

1. Sapendo che la transizione elettronica a minima energia in **Fig. 1** avviene in $k_t = 10^9 \text{ m}^{-1}$, determinare (I) la velocità dell'elettrone dopo la transizione e (II) la lunghezza d'onda λ del fotone assorbito. In seguito, l'elettrone rilassa sul fondo banda. Nota l'energia del singolo fonone $E_{\text{phn}} = 34 \text{ meV}$, calcolare (III) quanti fononi sono generati in media. (IV) Che differenza c'è con una transizione dal massimo della banda di valenza al minimo della banda di conduzione?
2. Un campo $F = 15 \text{ kV/cm}$ è applicato ad un semiconduttore intrinseco a gap diretto con concentrazione $n_i = 2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$. Sapendo che la velocità dell'elettrone è il triplo di quella della lacuna, e che i due portatori sono caratterizzati dallo stesso tempo di rilassamento del momento $\tau_m = 3 \times 10^{-13} \text{ s}$, calcolare (I) i k stazionari delle due particelle e (II) il rapporto delle due masse efficaci. Calcolare infine (III) la densità di corrente di deriva complessiva sapendo che $m_e^* = 0.75 m_0$.
3. Si consideri un metallo tridimensionale (litio, configurazione elettronica $1s^2 2s^1$) in cui il livello di Fermi è pari a 3.36 eV , con $m^* = 1.4 m_0$. Calcolare (I) la densità atomica del metallo, (II) la velocità di Fermi e (III) la temperatura di Fermi.
4. Si consideri un metallo 2D con $m^* = 1.1 m_0$ ed $E_F - E_{C0} = 2.5 \text{ eV}$. Calcolare (I) la densità elettronica e (II) l'energia media.
5. Considerare il semiconduttore in **Fig. 2** con diversi punti di minimo nella banda di conduzione di cui uno è in Γ ($m_e^* = 0.4 m_0$), mentre gli altri hanno massa longitudinale $m_l^* = 0.6 m_0$ e massa tangenziale $m_t^* = 0.36 m_0$. Calcolare la massa DOS.
6. Si calcoli (I) la temperatura e (II) la concentrazione di drogante ionizzato nel silicio drogato $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, sapendo che il livello di Fermi si trova a 23 meV sopra il livello donore E_D e 47 meV sotto la banda di conduzione E_c . Si assuma costante N_c in temperatura.
7. Si consideri un campione di Germanio in cui $E_F = E_i - 0.17 \text{ eV}$. (I) A che tipo di drogaggio è stato sottoposto il semiconduttore? (II) Stimare la temperatura a cui la concentrazione intrinseca eguaglia il drogaggio.
8. Si consideri l'effetto Hall riportato in **Fig. 3**. Applicando una tensione longitudinale $V_L = 1 \text{ V}$ ad una lamina di silicio drogata donore ($N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) si misura una corrente pari a $I_L = 250 \mu\text{A}$. Si trovino (I) il modulo del campo elettrico trasversale e (II) la mobilità dei maggioritari.
9. Si consideri un resistore in silicio drogato donore ($N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), caratterizzato da una massa di conduzione $m_c^* = 0.26 m_0$, tempo medio di scattering $\tau_m = 3 \times 10^{-13} \text{ s}$ ed energia media per fonone ottico $E_{\text{FON}} = 65 \text{ meV}$. Al semiconduttore è applicata una tensione $V = 15 \text{ mV}$. (I) Quanto vale la velocità di saturazione? Sapendo che la sezione del semiconduttore in esame è di $(0.2 \times 0.5) \mu\text{m}^2$, si calcoli la corrente per tre diverse lunghezze L del resistore: $5 \mu\text{m}$ (II), $0.75 \mu\text{m}$ (III), 50 nm (IV).
10. Una barretta di silicio ($N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) è irraggiata da un fascio luminoso costante che causa, in regime di debole iniezione, un eccesso di portatori minoritari $\delta_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ in $x = 0$, come riportato in **Fig. 4**. Sapendo che ad una distanza di $2 \mu\text{m}$ il quasi livello di Fermi delle lacune è $E_v + 0.47 \text{ eV}$, stimare il tempo di ricombinazione dei minoritari ($\mu_p = 430 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$).

