

1. Si consideri una cavità all'equilibrio a temperatura  $T = 1000$  K. Calcolare la lunghezza d'onda  $\lambda$  per cui il corrispondente modo risulta mediamente occupato da 5 fotoni e l'energia media del modo vibrazionale considerato.
2. Si considerino le due buche di potenziale a pareti infinite di larghezza rispettivamente  $a$  (buca 1) e  $b$  (buca 2) rappresentate in **Fig. 1**. Determinare la relazione tra  $a$  e  $b$  affinché la lunghezza d'onda  $\lambda_a$  del fotone emesso a causa del rilassamento di un elettrone tra il sesto e il secondo stato confinato della prima buca sia la metà della lunghezza d'onda  $\lambda_b$  del fotone emesso per il rilassamento di un elettrone tra il terzo e il primo livello confinato della seconda buca.
3. Si consideri la buca parabolica di altezza  $V = 2.5$  eV mostrata in **Fig. 2**. Nota la lunghezza d'onda del fotone di rilassamento  $\lambda_{3-0} = 1 \mu\text{m}$ , determinare il numero di stati elettronici confinati e disegnare l'andamento delle corrispondenti autofunzioni  $\varphi(x)$ .
4. Si consideri un elettrone libero descritto dalla funzione d'onda  $\Psi_1(x, t) = Ae^{i(k_1x - \omega_1t)}$ . Nota la lunghezza d'onda di De Broglie  $\lambda_1 = 2.745 \text{ \AA}$ , determinare la funzione d'onda  $\Psi_2(x, t)$  di un secondo elettrone libero avente pari flusso di probabilità ed energia  $E_2 = \frac{1}{4} E_1$ .
5. Si considerino elettroni di energia  $E$  diretti nel verso delle  $x$  crescenti che incontrano il profilo di potenziale a gradino di altezza  $V$  mostrato in **Fig. 3**. Rappresentare in modo qualitativo l'andamento delle autofunzioni (parte reale, o parte immaginaria) nelle due regioni in un dato istante di tempo specificandone le principali caratteristiche. Si tracci inoltre l'andamento qualitativo del modulo quadro della funzione d'onda.
6. Un pacchetto elettronico popola la banda di conduzione di un semiconduttore descritta dalla relazione di dispersione  $E(k) = \frac{E_0}{2} [1 - \cos(ka)]$ , con  $E_0 = 2$  eV e  $a = 0.4$  nm. In seguito all'applicazione di un campo elettrico  $F = 15$  kVcm<sup>-1</sup> e all'effetto dello scattering fononico, il pacchetto in esame si colloca a regime in  $k_0 = 5 \cdot 10^8$  m<sup>-1</sup>. Calcolare il tempo di rilassamento del momento  $\tau_m$  e la mobilità  $\mu$  degli elettroni.
7. Si considerino due campioni metallici di cui il primo in Platino (funzione lavoro  $W_1 = 6.2$  eV) e il secondo in un metallo ignoto di funzione lavoro  $W_2$ . Sapendo che a temperatura  $T_1 = 310$  K la densità di corrente termoionica del primo metallo eguaglia la densità di corrente termoionica del secondo campione misurata a temperatura  $T_2 = 225$  K, calcolare la funzione lavoro  $W_2$  facendo ragionevoli approssimazioni sull'espressione della corrente termoionica.
8. Si consideri un esperimento di effetto Hall realizzato mediante la barretta di silicio drogata p ( $N_A = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>,  $\mu_p = 100$  cm<sup>2</sup>/Vs) mostrata in **Fig. 4**. L'applicazione di una tensione longitudinale  $V_L$  ai capi della barretta di spessore  $d = 5 \mu\text{m}$  induce una corrente  $I = 200 \mu\text{A}$  e una tensione di Hall  $V_H = 50$  mV. Determinare modulo, direzione e verso del campo magnetico  $B$  applicato e la tensione longitudinale  $V_L$  sapendo che la lunghezza della barretta è uguale alla larghezza ( $L = W$ ).
9. Si consideri un campione di silicio drogato n ( $N_D = 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>). Sapendo che il livello donore dista 40 meV dal fondo della banda di conduzione, calcolare le concentrazioni di portatori e il livello di Fermi a temperatura ambiente e a 10 K.
10. Un semiconduttore drogato n ( $N_D = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>) è illuminato da un fascio luminoso che determina una concentrazione superficiale in eccesso  $n'(0) = p'(0) = 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>. Calcolare i profili di concentrazione dei portatori di carica e dei quasi livelli di Fermi  $F_n$  e  $F_p$  lungo il semiconduttore note la concentrazione intrinseca  $n_i = 10^{11}$  cm<sup>-3</sup>, la mobilità degli elettroni e delle lacune  $\mu_n = 230$  cm<sup>2</sup>/Vs e  $\mu_p = 100$  cm<sup>2</sup>/Vs e il tempo di ricombinazione dei minoritari  $\tau_p = 10^{-7}$  s.

