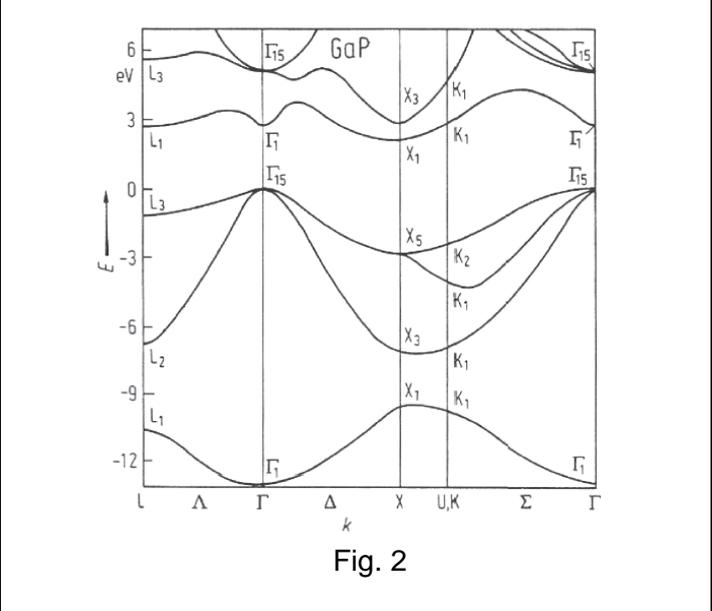
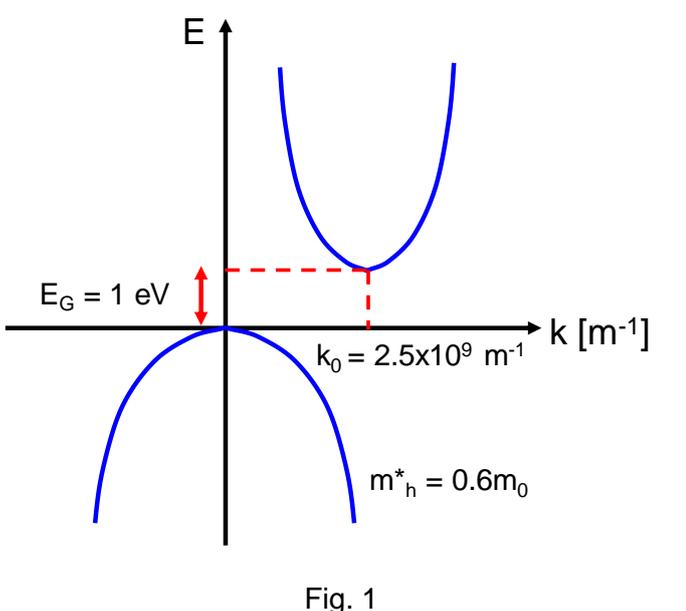


