1. **Fig. 1** mostra la struttura del cloruro di sodio NaCl (Na = sfera nera e struttura FCC, Cl = sfera bianca e struttura FCC), dove ogni atomo occupa un vertice di una cella cubica. Dire quali sono (I) il reticolo e la base per questa struttura. Sapendo che a = 0.282 nm, calcolare (II) la concentrazione atomica nel solido.

2. Si considerino la 2 buche di potenziali armonici $(\alpha_1 x^2) / 2$ e $(\alpha_2 x^2) / 2$ ($\alpha_1 = 9\alpha_2$) in **Fig. 2**. Sapendo che l'autovalore dello stato fondamentale della buca 2 è 100 meV, calcolare (I) il corrispondente autovalore fondamentale nella buca 1. Si disegnino (II) le autofunzioni degli stati fondamentali nelle 2 buche e (III) si calcoli la lunghezza d'onda della radiazione emessa per transizione di un elettrone dal 3° livello della buca 2 allo stato fondamentale della buca 1. (Ai fini del calcolo degli autovalori, si assumano indipendenti le 2 buche di potenziale).

3. Si tracci (I) l'andamento qualitativo delle prime 2 autofunzioni (ψ_1 e ψ_2) della doppia buca in **Fig. 3**. Si indichino (II) le posizioni degli zeri di ψ_1 e ψ_2, (III) delle loro derivate prime e (IV) delle loro derivate seconde.

4. Sapendo che V_0 = 1 eV, E_1 = 0.2 eV, E_2 = 1.6 eV e facendo riferimento a **Fig. 4**, (I) determinare a affinché la probabilità di tunneling P_{E2} ad energia E_2 sia 10^6 volte la probabilità di tunneling P_{E1} ad energia E_1. (Si trascurino le riflessioni alle discontinuità di potenziale.)

5. Si consideri una lacuna su una banda di valenza di energia $E(k) = E_0 + E_1 \cos ka$, con E_0 = 1 eV, E_1 = 0.5 eV e a = 0.8 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 $kVcm^{-1}$.

6. In un semiconduttore a gap diretto, un elettrone assorbe un fotone di lunghezza d'onda λ = 680 nm per poi rilassare sul minimo della banda di conduzione e ricombinare radiativamente con una lacuna in banda di valenza. Si determini (I) la lunghezza d'onda del fotone emesso dalla ricombinazione radiativa, sapendo che l'assorbimento iniziale avviene in corrispondenza di k = 7.2 x 10^8 m^{-1} e che le masse efficaci sono 0.1 m_0 e 0.75 m_0 per l'elettrone e la lacuna, rispettivamente.

7. Si consideri il semiconduttore la cui banda di conduzione è schematizzata dalle superfici di Fermi in **Fig. 5**. Il minimo centrato in Γ ha massa efficace $m_1^* = 0.57 m_0$ ed energia E_1 = 0, mentre i 6 minimi degeneri nel punto prossimo a X hanno masse efficaci $m_l^* = 0.78 m_0$ (longitudinale), $m_t^* = 0.32\ m_0$ (trasversale) ed energia E_2 = 150 meV. Determinare (I) la temperatura a cui coincidono il numero di elettroni N_1 nel minimo centrale ed il numero totale di elettroni N_2 nei 6 minimi degeneri, facendo uso dell'approssimazione parabolica per la relazione di dispersione e della distribuzione di Maxwell-Boltzmann.

8. Una barretta di semiconduttore presenta una diminuzione dell'80% di resistività quando la sua temperatura passa da 300 K a 350 K. (I) Il semiconduttore è drogato o è intrinseco? (II) Si valuti il suo energy gap E_G.

9. Si calcoli (I) il tempo di transito di un elettrone in un canale lungo 100 nm, assumendo che la velocità sia saturata e pari a 10^7 cms^{-1}. Si stimi inoltre (II) il numero di fononi emessi da un elettrone lungo il canale, se la tensione applicata è di 1 V con una massa efficace pari a m_0.

10. Una barretta di silicio (μ_n = 1300 $cm^2V^{-1}s^{-1}$) è drogata $N_A = 3x10^{18}$ cm^{-3}. A t = 0 la barretta è sottoposta ad irraggiamento, che induce un tasso di generazione di coppie elettrone-lacuna pari a $2x10^{16}$ $cm^{-3}s^{-1}$. Sapendo che il tempo di ricombinazione degli elettroni t_m è pari a 2 μs, si valuti e si rappresentino (I) l'andamento temporale dell'eccesso di minoritari e (II) dei quasi-livelli di fermi E_{Fn} e E_{Fp}.