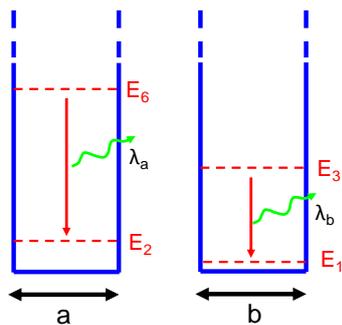


Fig. 1

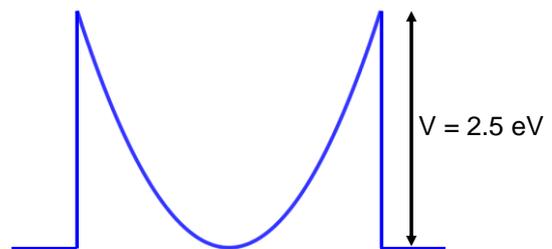


Fig. 2

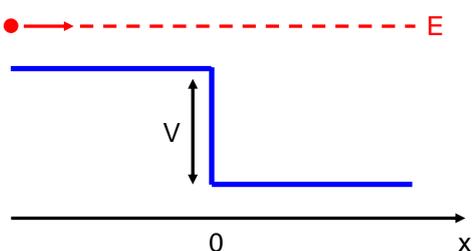


Fig. 3

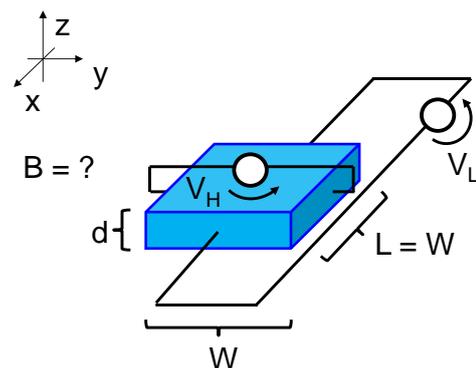


Fig. 4

1. Consider a cavity at thermal equilibrium at  $T = 1000$  K. Calculate the wavelength  $\lambda$  so that the corresponding mode is occupied by 5 photons on average and the average energy of considered vibrational mode.
2. Consider the two infinite wells of width  $a$  (well 1) and  $b$  (well 2), respectively, shown in **Fig. 1**. Determine the relationship between  $a$  and  $b$  so that the wavelength  $\lambda_a$  of photon generated as a result of an electron relaxation between the sixth and the second eigenstate of well 1 is half of photon wavelength  $\lambda_b$  due to a relaxation transition of an electron between the third and the ground energy level of well 2.
3. Consider the parabolic potential well of height  $V = 2.5$  eV shown in **Fig. 2**. Given the photon relaxation wavelength  $\lambda_{3-0} = 1$   $\mu\text{m}$ , calculate the number of confined eigenstates and draw the corresponding eigenfunctions  $\varphi(x)$ .
4. Consider a free electron described by the wavefunction  $\Psi_1(x, t) = Ae^{i(k_1x - \omega_1t)}$ . Given the De Broglie wavelength  $\lambda_1 = 2.745$   $\text{\AA}$ , determine the wavefunction  $\Psi_2(x, t)$  of a second free electron with equal probability flux and energy  $E_2 = \frac{1}{4} E_1$ .
5. Electrons of energy  $E$  propagating toward positive  $x$  impinge on a negative potential step of height  $V$  shown in **Fig. 3**. Draw the qualitative behavior of eigenfunctions in two regions at a certain time specifying the main features. In addition, sketch qualitatively the square modulus of eigenfunctions.
6. An electron packet propagates in the conduction band of a semiconductor described by dispersion law  $E(k) = \frac{E_0}{2} [1 - \cos(ka)]$ , with  $E_0 = 2$  eV and  $a = 0.4$  nm. Because of the application of an electric field  $F = 15$   $\text{kVcm}^{-1}$  and phonon scattering, the electrons locate at steady state momentum  $k_0 = 5 \cdot 10^8$   $\text{m}^{-1}$ . Calculate the momentum relaxation time  $\tau_m$  and the electron mobility  $\mu$ .
7. Consider a first metal sample in platinum (work function  $W_1 = 6.2$  eV) and a second unknown metal of work function  $W_2$ . Knowing that at temperature  $T_1 = 310$  K the thermoionic current density of first sample is equal to the thermoionic current density of second sample at  $T_2 = 225$  K, calculate  $W_2$  with reasonable approximations on thermoionic current expression.
