

- Si consideri un reticolo cubico semplice in **Fig. 1**. Rappresentare i piani cristallini con indici di Miller $(1\ 1\ 0)$ e $(2\ 2\ \bar{1})$.
- Si consideri un fascio di raggi X di energia $E = 2.5$ keV. Si calcoli la tensione di accelerazione V_A necessaria per generare un fascio di elettroni aventi lunghezza d'onda di de Broglie uguale alla lunghezza d'onda dei raggi X.
- Si consideri il potenziale mostrato in **Fig. 2**. Noti i parametri $E_1 = 0.2$ eV, $V_1 = 1.2$ eV, $V_2 = 2.5$ eV, $a = 1$ nm e $b = 1.5$ nm, determinare l'energia E_2 affinché il rapporto tra la probabilità di tunneling dell'elettrone e_2 e la probabilità di tunneling dell'elettrone e_1 sia uguale a 10^{12} . Si adotti l'approssimazione WKB.
- Si consideri la buca triangolare mostrata in **Fig. 3**. Noti i parametri $V = 3$ eV ed $a = 2$ nm, si stimi (i) l'energia dell'autostato fondamentale E_1 , (ii) l'energia del quinto autostato E_5 e (iii) l'incertezza sulla posizione di un elettrone che occupa il quinto autostato confinato.
- Si consideri nuovamente la buca triangolare in **Fig. 3**. Si tracci in modo qualitativo il modulo quadro dell'autofunzione $\Psi_5(x)$ associata al quinto autostato confinato giustificandone l'andamento.
- Si consideri l'assorbimento di un fotone di energia $E = 2$ eV in un semiconduttore monodimensionale a gap diretto con bande di conduzione ($m^*_e = 0.2m_0$) e di valenza ($m^*_h = 0.75m_0$) paraboliche (**Fig. 4**). Sapendo che una volta raggiunta la banda di conduzione l'elettrone termalizza a fondo banda emettendo in media 10 fononi ($E_{phn} = 40$ meV), calcolare il gap di energia E_G del semiconduttore.
- Si consideri un elettrone in un solido cristallino monodimensionale descritto dalla banda di conduzione mostrata in **Fig. 5**. Si rappresenti qualitativamente l'andamento della velocità di gruppo dell'elettrone v_g in funzione di k giustificandone l'andamento. L'elettrone avrà la stessa mobilità in $k = 0$ e in $k = \frac{\pi}{a}$?
- Si consideri un semiconduttore tridimensionale a temperatura ambiente con struttura a bande simile a quella del silicio. Nota la densità efficace di stati in banda di conduzione $N_c = 2.2 \cdot 10^{19}$ cm $^{-3}$, la massa efficace trasversale $m^*_t = 0.15m_0$ e la mobilità elettronica $\mu_n = 848$ cm 2 V $^{-1}$ s $^{-1}$, si determini il tempo di rilassamento del momento τ_m .
- Si consideri un semiconduttore in silicio drogato n ($N_D = 10^{17}$ cm $^{-3}$) dove gli stati donori nel gap ad energia E_D distano 25 meV dal fondo della banda di conduzione. Si stimi la temperatura di freeze-out T_{FO} definita come la temperatura per cui $E_F = E_D$.
- Si consideri il medesimo semiconduttore dell'esercizio precedente a temperatura ambiente. Si calcoli il tasso di variazione del livello di Fermi con la temperatura dE_F/dT .

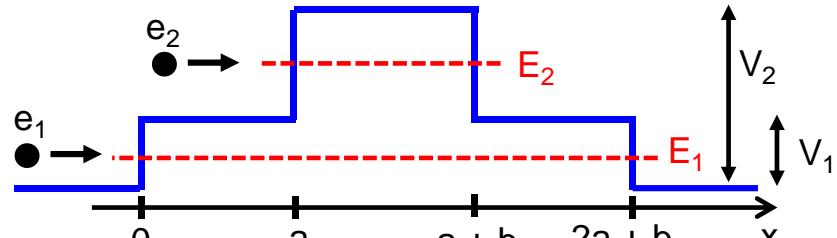
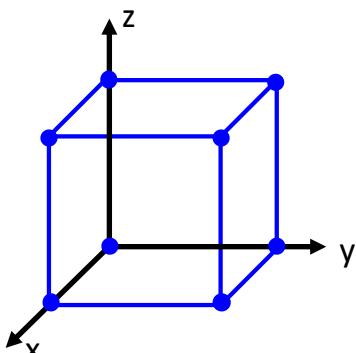