1. Si consideri un semiconduttore monodimensionale la cui banda di conduzione è descritta dalla relazione di dispersione $E(k) = E_0 \cdot (1 - \cos(ka))$. In presenza di eventi scattering l'azione di un campo elettrico esterno $F = 200 \text{ Vcm}^{-1}$ porta un pacchetto di elettroni, inizialmente sul fondo banda, ad assumere a regime un momento cristallino $k_{STAZ} = 0.01 \cdot k_{IBZ}$, con k_{IBZ} estremità della prima zona di Brillouin. Noto il periodo delle oscillazioni di Bloch $T_B = 0.46 \text{ ns}$, calcolare il passo reticolare a e determinare il numero di oscillazioni di Bloch osservabili.
2. Si consideri la struttura a bande di un semiconduttore a gap indiretto mostrata in **Fig. 1**. Sapendo che la transizione diretta a minima energia dalla banda di valenza a quella di conduzione ha luogo in $k_t = 1.5 \times 10^9 \text{ m}^{-1}$, determinare la velocità dell'elettrone dopo la transizione e la lunghezza d'onda λ del fotone assorbito. In seguito, l'elettrone rilassa sul fondo banda interagendo con dei fononi. Nota l'energia del singolo fonone $E_{\text{phonon}} = 30 \text{ meV}$, calcolare quanti fononi sono generati in media e il loro momento cristallino medio k_{phonon} .
3. Si consideri un metallo 3D in oro di cui sono elencate alcune proprietà fisiche d'interesse: numero atomico $Z = 79$, configurazione elettronica $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$, reticolo cubico a facce centrate (FCC), passo reticolare $a = 408 \text{ pm}$, resistività $\rho_{300\text{K}} = 2.2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Calcolare l'energia media $\langle E \rangle$ [eV] degli elettroni in banda di conduzione a temperatura $T = 600 \text{ K}$ e la temperatura di Fermi T_F del metallo sapendo che la massa efficace degli elettroni in banda di conduzione $m^*_e = m_0$. Si giustificino eventuali approssimazioni.
4. Facendo riferimento ai dati riportati nel precedente esercizio, calcolare il tempo di rilassamento del momento τ_m a temperatura ambiente.
5. Si consideri un semiconduttore tridimensionale a temperatura ambiente con il livello di Fermi E_F distante 130 meV dal fondo della banda di conduzione E_C . Determinare quale tra i due livelli energetici $E_1 = E_C + \frac{1}{4} kT$ ed $E_2 = E_C + 10 kT$ è caratterizzato da una maggiore densità elettronica (per unità di volume e di energia).
6. Si consideri la struttura a bande del fosforo di gallio (GaP) riportata in **Fig. 2**. Noti i seguenti parametri: energy gap $E_G = 2.26 \text{ eV}$, massa efficace delle lacune pesanti/leggere $m^*_{hh} = 0.79 \cdot m_0 / m^*_{lh} = 0.14 \cdot m_0$, massa efficace longitudinale/trasversale degli elettroni in banda di conduzione $m^*_l = 1.12 \cdot m_0 / m^*_t = 0.22 \cdot m_0$, tempo di rilassamento del momento $\tau_m = 30 \text{ fs}$, determinare se il fosforo di gallio è un semiconduttore a gap diretto o indiretto, la concentrazione intrinseca n_i a $T = 300 \text{ K}$ e la mobilità elettronica μ_n alla medesima temperatura.
7. Si consideri un semiconduttore intrinseco in silicio a temperatura ambiente. Di che fattore dovrebbe variare la massa longitudinale degli elettroni in banda di conduzione per causare un incremento di 9 meV del livello di Fermi intrinseco?
8. Si consideri un semiconduttore in silicio all'equilibrio termodinamico ($T = 300 \text{ K}$) dove il drogaggio donore varia lungo x secondo la relazione $N_D(x) = N_{D0} \cdot \exp(-x/L)$, dove $L = 100 \text{ nm}$, $N_{D0} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ e $\mu_n = 800 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. Stimare la lunghezza entro cui il semiconduttore risulta estrinseco e rappresentare in un grafico quotato l'andamento spaziale della densità di corrente di deriva/diffusione e delle bande di energia.
9. Si consideri un campione in silicio drogato n a temperatura $T = -93^\circ\text{C}$. Nota la probabilità di ionizzazione $p_i = 75\%$ e l'energia di legame pari a 12 meV , determinare la concentrazione di droganti donori N_D .
10. Un semiconduttore in germanio con drogaggio accettore ($N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) è illuminato a temperatura ambiente da un fascio di luce che induce un eccesso superficiale di portatori. Sapendo che il quasi livello di Fermi dei minoritari $F_n(x)$ varia lungo x con un gradiente $|dF_n/dx| = 8.625 \text{ eV/cm}$ e dista 300 meV dal minimo della banda di conduzione in $x = 140 \mu\text{m}$, calcolare la mobilità degli elettroni e l'eccesso di portatori fotogenerato in superficie verificando il regime di bassa iniezione. Si rappresenti inoltre il profilo spaziale dei quasi livelli di Fermi $F_n(x)$ e $F_p(x)$ lungo il semiconduttore. Si assuma il tempo di vita dei minoritari $\tau_n = 0.35 \mu\text{s}$.



