cm². Making the appropriate approximations, determine the surface area of an osmium cathode, having a work function $W_{Os} = 4.8$ eV, such that the two cathodes produce the same thermionic current at the temperature $T_1 = 1800$ K.
5. A p-type silicon sample is irradiated by a light source that induces uniform photogeneration throughout the volume of the material. Knowing that the distance between the quasi-Fermi level F_n and the Fermi level E_F is $F_n - E_F = 300$ meV, determine the ratio between the electron concentration after irradiation and the electron concentration before irradiation at $T = 300$ K. Determine also the injection regime of the material.
6. Estimate the temperature at which the intrinsic carrier concentration of gallium arsenide (GaAs, $E_g = 1.42$ eV, $N_c(300\text{ K}) = 4.7 \cdot 10^{17}$ cm⁻³, $N_v(300\text{ K}) = 7.0 \cdot 10^{18}$ 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.
7. Consider a semiconductor at room temperature ($T = 300$ K) with electron mobility $\mu_n = 100$ cm²/(V · s) and with an electron concentration profile given by $n(x) = n(0) \cdot e^{-x/L_n}$, with $n(0) = 10^{16}$ cm⁻³ and plotted in **Fig. 2**. Compute L_n given that $n(1\mu\text{m}) = 10^{15}$ cm⁻³. Compute also the average electron lifetime.
8. A n-doped silicon is working in the freeze-out regime at temperature $T=30$ K. The donor concentration and the electron concentration in the conduction band are given ($N_D=10^{16}$ cm⁻³, $n = 10^{14}$ cm⁻³ respectively). Find the binding energy E_C-E_D and the difference between the Fermi level at 0 K and $T=30$ K $E_F(0\text{K}) - E_F(T)$.
9. Consider the Hall experiment in **Fig.3**, where a p-doped silicon is used at room temperature ($\mu_p=350$ cm²V⁻¹s⁻¹). Given that $V_L = 2$ V, $B = 0.5$ T, $L = 30$ μm , $W = 5$ μm , find the absolute value and the sign of the Hall voltage V_H . By doing the right approximations, and neglecting thermal dilation effects, by how much should the temperature change to reduce the absolute value of V_H by 5% ?
10. Consider a semiconductor characterized by momentum relaxation times of electrons and holes respectively equal to $\tau_{m,n}^* = 100$ fs and $\tau_{m,p}^* = 300$ 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	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ 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	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}