

**Esercizio 1:**

Si consideri il laser He:Ne ( $m_{He} = 0.66 \cdot 10^{-26}$  kg e  $m_{Ne} = 3.35 \cdot 10^{-26}$  kg) operante in regime stazionario alla lunghezza d'onda  $\lambda_0 = 544$  nm. Il laser è realizzato mediante una cavità ottica Fabry-Perot formata da due specchi con riflettività rispettivamente  $R_1 = 99\%$  e  $R_2 = 93\%$ . Il laser opera alla temperatura  $T = 130$  °C e ha perdite interne  $\alpha_s = 0.04$  m<sup>-1</sup>.

- Calcolare l'allargamento della riga di emissione dovuto all'effetto Doppler.
- Calcolare la lunghezza che deve avere la cavità affinché ci sia solo un modo all'interno della curva di emissione.
- Calcolare il guadagno di soglia  $g_{th}$  del laser.

**Esercizio 2:**

Si vuole realizzare un sistema di comunicazione ottico in seconda finestra ( $\lambda_0 = 1310$  nm). La fibra ottica utilizzata ha un core con indice di rifrazione  $n_1 = 1.45$ , raggio  $r = 2$  μm e coefficiente di attenuazione  $\alpha_F = 0.8 \frac{dB}{km}$ . A monte della fibra è posto un LED di tipo lambertiano che emette una potenza ottica  $P_{LED} = 1.5$  mW.

- Considerando un indice di rifrazione del cladding  $n_2 = 1.4$ , calcolare la lunghezza d'onda di cut-off e commentare il risultato ottenuto.
- Se la minima potenza rilevabile in uscita dalla fibra è  $P_{OUT} = 100$  nW, calcolare la lunghezza massima della fibra (considerare anche l'accoppiamento led-fibra).
- Trovare le condizioni di  $n_2$  per soddisfare i seguenti requisiti:
  - Fibra monomodale a  $\lambda_0 = 1310$  nm.
  - Attenuazione per accoppiamento led-fibra  $\alpha_{L-F} \leq 20$  dB.

**Esercizio 3:**

Si consideri un rivelatore APD in silicio la cui struttura prevede uno strato superficiale trattato antiriflesso di tipo n<sup>+</sup> di spessore  $W_{n^+} = 2$  μm, una regione di valanga drogata p ( $N_{A,av} = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>) di spessore  $W_{p,av} = 1.2$  μm, una zona quasi intrinseca π ( $N_{A,\pi} = 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>) di spessore  $W_{\pi} = 18$  μm e un substrato p<sup>+</sup>. Il fotodiodo, su cui incide un segnale ottico, è caratterizzato inoltre da un guadagno di moltiplicazione  $M=100$  e da un rapporto tra i coefficienti di ionizzazione di lacune ed elettroni  $k = 0.1$ .

- Determinare la polarizzazione inversa applicata ai capi del rivelatore sapendo che il campo elettrico all'interfaccia tra la zona di valanga e quella quasi intrinseca  $E_{\pi} = 50$  kV/cm.
- Calcolare la frazione di potenza ottica incidente sul dispositivo assorbita rispettivamente nella zona p di valanga e nella zona π assumendo un coefficiente di assorbimento  $\alpha = 0.1$  μm<sup>-1</sup>.
- Fornire una stima del tempo di risposta del fotodiodo a valanga specificando il significato di ciascun contributo.

**Domande di teoria:**

- Illustrare il principio di funzionamento di un laser ad eterogiunzione.
- Illustrare le caratteristiche I/V di un fotodiodo in assenza e presenza di illuminazione ( $h\nu > E_G$ ). Nel secondo caso descrivere il comportamento del fotodiodo per tensione negativa, tensione nulla e corrente nulla.

**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) operating in CW at  $\lambda_0 = 544$  nm (free space wavelength). The laser is made using a Fabry-Perot optical cavity constituted of two mirrors with reflectances  $R_1 = 99\%$  and  $R_2 = 93\%$ . The laser operates at the temperature  $T = 130$  °C and has internal losses  $\alpha_S = 0.04$  m<sup>-1</sup>.

- Calculate the Doppler broadened linewidth.
- Determine the length that the cavity must have so that there is only one longitudinal mode in the output spectrum.
- Calculate the laser threshold gain  $g_{\text{th}}$ .

**Exercise 2:**

An optical communication system is required to operate at  $\lambda_0 = 800$  nm. The available optical fiber has a core with a refracting index  $n_1 = 1.45$ , radius  $2$   $\mu\text{m}$  and attenuation coefficient  $\alpha_F = 0.8 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$ . A LED is placed upstream of the fiber. The LED emits an optical power  $P_{\text{LED}} = 1.5$  mW.

- Considering a cladding refractive index  $n_2 = 1.4$ , calculate the cut-off wavelength and comment the result.
- Find the maximum length of the fiber when the minimum output power (at the end of the fiber) is  $P_{\text{OUT}} = 100$  nW (consider the led-fiber coupling).
- Find the conditions of  $n_2$  in order to meet the following specifications:
  - Single mode fiber at  $\lambda_0 = 1310$  nm.
  - LED-fiber coupling loss  $\alpha_{\text{L-F}} \leq 20$  dB.

**Exercise 3:**

Consider a silicon APD structure with a AR coated n<sup>+</sup>-doped surface layer of thickness  $W_{n^+} = 2$   $\mu\text{m}$ , a p-doped ( $N_{A,p} = 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>) avalanche layer of thickness  $W_{p,av} = 1$   $\mu\text{m}$ , a light-doped ( $N_{A,\pi} = 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>)  $\pi$ -layer of thickness  $W_{\pi} = 20$   $\mu\text{m}$  and a p<sup>+</sup> substrate. In addition, the detector, on which an optical signal impinges, has multiplication gain  $M = 100$  and hole/electron ionization coefficient ratio  $k = 0.1$ .

- Determine the reverse bias applied to the detector knowing that the electric field at the interface between the avalanche and  $\pi$  layer  $E_{\pi} = 50$  kV/cm.
- Calculate the percentage of incident optical power absorbed in the avalanche and  $\pi$  layer respectively assuming an absorption coefficient  $\alpha = 0.1$   $\mu\text{m}^{-1}$ .
- Give an estimate of the APD response time specifying each term.

**Theory questions:**

- Illustrate the operating principle of a heterojunction laser.
- Illustrate the I / V characteristics of a photodiode in the absence and presence of illumination ( $h\nu > E_G$ ). In the second case, describe the behavior of the photodiode for negative voltage bias, zero voltage bias and zero current.

**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> ]	$1.04 \times 10^{19}$