1. Il ferro è un elemento caratterizzato da un reticolo cubico a corpo centrato (BCC). Si calcoli il raggio atomico sapendo che la densità atomica è $\rho_{at} = 8.5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.
2. Si consideri un esperimento di effetto fotoelettrico dove l'applicazione di una sorgente luminosa su un campione metallico ha come effetto il passaggio di una corrente $I = 10 \text{ mA}$. Noti il potenziale di stopping $V_{stop} = -2.75 \text{ V}$ e la frequenza di soglia $\nu_{th} = 534 \text{ THz}$, calcolare la potenza ottica della sorgente. Si assuma un'efficienza quantica $\eta_q = 0.5$.
3. Si consideri la buca di potenziale di altezza $W = 3 \text{ eV}$ mostrata in **Fig. 1**. Nota la lunghezza di penetrazione dell'autofunzione riferita al terzo stato confinato $x_{D,3} = 1.4 \text{ \AA}$, calcolare la larghezza b della buca e il numero massimo di stati confinati. Si adotti l'approssimazione di buca a pareti infinite.
4. Si consideri un elettrone di energia E incidente sulle due barriere di potenziale di altezza V riportate in **Fig. 2**. Calcolare il rapporto E/V tale che la probabilità di tunneling P_{t1} sia uguale a P_{t2} .
5. Si consideri un elettrone nella buca di potenziale 2D mostrata in **Fig. 3** dove $a = b/3$. Calcolare i primi 10 autovalori al crescere dell'energia, indicandone la degenerazione.
6. Si consideri un metallo 3D in oro di cui sono elencate alcune proprietà fisiche d'interesse: numero atomico $Z = 79$, configurazione elettronica $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$, reticolo cubico a facce centrate (FCC), passo reticolare $a = 408 \text{ pm}$, resistività $\rho_{300K} = 2.2 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm}$. Calcolare l'energia media $\langle E \rangle$ [eV] degli elettroni in banda di conduzione a temperatura $T = 600 \text{ K}$ e la temperatura di Fermi T_F del metallo sapendo che la massa efficace degli elettroni in banda di conduzione $m^*_e = m_0$. Si giustificino eventuali approssimazioni.
7. Si consideri un semiconduttore intrinseco in silicio a temperatura ambiente. Di che fattore dovrebbe variare la massa longitudinale degli elettroni in banda di conduzione per causare un incremento di 9 meV del livello di Fermi intrinseco?
8. Si consideri un semiconduttore in silicio all'equilibrio termodinamico ($T = 300 \text{ K}$) dove il drogaggio donore varia lungo x secondo la relazione $N_D(x) = N_{D0} \cdot \exp(-x/L)$, dove $L = 100 \text{ nm}$, $N_{D0} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ e $\mu_n = 800 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Stimare la lunghezza entro cui il semiconduttore risulta estrinseco e rappresentare in un grafico quotato l'andamento spaziale della densità di corrente di deriva/diffusione e delle bande di energia.
9. Si consideri un campione in silicio drogato n a temperatura $T = -93^\circ\text{C}$. Nota la probabilità di ionizzazione $p_i = 75\%$ e l'energia di legame pari a 12 meV , determinare la concentrazione di droganti donori N_D .
10. Un semiconduttore in germanio con drogaggio accettore ($N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) è illuminato a temperatura ambiente da un fascio di luce che induce un eccesso superficiale di portatori (**Fig. 4**). Sapendo che il quasi livello di Fermi dei minoritari $F_n(x)$ varia lungo x con un gradiente $|dF_n/dx| = 8.625 \text{ eV/cm}$ e dista 300 meV dal minimo della banda di conduzione in $x = 140 \text{ }\mu\text{m}$, calcolare la mobilità degli elettroni e l'eccesso di portatori fotogenerato in superficie verificando il regime di bassa iniezione. Si rappresenti inoltre il profilo spaziale dei quasi livelli di Fermi $F_n(x)$ e $F_p(x)$ lungo il semiconduttore. Si assuma il tempo di vita dei minoritari $\tau_n = 0.35 \text{ }\mu\text{s}$

