

1. Si consideri la banda di conduzione riportata in **Fig. 1**. Noto il campo elettrico $F = 10 \text{ kVcm}^{-1}$ e il passo reticolare $a = 0.3 \text{ nm}$, si calcoli il tempo per cui un elettrone, inizialmente in $k=0$, accelera e frena tornando a velocità nulla in assenza di urti. Assumendo invece un tempo di rilassamento del momento $\tau_m = 0.1 \text{ ps}$, calcolare il momento k dell'elettrone a regime e la sua velocità
2. Un semiconduttore è descritto dalla struttura a bande mostrata in **Fig. 2**. L'assorbimento di un fotone induce la transizione diretta di un elettrone, che occupa uno stato $k_L = 1.22 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$, dalla banda di valenza delle lacune leggere ($m_{lh}^* = 0.2 m_0$) alla banda di conduzione ($m_e^* = 0.5 m_0$). Sapendo che in seguito all'assorbimento di un secondo fotone di lunghezza d'onda λ_2 un secondo elettrone proveniente dalla banda delle lacune pesanti ($m_{hh}^* = 0.75 m_0$) è promosso in banda di conduzione, determinare λ_2 affinché l'energia cinetica finale del secondo elettrone sia il doppio rispetto a quella del primo.
3. Si consideri un metallo tridimensionale la cui densità atomica $\rho_{at} = 2.33 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Sapendo che la velocità di Fermi $v_F = 1.17 \times 10^8 \text{ cms}^{-1}$ e che la massa efficace $m^* = 1.1 m_0$, si determini la valenza del metallo.
4. Si consideri in **Fig. 3** la banda di conduzione di un semiconduttore 3D con struttura cristallina cubica a facce centrate caratterizzata da un minimo che si trova a metà tra i punti ad alta simmetria Γ e X ($m_l^* = 0.6 m_0$, $m_t^* = 0.2 m_0$). Nota la concentrazione di elettroni in banda di conduzione $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, determinare la posizione del livello di Fermi a $T = 300 \text{ K}$.
5. Si consideri un semiconduttore intrinseco in germanio. Calcolare la temperatura T_1 affinché la densità di corrente aumenti di un fattore 100 rispetto a quella a temperatura ambiente.
6. Nell'esperimento di effetto Hall descritto in **Fig. 4** un semiconduttore drogato p ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), al quale è applicata una tensione longitudinale $V_L = 2.5 \text{ V}$, presenta una resistività a temperatura ambiente $\rho = 0.78 \text{ }\Omega\text{cm}$. Determinare la polarità e il valore della tensione di Hall V_H a $T = 400 \text{ K}$. Sapendo inoltre che il semiconduttore è percorso da corrente $I = 78 \text{ }\mu\text{A}$ e che il campo elettrico di saturazione $F_{SAT} = 20 \text{ kVcm}^{-1}$, si calcoli lo spessore t .
7. Si consideri un semiconduttore drogato n con struttura a bande simile a quella del silicio caratterizzato da $m_l^* = 0.8 m_0$, $m_t^* = 0.2 m_0$ e $\tau_m = 0.05 \text{ ps}$. Sapendo che la densità di corrente satura a 52.8 kAcm^{-2} per $F = 50 \text{ kVcm}^{-1}$, determinare la concentrazione di drogante donore N_D e si stimi l'energia del fonone ottico.
8. Si consideri un campione in silicio drogato n ($N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Determinare la posizione del livello donore sapendo che a $T = 300 \text{ K}$ il 99% del drogante è ionizzato.
9. Stimare la posizione del livello donore nell'arseniuro di gallio (GaAs) nota la massa efficace in banda di conduzione $m_e^* = 0.067 m_0$ e la costante dielettrica relativa $\epsilon_r = 13$.
10. Si consideri un campione in silicio drogato p ($N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) di lunghezza $L = 5 \text{ }\mu\text{m}$, larghezza $W = 2 \text{ }\mu\text{m}$ e spessore $t = 1 \text{ }\mu\text{m}$. A partire dall'istante $t = 0 \text{ s}$ viene illuminato in modo uniforme da fotoni di energia $E_{ph} = 1.5 \text{ eV}$. Sapendo che la potenza ottica assorbita $P = 24 \text{ pW}$ e che il tempo di ricombinazione dei minoritari $\tau_n = 5 \text{ }\mu\text{s}$, rappresentare in un diagramma quotato l'andamento nel tempo dei portatori maggioritari e minoritari.