8. Consider a Hall experiment where is used a p-doped Si sample ( $N_A = 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ,  $\mu_p = 100$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) shown in **Fig. 4**. The application of a longitudinal voltage  $V_L$  across the sample of thickness  $d = 5$   $\mu\text{m}$  induces a current  $I = 200$   $\mu\text{A}$  and a Hall voltage  $V_H = 50$  mV. Determine the modulus and direction of applied magnetic field  $B$  and the longitudinal voltage  $V_L$  knowing that the sample length  $L$  is equal to its width  $W$  ( $L=W$ ).
9. Consider a n-doped silicon sample ( $N_D = 10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ ). Knowing that the donor level is located at 40 meV below the bottom of conduction band, calculate the carrier concentrations and the Fermi energy at room temperature and at 10 K.
10. A n-doped semiconductor ( $N_D = 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ) is irradiated by a light beam inducing an excess surface concentration  $n'(0) = p'(0) = 10^{15}$   $\text{cm}^{-3}$ . Calculate the carrier concentration evolution and the quasi Fermi energies  $F_n$  and  $F_p$  along the semiconductor given the intrinsic concentration  $n_i = 10^{11}$   $\text{cm}^{-3}$ , the electron and hole mobilities  $\mu_n = 230$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  and  $\mu_p = 100$   $\text{cm}^2/\text{Vs}$  and the minority carrier recombination time  $\tau_p = 10^{-7}$  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

$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$  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<sup>-1</sup>  
 $c = 2.998 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>  
 $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$  F m<sup>-1</sup>  
 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>  
 $c_W = 2.8 \cdot 10^{-3}$  K m

costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$   
 concentrazione intrinseca  $n_i$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 gap di energia  $E_G$  [eV]  
 densità di stati effettiva in banda di conduzione  $N_c$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 densità di stati effettiva in banda di valenza  $N_v$  [ $\text{cm}^{-3}$ ]

Si	Ge
11.7	16
$1.45 \times 10^{10}$	$2.4 \times 10^{13}$
1.12	0.66
$2.8 \times 10^{19}$	$1.04 \times 10^{19}$
$1.04 \times 10^{19}$	$0.6 \times 10^{19}$