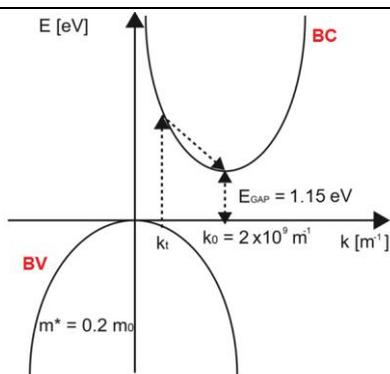


Fig.1

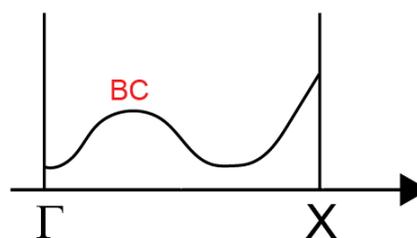


Fig. 2

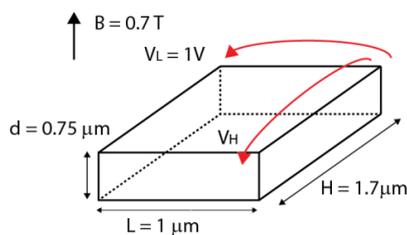


Fig. 3

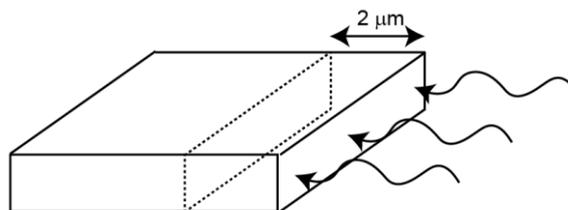


Fig. 4

- Knowing that the electron transition at minimum energy in **Fig. 1** happens at $k_t = 10^9 \text{ m}^{-1}$, calculate (I) the electron speed after the transition and (II) the λ of the absorbed photon. Then, the electron relaxes on the bottom of the BC. By considering the single photonic energy $E_{\text{phn}} = 34 \text{ meV}$, (III) how many photons are generated, on average? (IV) What are the differences with respect to the transition from the maximum of the valence band to the minimum of the conduction band?
- An electric field $F = 15 \text{ kV/cm}$ is applied to a direct gap semiconductor with intrinsic concentration of $n_i = 2.4 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$. By the fact the electronic speed is three times the speed of the holes and $\tau_m = \tau_{m,e} = \tau_{m,h} = 3 \times 10^{-13} \text{ s}$, compute (I) the stationary k for the two particles and (II) the ratio between the effective masses. Furthermore: calculate the total current density knowing that $m_e^* = 0.75 m_0$.
- Consider a 3D metal (lithium, with electronic configuration $1s^2 2s^1$) with the Fermi level $E_F = 3.36 \text{ eV}$ with $m^* = 1.4 m_0$. Compute (I) the atomic density of the metal, (II) the Fermi speed and (III) the Fermi temperature.
- Consider a 2D metal with $m^* = 1.1 m_0$ and $E_F - E_{C0} = 2.5 \text{ eV}$. Compute (I) the electronic density and (II) the average energy.
- Consider the semiconductor in **Fig. 2** with several minima in the conduction band. One minimum is in Γ ($m_e^* = 0.4 m_0$) while the others have $m_i^* = 0.6 m_0$, $m_t^* = 0.36 m_0$. Compute the density of states mass.
- Compute (I) the temperature and (II) the doping concentration of a silicon system with $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Note that the Fermi level is 23 meV above the donor energetic level E_D and 47 meV below the conduction band E_C . Assume N_C constant versus the temperature variation.
- Consider a system with Germanium, in which $E_F = E_i - 0.17 \text{ eV}$. (I) What is the doping concentration of the semiconductor? (II) At what temperature the intrinsic concentration equals the extrinsic one?
- Consider the Hall Effect in **Fig. 3**. Applying a longitudinal $V_L = 1 \text{ V}$ at a silicon bar (doped with $N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) a current $I_L = 250 \mu\text{A}$ is measured. Compute (I) the module of the transversal electric field and (II) the mobility of the majority carriers.
- Consider a resistor in silicon of section $(0.2 \times 0.5) \mu\text{m}^2$ with doping $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, conduction mass $m_c^* = 0.2 m_0$, average scattering time $\tau_m = 3 \times 10^{-13} \text{ s}$ and average energy for the optical phonon $E_{\text{FON}} = 65 \text{ meV}$. Knowing that a voltage $V = 15 \text{ mV}$ is applied to the resistor, compute: (I) the saturation speed and the current for three different lengths of the resistor: $5 \mu\text{m}$ (II), $0.75 \mu\text{m}$ (III), 50 nm (IV).
- A silicon bar ($N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) is irradiated by a constant light beam, as in **Fig. 4**, which cause an increase of the minority carriers equal to $\delta_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ in $x = 0$. Knowing that at a distance of $2 \mu\text{m}$ the quasi-Fermi level of the holes is at $E_V + 0.47 \text{ eV}$, give an estimation of the recombination time ($\mu_p = 430 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

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 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**

