

**Esercizio 1:**

Un laser He:Ne ( $m_{He} = 0.66 \cdot 10^{-26}$  kg e  $m_{Ne} = 3.35 \cdot 10^{-26}$  kg) emette alla lunghezza d'onda  $\lambda_0 = 544$  nm. Durante il funzionamento il gas si trova ad una temperatura  $T = 100^\circ\text{C}$ . Il laser ha un guadagno di soglia pari a  $g_{th} = 0.3 \text{ m}^{-1}$  e perdite logaritmiche  $\alpha_S = 0.04 \text{ m}^{-1}$ . Il laser è realizzato tramite una cavità di Fabry-Perot costituita da due specchi con riflettività rispettivamente  $R_1 = 0.96$  e  $R_2 = 0.99$ .

- a) Calcolare l'allargamento della riga di emissione dovuto all'effetto Doppler.
- b) Calcolare la minima lunghezza della cavità che garantisce l'accensione del laser.
- c) Stimare il numero di modi nello spettro di emissione.

**Esercizio 2:**

Si consideri un LED con layer attivo in Nitruro di Gallio e Indio (InGaN). Il gap energetico è  $E_g = 2.8$  eV.

- a) Calcolare la lunghezza d'onda di picco emessa.
- b) Si valuti la larghezza a metà altezza dello spettro di emissione.
- c) Sapendo che l'energy gap dipende dalla temperatura secondo la relazione  $\frac{dE_g}{dT} = -4.3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$ , si dica se il LED può emettere alla lunghezza d'onda  $\lambda = 550$  nm.

**Esercizio 3:**

Su un fotodiodo PIN in Si di diametro  $d = 150 \mu\text{m}$  e spessore del layer intrinseco  $w = 200 \mu\text{m}$  incide della radiazione elettromagnetica a  $\lambda = 800$  nm di potenza  $P_0 = 80$  nW. Il fotodiodo ha un coefficiente di assorbimento pari a  $\alpha = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ .

- a) Calcolare la corrente fotogenerata assumendo che non ci sia coating antiriflesso all'interfaccia tra semiconduttore ( $n_s = 3.5$ ) e aria.
- b) Calcolare il diametro massimo del fotodiodo per avere una capacità inferiore a 1 pF.
- c) Determinare la resistenza di carico del fotodiodo che permette di avere una costante di tempo di risposta del circuito fotorivelatore uguale alla costante di tempo di risposta del dispositivo.

**Domande di teoria:**

- a) Si discutano gli effetti di dispersione in una fibra ottica, distinguendo i vari contributi alla dispersione.
- b) Si illustrino i meccanismi di generazione e ricombinazione nei semiconduttori, discutendo le rispettive applicazioni in optoelettronica e i requisiti in termini di band gap.

**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 <sup>-1</sup>          |
| velocità della luce            | $c = 2.998 \cdot 10^8$ m s <sup>-1</sup>                |
| costante dielettrica nel vuoto | $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m <sup>-1</sup> |

|   |                       |
|---|-----------------------|
|   | <b>Si</b>             |
| costante dielettrica relativa $\epsilon_r$                                  | 11.7                  |
| velocità di saturazione $v_{sat}$ [cm s <sup>-1</sup> ]                     | $10^7$                |
| concentrazione intrinseca $n_i$ [cm <sup>-3</sup> ]                         | $1.45 \times 10^{10}$ |
| gap di energia $E_G$ [eV]   | 1.12                  |
| densità di stati effettiva in banda di conduzione $N_c$ [cm <sup>-3</sup> ] | $2.8 \times 10^{19}$  |
| densità di stati effettiva in banda di valenza $N_v$ [cm <sup>-3</sup> ]    | $1.04 \times 10^{19}$ |

**Exercise 1:**

Consider a He:Ne laser ( $m_{\text{He}} = 0.66 \cdot 10^{-26}$  kg,  $m_{\text{Ne}} = 3.35 \cdot 10^{-26}$  kg) emitting at  $\lambda_0 = 544$  nm (free space wavelength). The laser operates at the temperature  $T = 100^\circ\text{C}$  and has a threshold gain  $g_{\text{th}} = 0.3 \text{ m}^{-1}$  and internal losses  $\alpha_s = 0.04 \text{ m}^{-1}$ . The laser is made by using a Fabry-Perot optical cavity consisting of two mirrors with reflectance  $R_1 = 0.96$  and  $R_2 = 0.99$ .

- a) Calculate the Doppler broadened linewidth.
- b) Calculate the minimum length that the cavity must have in order to guarantee the laser operation.
- c) Calculate the number of optical modes in the output spectrum.

**Exercise 2:**

Consider a LED with an active layer made by InGaN. The energy gap of the material is  $E_g = 2.8\text{eV}$ .

- a) Calculate the peak wavelength of the LED emission.
- b) Evaluate the spectral linewidth FWHM  $\Delta\lambda_{1/2}$ .
- c) Assuming that the energy gap  $E_g$  varies with temperature according to the law  $\frac{dE_g}{dT} = -4.3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$ , calculate if the LED can emit at the wavelength  $\lambda = 550$  nm.

**Exercise 3:**

Consider a silicon PIN photodiode with a diameter  $d = 150 \mu\text{m}$  and the intrinsic layer with a width  $w = 20 \mu\text{m}$ . The photodiode is illuminated with an electromagnetic radiation at  $\lambda = 800$  nm and optical power  $P_0 = 80$  nW. The photodiode has an absorbing coefficient  $\alpha = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ .

- a) Determine the photogenerated current assuming no antireflection coating between the semiconductor and air.
- b) Calculate the maximum diameter of the photodiode which limits its capacitance below 1 pF.
- c) Determine the load resistance for having an RC time constant equal to the photodiode response.

**Theory questions:**

- a) Discuss the effects of dispersion in an optical fiber, discriminating all various contributions to dispersion.
- b) Illustrate the mechanisms of generation and recombination in semiconductors, discussing their respective applications in optoelectronics and the requirements in terms of band gap.

**Physical constants:**

|  |   |
|--|---|
| electron rest mass   | $m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg                         |
| Planck constant  | $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J s                          |
| electron charge  | $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C                            |
| Boltzmann constant   | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J K <sup>-1</sup>          |
| speed of light   | $c = 2.998 \cdot 10^8$ m s <sup>-1</sup>                |
| vacuum permittivity  | $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m <sup>-1</sup> |
| <b>Si</b>  |   |
| relative permittivity $\epsilon_r$   | 11.7  |
| saturation electric field [kV cm <sup>-1</sup> ]                             | 20  |
| saturation velocity [cm s <sup>-1</sup> ]                                    | $10^7$  |
| intrinsic concentration $n_i$ [cm <sup>-3</sup> ]                            | $1.45 \times 10^{10}$                                   |
| energy gap $E_G$ [eV]  | 1.12  |
| effective density of states in the conduction band $N_C$ [cm <sup>-3</sup> ] | $2.8 \times 10^{19}$                                    |
| effective density of states in the valence band $N_V$ [cm <sup>-3</sup> ]    | $1.04 \times 10^{19}$                                   |