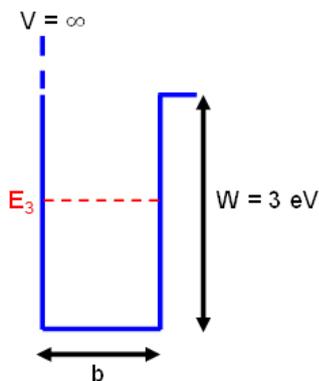


Fig. 1

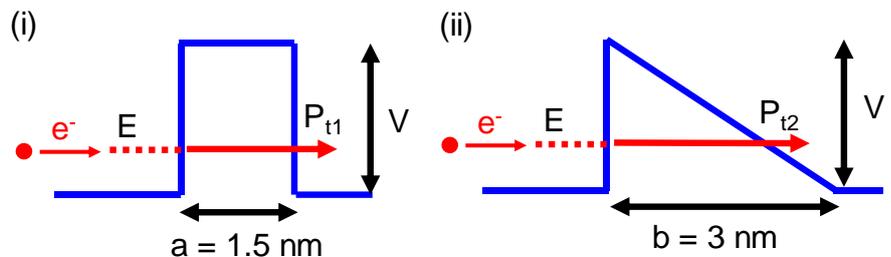


Fig. 2

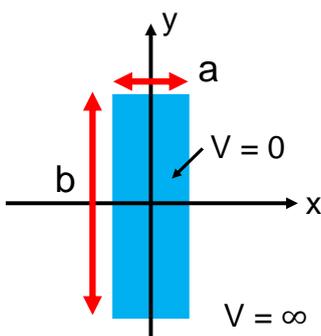


Fig. 3

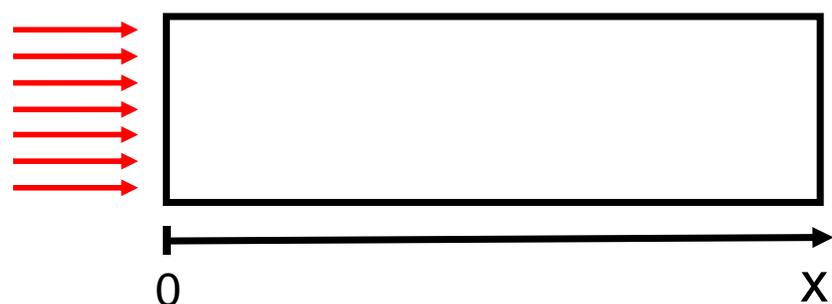


Fig. 4

1. Consider the conduction band of a 1D semiconductor with dispersion law $E(k) = E_0 \cdot (1 - \cos(ka))$. Because of scattering with phonons, an electron packet driven by an external electric field $F = 200 \text{ Vcm}^{-1}$ moves from the minimum of conduction band reaching a stationary momentum $k_{\text{STAZ}} = 0.01 \cdot k_{\text{BZ}}$, where k_{BZ} denotes the edge of first Brillouin zone. Given the Bloch oscillation period $T_B = 0.46 \text{ ns}$, calculate the lattice parameter a and determine the number of visible Bloch oscillations.
2. Consider the band structure of an indirect bandgap semiconductor shown in **Fig. 1**. Knowing that the direct transition at minimum energy from valence to conduction band occurs at $k_t = 1.5 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1}$, determine the electron velocity at the end of transition and the wavelength λ of absorbed photon. Then, the electron relaxes at the bottom of conduction band emitting phonons. Given the single phonon energy $E_{\text{phonon}} = 30 \text{ meV}$, calculate how many phonons are emitted on average and their average crystal momentum k_{phonon} .
3. Consider a 3D gold metal with the following physical properties: atomic number $Z = 79$, electron configuration $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$, face-centered cubic (FCC) lattice, lattice constant $a = 408 \text{ pm}$, resistivity $\rho_{300\text{K}} = 2.2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Calculate the average energy $\langle E \rangle$ [eV] of conduction electrons at $T = 600 \text{ K}$ and the Fermi temperature T_F knowing that the effective mass in conduction band is $m_e^* = m_0$. Explain possible approximations.
4. With reference to data listed in the previous exercise, calculate the momentum relaxation time τ_m at room temperature.
5. Consider a 3D semiconductor at room temperature with the Fermi energy level E_F located 130 meV below the minimum of conduction band. Determine which energy level between $E_1 = E_C + \frac{1}{4} kT$ and $E_2 = E_C + 10 kT$ has the highest electron density (per unit of volume and energy).
6. Consider the Gallium Phosphide (GaP) band structure shown in **Fig. 2**. Given the following physical parameters: energy gap $E_G = 2.26 \text{ eV}$, effective mass for heavy/light holes $m_{\text{hh}}^* = 0.79 \cdot m_0 / m_{\text{lh}}^* = 0.14 \cdot m_0$, longitudinal/transverse effective mass for conduction electrons $m_l^* = 1.12 \cdot m_0 / m_t^* = 0.22 \cdot m_0$, momentum relaxation time $\tau_m = 30 \text{ fs}$, determine if the GaP semiconductor has direct or indirect bandgap, the intrinsic concentration n_i at $T = 300 \text{ K}$ and the electron mobility μ_n at the same temperature.
7. Consider a silicon intrinsic semiconductor at room temperature. How should the longitudinal mass of conduction electrons change to induce an energy increase of 9 meV for the intrinsic Fermi energy?
8. Consider a silicon semiconductor at thermal equilibrium ($T = 300 \text{ K}$) with a donor doping profile $N_D(x) = N_{D0} \cdot \exp(-x/L)$, where $L = 100 \text{ nm}$, $N_{D0} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $\mu_n = 800 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Estimate the length within which the semiconductor has extrinsic behavior and draw the profiles of drift/diffusion current density and energy bands.
9. Consider a n-doped silicon sample at temperature $T = -93^\circ\text{C}$. Given the ionization probability $p_i = 75\%$ and the binding energy equal to 12 meV, calculate the donor doping concentration N_D .
10. A p-doped germanium semiconductor ($N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) is irradiated at room temperature by a light beam inducing a carrier excess at the surface. Knowing that the quasi Fermi level of minority carriers $F_n(x)$ changes with a spatial gradient $|dF_n/dx| = 8.625 \text{ eV/cm}$ and it is distant 300 meV from E_C at $x = 140 \mu\text{m}$, calculate the electron mobility and the photogenerated carrier excess at the surface verifying the low injection regime. Draw the profile of quasi Fermi levels $F_n(x)$ and $F_p(x)$ within the semiconductor. Assume that the minority recombination time is $\tau_n = 0.35 \mu\text{s}$.