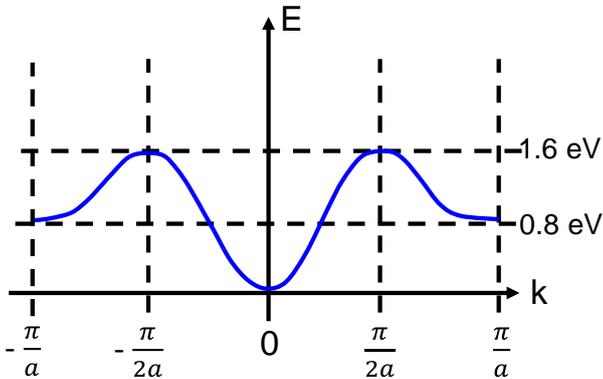


Fig. 1

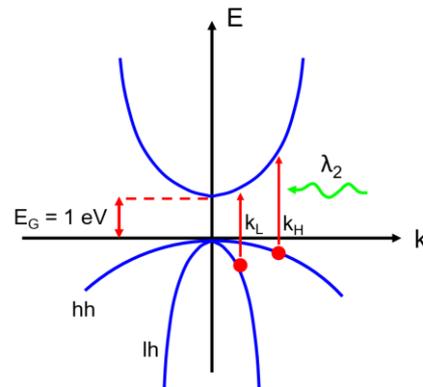


Fig. 2

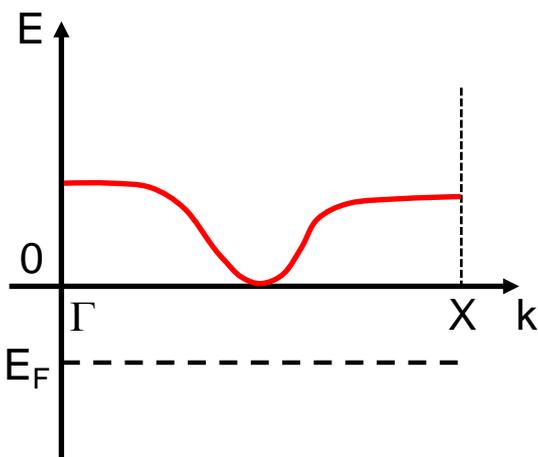


Fig. 3

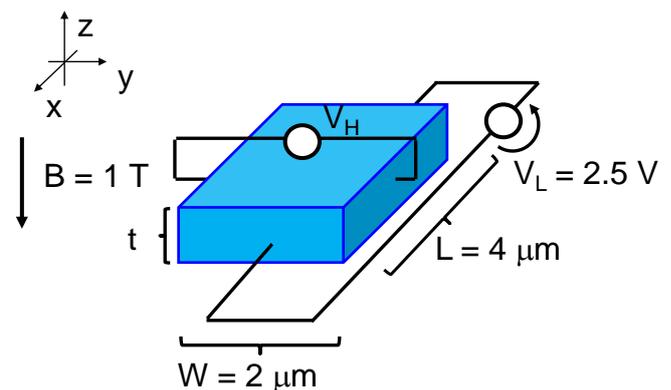


Fig. 4

- Un elettrodo metallico viene illuminato da una sorgente luminosa di lunghezza d'onda $\lambda = 188 \text{ nm}$. Nota la tensione $|V_{\text{stop}}| = 2\text{V}$, calcolare la frequenza di cut-off ν_0 . Assumendo ora di applicare tra anodo e catodo una tensione di accelerazione $V_A = 4 \text{ V}$, calcolare la velocità e la lunghezza d'onda di De Broglie dell'elettrone all'anodo.
- Calcolare la larghezza a della buca di potenziale in **Fig. 1** affinché il secondo livello quantizzato si trovi a energia $E_2 = V/2$ (si adotti l'approssimazione di buca a pareti infinite). Quanti autostati sono contenuti nella buca? Si stimi inoltre la frequenza di collisione con le pareti per lo stato a energia E_2 .
- Un elettrone con velocità $v = c/1000$ incide su un gradino di potenziale di altezza $V = 0.3 \text{ eV}$. Calcolare l'energia e la penetrazione media dell'elettrone nella barriera. Si calcoli inoltre la distanza tra la prima frangia d'interferenza e il gradino.
- Disegnare l'andamento qualitativo dell'autofunzione Ψ_1 associata al primo autostato della buca in **Fig. 2**. Determinare i parametri A e B nella formula $E_n = A \cdot n^B$ che lega l'autovalore E_n al numero quantico n . Qual è il minimo n per cui l'elettrone può tunnelare dalla buca verso sinistra.
- Con riferimento all'esercizio precedente, sapendo che un elettrone nella buca ha probabilità $P_{\text{TUN}} = 10^{-3}$, si calcoli la sua energia e si stimi la velocità con cui incide sulla barriera di sinistra.