11.7

 1.45×10^{10}

1.12

 2.8×10^{19} 1.04×10^{19} **Ge**

16

 2.4×10^{13}

0.66

 1.04×10^{19} 0.6×10^{19}

- In un esperimento di effetto fotoelettrico, una sorgente luminosa con lunghezza d'onda $\lambda = 250 \text{ nm}$ incide su un elettrodo metallico. Si valuti (I) la funzione lavoro del metallo, sapendo che la tensione di stop vale in modulo $V_0 = 0.5 \text{ V}$. Si calcolino (II) la velocità e (III) la lunghezza d'onda degli elettroni all'anodo per una tensione di accelerazione $V_A = 5 \text{ V}$.
- Si consideri la buca di potenziale rettangolare avente 4 stati confinati in **Fig. 1**. (I) Si stimino i valori di energia facendo uso dell'approssimazione di buca a pareti infinite. Dette $\Psi_3(x)$ e $\Psi_4(x)$ le parti spaziali del terzo e del quarto autostato della buca, si scriva (II) la funzione d'onda di un elettrone che si trova in uno stato ottenuto come combinazione lineare di pesi A_3 e A_4 dei due autostati. Infine, (III) si calcoli la frequenza di oscillazione della particella descritta da questo stato.
- Stimare (I) la larghezza "a" della buca in **Fig. 2**, sapendo che presenta un singolo autostato confinato a $E_1 = 0.5 \text{ eV}$ e tenendo in considerazione la profondità finita della buca. Si calcoli poi (II) l'autovalore della buca di pari larghezza ma con parete infinita, spiegando l'eventuale differenza rispetto a E_1 .
- Un fascio di neutroni termici ($m_n = 1839 m_0$) è contraddistinto da una temperatura equivalente $T = 450 \text{ K}$. I neutroni incidono su un cristallo a reticolo cubico semplice di passo $a = 0.7 \text{ nm}$. Si valutino (I) il numero e (II) la posizione angolare dei picchi associati ai piani (111).
- Si consideri una lacuna su una banda di valenza di energia $E(k) = E_0 + E_1 \cos ka$, con $E_0 = 1 \text{ eV}$, $E_1 = 0.5 \text{ eV}$ e $a = 0.8 \text{ nm}$. Assumendo un tempo di rilassamento del momento di 10^{-13} s , si calcoli (I) la posizione media nella banda k e (II) la velocità della lacuna, in modulo e verso, sotto l'effetto di un campo elettrico positivo $F = 25 \text{ kVcm}^{-1}$.
- Si consideri un metallo 2D con $m^* = 1.1 m_0$ ed $E_F - E_{C0} = 2.5 \text{ eV}$. Calcolare (I) la densità elettronica e (II) l'energia media.
- Considerare il semiconduttore in **Fig. 3** con diversi punti di minimo nella banda di conduzione di cui uno è in Γ ($m_e^* = 0.4 m_0$), mentre gli altri hanno massa longitudinale $m_l^* = 0.6 m_0$ e massa tangenziale $m_t^* = 0.36 m_0$. Calcolare la massa DOS.
- Si consideri un campione di Germanio in cui $E_F = E_i - 0.17 \text{ eV}$. (I) A che tipo di drogaggio è stato sottoposto il semiconduttore? (II) Stimare la temperatura a cui la concentrazione intrinseca eguaglia il drogaggio.
- Si consideri l'effetto Hall riportato in **Fig. 4**. Applicando una tensione longitudinale $V_L = 1 \text{ V}$ ad una lamina di silicio drogata donore ($N_D = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) si misura una corrente pari a $I_L = 250 \text{ }\mu\text{A}$. Si trovino (I) il modulo del campo elettrico trasversale e (II) la mobilità dei maggioritari.
- Una barretta di silicio ($N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) è irraggiata da un fascio luminoso costante che causa, in regime di debole iniezione, un eccesso di portatori minoritari $\delta_p = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ in $x = 0$, come riportato in **Fig. 5**. Sapendo che ad una distanza di $2 \text{ }\mu\text{m}$ il quasi livello di Fermi delle lacune è $E_v + 0.47 \text{ eV}$, stimare il tempo di ricombinazione dei minoritari ($\mu_p = 430 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$).