Fig. 1

Fig. 2

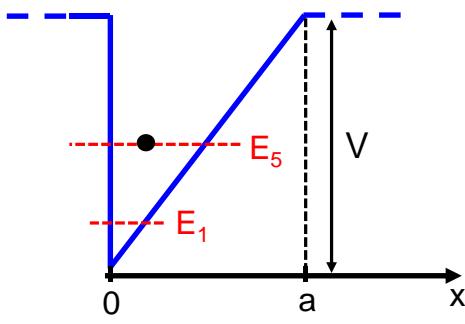


Fig. 3

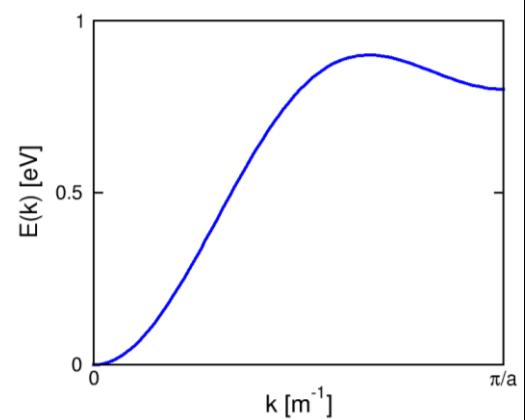
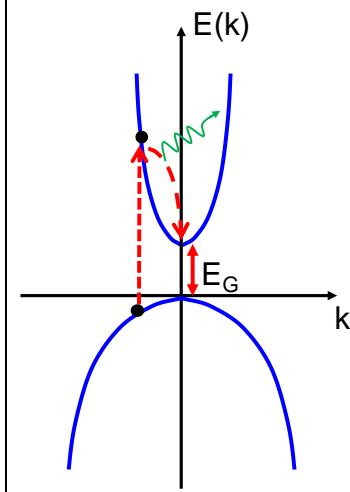


Fig. 5

1. Consider a simple cubic lattice shown in **Fig. 1**. Draw the crystal plane with Miller indices $(1\ 1\ 0)$ and $(2\ 2\ \bar{1})$.
2. Consider an X-ray beam of energy $E = 2.5$ keV. Calculate the accelerating voltage V_A to yield an electron beam with DeBroglie wavelength equal to the X-ray wavelength.
3. Consider the potential profile shown in **Fig. 2**. Given the parameters $E_1 = 0.2$ eV, $V_1 = 1.2$ eV, $V_2 = 2.5$ eV, $a = 1$ nm and $b = 1.5$ nm, determine the energy E_2 so that the ratio between the tunneling probability of electron e_2 and the tunneling probability of electron e_1 is equal to 10^{12} . Use the WKB approximation.
4. Consider the triangular potential well shown in **Fig. 3**. Given the parameters $V = 3$ eV and $a = 2$ nm, estimate (i) the energy of first eigenstate E_1 , (ii) the energy of fifth eigenstate E_5 and (iii) the spatial uncertainty of an electron that occupies the fifth eigenstate.
5. Consider the triangular well in **Fig. 3** again. Draw qualitatively the square modulus of eigenfunction $\Psi_5(x)$ by explaining its spatial behavior.
6. Consider the absorption of a single photon with energy $E = 2$ eV in a 1D direct bandgap semiconductor with parabolic energy conduction ($m^*_e = 0.2m_0$) and valence ($m^*_h = 0.75m_0$) bands (**Fig. 4**). Knowing that the electron decays at the bottom by emitting 10 phonons on average ($E_{phn} = 40$ meV) after the absorption transition, calculate the semiconductor energy bandgap E_G .
7. Consider an electron in a crystal lattice with the conduction band shown in **Fig. 5**. Draw qualitatively the electron group velocity $v_g(k)$ explaining its behavior. Does the electron have the same mobility in $k = 0$ and $k = \frac{\pi}{a}$?
8. Consider a 3D semiconductor at room temperature with band structure similar to the one of silicon. Given the effective density of states in the conduction band $N_C = 2.2 \cdot 10^{19}$ cm⁻³, the transverse effective mass $m^*_t = 0.15m_0$ and the electron mobility $\mu_n = 848$ cm²V⁻¹s⁻¹, calculate the momentum relaxation time τ_m .
9. Consider an n-doped silicon semiconductor sample ($N_D = 10^{17}$ cm⁻³) where the donor states in the bandgap at energy E_D are located 25 meV below the bottom of conduction band. Estimate the freeze-out temperature T_{FO} defined as the temperature so that $E_F = E_D$.
10. Consider the semiconductor sample of previous exercise at room temperature. Calculate the derivative of Fermi energy level with respect to the temperature dE_F/dT .

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}