- Si consideri la banda di conduzione riportata in **Fig. 3**. Noto il campo elettrico $F = 10 \text{ kVcm}^{-1}$ e il passo reticolare $a = 0.3 \text{ nm}$, si calcoli il tempo per cui un elettrone, inizialmente in $k=0$, accelera e frena tornando a velocità nulla in assenza di urti. Assumendo invece un tempo di rilassamento del momento $\tau_m = 0.1 \text{ ps}$, calcolare il momento k dell'elettrone a regime e la sua velocità.
- Si consideri un semiconduttore intrinseco in germanio. Calcolare la temperatura T_1 affinché la densità di corrente J aumenti di un fattore 100 rispetto a quella a temperatura ambiente.
- Nell'esperimento di effetto Hall descritto in **Fig. 4** un semiconduttore drogato p ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), al quale è applicata una tensione longitudinale $V_L = 2.5 \text{ V}$, presenta una resistività a temperatura ambiente $\rho = 0.78 \text{ }\Omega\text{cm}$. Determinare la polarità e il valore della tensione di Hall V_H a $T=400 \text{ K}$. Sapendo inoltre che il semiconduttore è percorso da corrente $I=78 \text{ }\mu\text{A}$ e che il campo elettrico di saturazione $F_{\text{SAT}} = 20 \text{ kVcm}^{-1}$, si calcoli lo spessore t .
- Si consideri un campione in silicio drogato n ($N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Determinare la posizione del livello donore sapendo che a $T= 300 \text{ K}$ il 99% del drogante è ionizzato.
- Si consideri un campione in silicio drogato p ($N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) di lunghezza $L=5 \text{ }\mu\text{m}$, larghezza $W=2 \text{ }\mu\text{m}$ e spessore $t=1 \text{ }\mu\text{m}$. A partire dall'istante $t = 0 \text{ s}$ viene illuminato in modo uniforme da fotoni di energia $E_{\text{ph}} = 1.5 \text{ eV}$. Sapendo che la potenza ottica assorbita $P = 24 \text{ pW}$ e che il tempo di ricombinazione dei minoritari $\tau_n = 5 \text{ }\mu\text{s}$, rappresentare in un diagramma quotato l'andamento nel tempo dei portatori maggioritari e minoritari.