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. Iron is a metal with body-centered cubic lattice (BCC). Calculate the atomic radius knowing that the atomic density is $\rho_{\text{at}} = 8.5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$.
2. Consider a photoelectric effect experiment where the application of a light source on a metal sample induces a current $I = 10 \text{ mA}$. Given the stopping voltage $V_{\text{stop}} = -2.75 \text{ V}$ and the threshold frequency $\nu_{\text{th}} = 534 \text{ THz}$, calculate the light source power considering a quantum efficiency $\eta_q = 0.5$.
3. Consider the potential well of height $W = 3 \text{ eV}$ shown in **Fig. 1**. Given the penetration distance for the third eigenstate $x_{D,3} = 1.4 \text{ \AA}$, calculate the well width b and the maximum number of allowed eigenstates. Use the infinite well approximation.
4. Consider an electron of energy E incident on the potential barriers of height V shown in **Fig. 2**. Calculate the ratio E/V so that the tunneling probability P_{T1} is equal to P_{T2} .
5. Consider an electron in the 2D potential well shown in **Fig. 3** where $a = b/3$. Calculate the first 10 eigenvalues at increasing energy indicating their degeneracy.
6. Consider a 3D gold metal with the following physical properties: atomic number $Z = 79$, electron configuration $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^1$, face-centered cubic (FCC) lattice, lattice constant $a = 408 \text{ pm}$, resistivity $\rho_{300\text{K}} = 2.2 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$. Calculate the average energy $\langle E \rangle$ [eV] of conduction electrons at $T = 600 \text{ K}$ and the Fermi temperature T_F knowing that the effective mass in conduction band is $m_e^* = m_0$. Explain possible approximations.
7. Consider a silicon intrinsic semiconductor at room temperature. How should the longitudinal mass of conduction electrons change to induce an energy increase of 9 meV for the intrinsic Fermi energy?
8. Consider a silicon semiconductor at thermal equilibrium ($T = 300 \text{ K}$) with a donor doping profile $N_D(x) = N_{D0} \cdot \exp(-x/L)$, where $L = 100 \text{ nm}$, $N_{D0} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $\mu_n = 800 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Estimate the length within which the semiconductor has extrinsic behavior and draw the profiles of drift/diffusion current densities and energy bands.
9. Consider a n-doped silicon sample at temperature $T = -93^\circ\text{C}$. Given the ionization probability $p_i = 75\%$ and the binding energy equal to 12 meV , calculate the donor doping concentration N_D .
10. A p-doped germanium semiconductor ($N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) is irradiated at room temperature by a light beam inducing a carrier excess at the surface (**Fig. 4**). Knowing that the quasi Fermi level of minority carriers $F_n(x)$ changes with a spatial gradient $|dF_n/dx| = 8.625 \text{ eV/cm}$ and it is distant 300 meV from E_C at $x = 140 \text{ }\mu\text{m}$, calculate the electron mobility and the photogenerated carrier excess at the surface, verifying the low injection regime. Draw the profile of quasi Fermi levels $F_n(x)$ and $F_p(x)$ within the semiconductor. Assume that the minority recombination time is $\tau_n = 0.35 \text{ }\mu\text{s}$.

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}