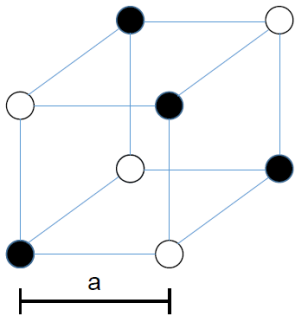

Fig.1

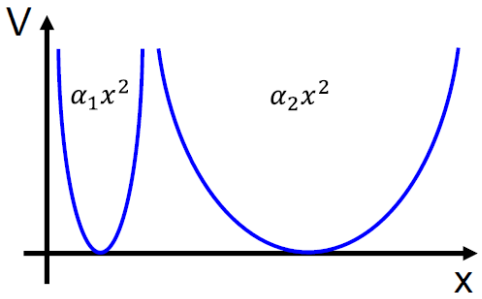

Fig. 2

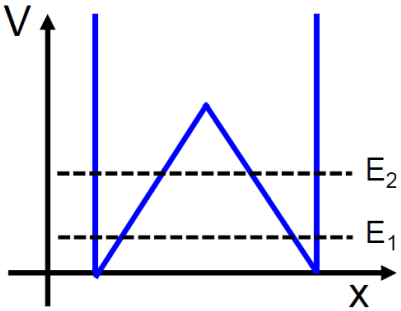

Fig. 3

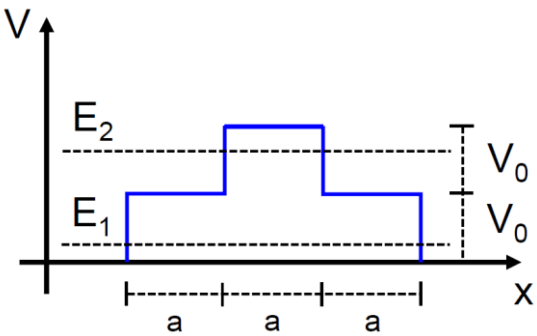

Fig. 4

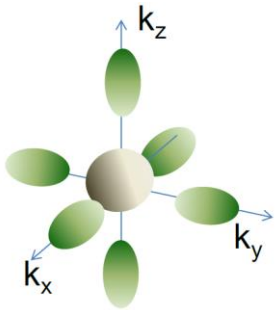

Fig. 5

1. **Fig. 1** shows the rock-salt structure of NaCl (Na = black sphere, FCC lattice, Cl = white sphere, FCC lattice), where every atom occupies a vertex of a cube. What are the lattice and the basis for this structure? Knowing that a = 0.282 nm, calculate the atomic density in the solid.

2. Consider the 2 wells of harmonic potential $(\alpha_1 x^2) / 2$ and $(\alpha_2 x^2) / 2$ ($\alpha_1 = 9\alpha_2$) in **Fig. 2.** Knowing that the eigenvalue of the ground state in well 2 is 100 meV, calculate the corresponding ground-state eigenvalue in well 1. Draw the eigenfunctions for the ground states in the 2 wells and calculate the wavelength of the radiation emitted for a transition from the 3rd level in well 2 to the ground state in well 1. (For the purpose of calculating the eigenvalues, assume that the 2 potential wells are independent.)

3. Draw the qualitative behavior of the first 2 eigenfunctions ψ_1 e ψ_2 in the double potential well of **Fig. 3**. Indicate the positions of the roots for ψ_1 e ψ_2, their first derivatives and their second derivatives.

4. Knowing that it is V_0 = 1 eV, E_1 = 0.2 eV, E_2 = 1.6 eV and referring to **Fig. 4**, calculate a so that the tunneling probability P_{E2} at energy E_2 is 10_6 times the tunneling probability P_{E1} at energy E_1. (Neglect reflections at the potential discontinuities.)

5. 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 the average position in the band k and the velocity of the hole, in absolute value and direction, under a positive electric field F = 25 kVcm^{-1}.

6. In a direct gap semiconductor, an electron absorbs a photon of wavelength λ = 680 nm then relaxes to the minimum of the conduction band and undergoes radiative recombination with a hole in the valence band. Evaluate the wavelength of the photon emitted in the radiative recombination, knowing that the initial transition takes place in correspondence of k = 7.2 x 10^8 m^{-1} and that the effective masses are 0.1 m_0 e 0.75 m_0 for the electron and the hole, respectively.

7. Consider a semiconductor with the conduction band described by the Fermi surfaces in **Fig. 5**. The minimum centered in Γ has an effective mass $m_1^* = 0.57 m_0$ and energy E_1 = 0, while the 6 degenerate minima close to X have effective masses m_l^* = 0.78 m_0 (longitudinal) and m_t^* = 0.32 m_0 (transverse) and energy E_2 = 150 meV. Calculate the temperature at which the number of electrons N_1 in the central minimum is equal to the total number of electrons N_2 in the 6 degenerate minima, using the parabolic and Maxwell- Boltzmann approximations.

8. A semiconductor shows an 80% decrease of resistivity when the temperature goes from 300 K to 350 K. Is the semiconductor doped or intrinsic? Calculate its energy gap E_G.

9. Calculate the transit time of an electron in a 100 nm channel, assuming that the saturation velocity is equal to 10^7 cms^{-1}. Estimate the number of optical phonons generated by the electron along the channel, is the applied voltage is 1 V and assuming an effective mass of m_0.

10. A silicon sample (μ_n = 1300 cm^{2}V^{-1}s^{-1}) is doped with concentration N_A = 3x10^{18} cm^{-3}. At t = 0 The sample is irradiated with generation rate equal to 2 x 10^{16} cm^{-3}s^{-1}. Knowing that the minority-carrier recombination t_m is equal to 2 μs, Evaluate and draw the time evolution of the minority carrier concentration and the quasi-Fermi levels E_{Fn} and E_{Fp}.

Costanti fisiche:

massa dell'elettrone	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg
costante di Planck	$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J s
carica elettronica	$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C
costante di Boltzmann	$k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J K^{-1}
velocità della luce	$c = 2.998 \cdot 10^8$ m s^{-1}
costante dielettrica nel vuoto	$\varepsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m^{-1}
costante di Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}
costante di Wien	$c_W = 2.8 \cdot 10^{-3}$ K m

	Si	**Ge**
costante dielettrica relativa ε_r	11.7	16
concentrazione intrinseca n_i [cm^{-3}]	1.45 x 10^{10}	2.4 x 10^{13}
gap di energia E_G [eV]	1.12	0.66
densità di stati effettiva in banda di conduzione N_C [cm^{-3}]	2.8 x 10^{19}	1.04 x 10^{19}
densità di stati effettiva in banda di valenza N_V [cm^{-3}]	1.04 x 10^{19}	0.6 x 10^{19}