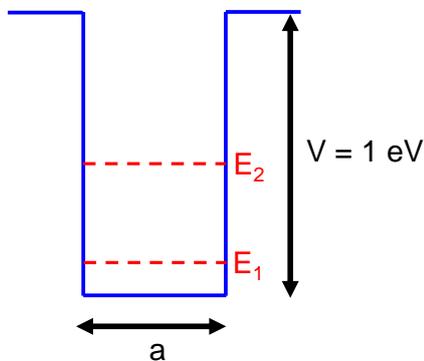


Fig. 1

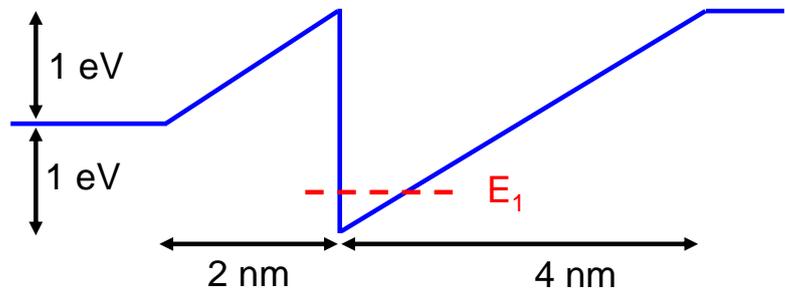


Fig. 2

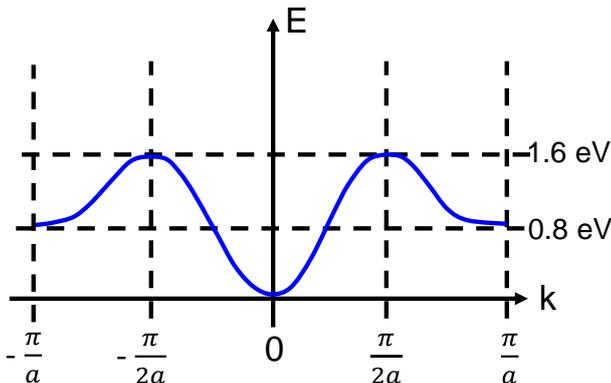


Fig. 3

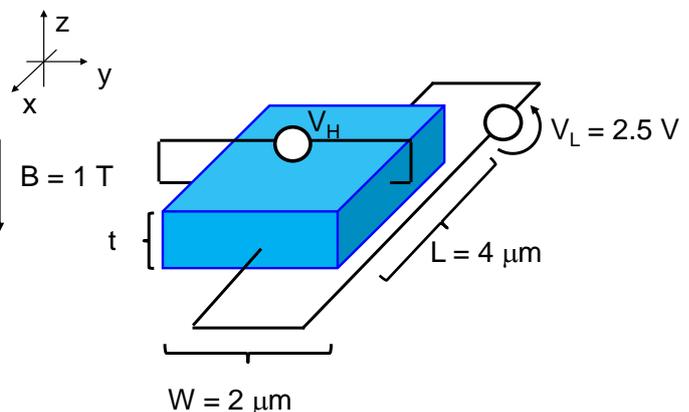


Fig. 4

1. Consider the conduction band shown in **Fig. 1**. Given the electric field $F = 10 \text{ kVcm}^{-1}$ and the lattice parameter $a = 0.3 \text{ nm}$, calculate time an electron, initially located in $k=0$, takes to accelerate and slow down returning with zero velocity without collisions. Otherwise, assuming a momentum relaxation time $\tau_m = 0.1 \text{ ps}$, calculate the stationary electron momentum k and its velocity.
2. A semiconductor is described by band diagram shown in **Fig. 2**. The absorption of a photon of wavelength induces a direct transition of an electron in $k_L = 1.22 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$ from light hole (lh, $m_{lh}^* = 0.2 m_0$) valence band to the conduction band ($m_e^* = 0.5 m_0$). Knowing that the absorption of another photon of wavelength λ_2 involves a direct electron transition from the heavy hole valence band (hh, $m_{hh}^* = 0.75 m_0$) to the conduction band, evaluate λ_2 such that the final kinetic energy of second electron is twice as the one of first electron.
3. Consider a 3D metal of atomic density $\rho_{at} = 2.33 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Knowing that the Fermi velocity $v_F = 1.17 \times 10^8 \text{ cms}^{-1}$ and electron effective mass $m^* = 1.1 m_0$, determine the valency of the metal.
4. Consider the conduction band of a 3D semiconductor with a fcc structure in **Fig. 3** having an energy minimum between Γ and X points ($m_l^* = 0.6 m_0$, $m_t^* = 0.2 m_0$). Given the electron concentration in the conduction band $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, determine the Fermi energy at room temperature.
5. Consider a Ge intrinsic semiconductor. Calculate the temperature T_1 such that the current density J increases by a factor 100 compared to current density at room temperature.
6. In the Hall experiment represented in **Fig. 4** a p-doped semiconductor ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), on which is applied a longitudinal voltage $V_L = 2.5 \text{ V}$, has resistivity at $T = 300 \text{ K}$ $\rho = 0.78 \text{ }\Omega\text{cm}$. Determine the polarity and the value of Hall voltage V_H at $T = 400 \text{ K}$. In addition, knowing that a current $I = 78 \text{ }\mu\text{A}$ flows and the saturation electric field $F_{SAT} = 20 \text{ kVcm}^{-1}$, calculate the semiconductor thickness t .
7. Consider a n-doped semiconductor with band structure similar to one of silicon with $m_l^* = 0.8 m_0$, $m_t^* = 0.2 m_0$ and $\tau_m = 0.05 \text{ ps}$. Knowing that saturation current density is equal to 52.8 kAcm^{-2} for an electric field $F = 50 \text{ kVcm}^{-1}$, determine the doping concentration N_D and estimate the optical phonon energy.
8. Consider a n-doped Si sample ($N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Determine the donor level position knowing that the doping ionizing fraction is equal to 99% at room temperature.
9. Estimate the donor level position in gallium arsenide (GaAs) given the effective mass in conduction band $m_e^* = 0.067 m_0$ and the relative permittivity $\epsilon_r = 13$.
10. Consider a p-doped Si sample ($N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) of length $L = 5 \mu\text{m}$, width $W = 2 \mu\text{m}$ and thickness $t = 1 \mu\text{m}$. Starting from $t = 0 \text{ s}$, the semiconductor material is uniformly irradiated by photons of energy $E_{ph} = 1.5 \text{ eV}$. Knowing that the absorbed optical power $P = 24 \text{ pW}$ and minority carrier lifetime $\tau_n = 5 \mu\text{s}$, draw the time evolution of minority and majority carriers.