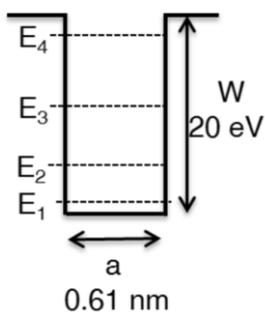


Fig.1

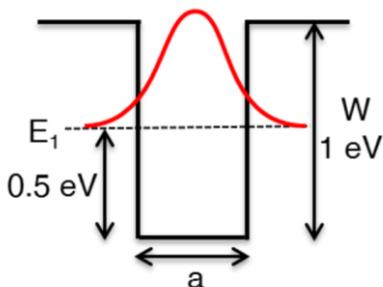


Fig. 2

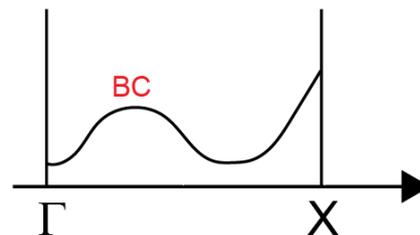


Fig. 3

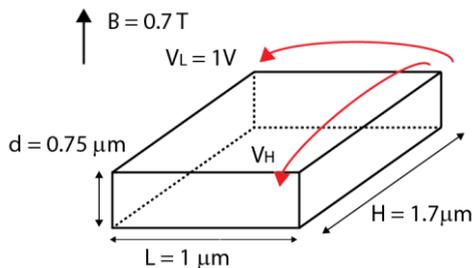


Fig. 4

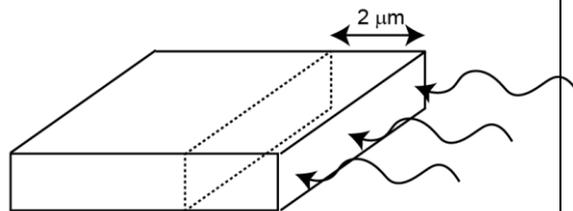


Fig. 5

- In an experiment on the photoelectric effect, a metallic electrode is irradiated with a light beam of wavelength $\lambda = 250$ nm. Evaluate (I) the metal work function, knowing that the stopping voltage absolute value is $V_0 = 0.5$ V. Calculate (II) the velocity and (III) the wavelength of electrons at the anode for an accelerating voltage $V_A = 5$ V.
- Consider a potential well with 4 confined states in **Fig. 1**. Estimate (I) the eigenvalues within the approximation of infinite potential well. Consider then the eigenfunctions $\Psi_3(x)$ e $\Psi_4(x)$ of the third and fourth eigenstate. Express (II) the wavefunction of a time-dependent state obtained from the linear combination of these 2 eigenstates with weights A_3 and A_4 , respectively. Finally, (III) calculate the oscillation frequency of the wavefunction.
- Estimate (I) the width a of the potential well in **Fig. 2**, knowing that it has a single confined eigenstate at $E_1 = 0.5$ eV and taking into consideration the finite well depth. Calculate (II) the eigenvalue for an infinite well of equal width, explaining the possible difference with respect to E_1 .
- A beam of thermal neutrons ($m_n = 1839 m_0$) has an equivalent $T = 450$ K. Neutrons impinge on a cubic crystal with lattice parameter $a = 0.7$ nm. Calculate the (I) number and angle of peaks associated with plane (111).
- Consider a hole in the valence band of energy $E(k) = E_0 + E_1 \cos ka$, with $E_0 = 1$ eV, $E_1 = 0.5$ eV and $a = 0.8$ nm. Assuming a momentum relaxation time of 10^{-13} s, calculate (I) the average position in the band k and (II) the velocity of the hole, in absolute value and direction, under a positive electric field $F = 25$ kVcm $^{-1}$.
- Consider a 2D metal with $m^* = 1.1 m_0$ and $E_F - E_{C0} = 2.5$ eV. Compute (I) the electronic density and (II) the average energy.
- Consider the semiconductor in **Fig. 3** with several minima in the conduction band. One minimum is in Γ ($m_e^* = 0.4 m_0$) while the others have $m_e^* = 0.6 m_0$, $m_e^* = 0.36 m_0$. Compute the density of states mass.
- Consider a system with Germanium, in which $E_F = E_i - 0.17$ eV. (I) What is the doping concentration of the semiconductor? (II) At what temperature the intrinsic concentration equals the extrinsic one?
- Consider the Hall Effect in **Fig. 4**. Applying a longitudinal $V_L = 1$ V at a silicon bar (doped with $N_D = 5 \times 10^{15}$ cm $^{-3}$) a current $I_L = 250$ μ A is measured. Compute (I) the module of the transversal electric field and (II) the mobility of the majority carriers.
- A silicon bar ($N_D = 10^{18}$ cm $^{-3}$) is irradiated by a constant light beam, as in **Fig. 5**, which cause an increase of the minority carriers equal to $\delta_p = 10^{12}$ cm $^{-3}$ in $x = 0$. Knowing that at a distance of 2 μ m the quasi-Fermi level of the holes is at $E_V + 0.47$ eV, give an estimation of the recombination time ($\mu_p = 430$ cm 2 V $^{-1}$ s $^{-1}$).

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}