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	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}

1. A metal electrode is irradiated by a light source of wavelength $\lambda = 188 \text{ nm}$. Given the stopping voltage $|V_{\text{stop}}| = 2\text{V}$, calculate the cut-off frequency ν_0 . In addition, assuming that an accelerating voltage $V_A = 4\text{V}$ is applied between electrodes, evaluate the electron velocity and De Broglie wavelength at anode.
2. Calculate the width a of potential well in **Fig. 1** such that the second eigenvalue $E_2 = V/2$ (use the infinite well approximation). How many eigenstates are allowed in the well? In addition, estimate the collision frequency with the walls for the eigenstate of energy E_2 .
3. An electron with velocity $v=c/1000$ hits a step of height $V= 0.3 \text{ eV}$. Calculate the electron energy and average penetration distance in the barrier. In addition, calculate the spacing between the first interference fringe and the step.
4. Sketch the qualitative behavior of eigenfunction Ψ_1 corresponding to the first eigenstate of the well shown in **Fig. 2**. Determine the parameter A and B in the formula $E_n = A \cdot n^B$ describing the eigenstate energy E_n as a function of quantum number n . Calculate the minimum value of n such that the electron can tunnel from the well to the left.
5. With reference to the previous exercise, knowing that electron tunnel probability to the left $P_{\text{TUN}} = 10^{-3}$, estimate the electron energy and the electron velocity as it impinges on the left barrier.
6. Consider the conduction band shown in **Fig. 3**. Given the electric field $F = 10 \text{ kVcm}^{-1}$ and the lattice parameter $a = 0.3\text{nm}$, calculate time an electron, initially located in $k=0$, takes to accelerate and slow down returning with zero velocity without collisions. Otherwise, assuming a momentum relaxation time $\tau_m = 0.1 \text{ ps}$, calculate the stationary electron momentum k and its velocity.
7. Consider a Ge intrinsic semiconductor. Calculate the temperature T_1 such that the current density J increases by a factor 100 compared to current density at room temperature.
8. In the Hall experiment represented in **Fig. 4** a p-doped semiconductor ($N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), on which is applied a longitudinal voltage $V_L = 2.5 \text{ V}$, has resistivity at $T = 300 \text{ K}$ $\rho = 0.78 \text{ }\Omega\text{cm}$. Determine the polarity and value of Hall voltage V_H at $T=400 \text{ K}$. In addition, knowing that a current $I = 78 \text{ }\mu\text{A}$ flows, calculate the semiconductor thickness t .
9. Consider a n-doped Si sample ($N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Determine the donor level position knowing that doping ionizing fraction is 99% at $T= 300 \text{ K}$.
10. Consider a p-doped Si sample ($N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) of length $L= 5\mu\text{m}$, width $W= 2\mu\text{m}$ and thickness $t= 1\mu\text{m}$. Starting from $t = 0 \text{ s}$, the semiconductor material is uniformly irradiated by photons of energy $E_{\text{ph}} = 1.5 \text{ eV}$. Knowing that the absorbed optical power $P = 24 \text{ pW}$ and minority carrier lifetime $\tau_n = 5 \text{ }\mu\text{s}$, draw the time evolution of minority and majority carriers.

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	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}