

**Esercizio 1:**

Si consideri una fibra ottica step-index avente un core di diametro  $d = 50 \mu\text{m}$  e indice di rifrazione  $n_1 = 1.4$ . All'ingresso della fibra è accoppiato un LED operante a  $\lambda = 1310 \text{ nm}$  che emette una potenza ottica pari a  $P = 10 \text{ mW}$ , e in uscita ad un rivelatore la cui sensitivity è pari a  $S = 120 \text{ pW}$ . La fibra è utilizzata in spezzoni lunghi  $L = 1 \text{ km}$  ed ha un coefficiente di attenuazione  $\alpha_{FO} = 1.2 \text{ dB/km}$ . La giunzione tra due spezzoni fa perdere  $1 \text{ dB}$ , mentre l'accoppiamento con il rivelatore fa perdere  $1.5 \text{ dB}$ .

- Determinare l'indice di rifrazione del cladding  $n_2$  per accoppiare in fibra il 15% della potenza emessa dal LED.
- Calcolare il numero di modi che si propagano lungo la fibra.
- Calcolare la lunghezza massima del sistema di comunicazione tenendo conto di tutte le perdite di potenza.

**Esercizio 2:**

Si consideri un LASER a doppia eterogiunzione di tipo edge-emitting con indice di rifrazione del layer attivo pari  $n = 3.6$  e spessore  $t = 100 \text{ nm}$ . Il laser è costituito da una struttura a cavità di Fabry-Perot di larghezza  $w = 4.5 \mu\text{m}$ . Le perdite interne sono descritte dal coefficiente  $\alpha_s = 15 \text{ cm}^{-1}$ . Il laser emette una potenza ottica  $P_0 = 30 \text{ mW}$  alla lunghezza d'onda  $\lambda = 850 \text{ nm}$  quando è polarizzato con una corrente  $I = 70 \text{ mA}$ .

- Sapendo che il laser ha una slope efficiency  $n_s = 0.5 \frac{\text{mW}}{\text{mA}}$ , calcolare la corrente di soglia.
- Assumendo che la separazione tra i modi longitudinali è pari a  $\Delta\lambda = 1.25 \text{ nm}$ , calcolare la concentrazione dei fotoni in cavità quando il dispositivo opera a  $I = 70 \text{ mA}$ .
- Calcolare la concentrazione di elettroni liberi a soglia  $n_{TH}$  sapendo che il tempo di emissione spontanea è  $\tau_r = 2 \text{ ps}$ .

**Esercizio 3:**

Si consideri un fotorivelatore pn con queste caratteristiche:

- Area circolare di raggio  $r = 1.5 \text{ mm}$
- $N_D = 5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$   $N_A = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- Spessore zona n  $x_n = 300 \text{ nm}$
- $V_{rev} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{bi} = 1 \text{ V}$

Esso è connesso ad una resistenza di carico  $R = 10 \Omega$ .

- Disegnare la struttura del fotodiodo e calcolare le dimensioni della zona svuotata.
- Determinare la dimensione  $W$  della zona svuotata che minimizza il tempo di risposta del rivelatore, precisando le (ragionevoli) approssimazioni fatte sull'andamento del campo elettrico.
- Calcolare la polarizzazione del fotorivelatore pn che rende possibile tale zona svuotata.

**Domande di teoria:**

- Si illustri il funzionamento di un LED ad eterogiunzione indicandone i principali vantaggi rispetto al LED ad omogiunzione.
- Si descriva il funzionamento del fotodiodo a valanga illustrando i processi fisici che ne determinano il tempo di risposta. Si indichino anche i principali vantaggi rispetto al fotodiodo pn e pin.

**Costanti fisiche:**

|                                |                                                        |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------|
| massa dell'elettrone           | $m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$                |
| costante di Planck             | $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$                 |
| carica elettronica             | $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$                   |
| costante di Boltzmann          | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$          |
| velocità della luce            | $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$                |
| costante dielettrica nel vuoto | $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ |

**Si**

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

**Exercise 1:**

Consider a step-index optical fiber with core of diameter  $d = 4 \mu\text{m}$  and refractive index  $n_1 = 1.4$ . The LED coupled to the fiber input emits at  $\lambda = 1310 \text{ nm}$  with an optical power  $P = 10 \text{ mW}$ . The detector at the end of the fiber has a sensitivity  $S = 120 \text{ pW}$ . The optical fiber is available in single part with length  $L = 1 \text{ km}$ , each with an attenuation equal to  $1.2 \text{ dB/km}$ . The junction loss between two parts of fiber is  $1 \text{ dB}$  while the detector has a coupling loss  $\alpha_{lr} = 1.5 \text{ dB}$ .

- Determine the cladding refractive index  $n_2$  to couple the 15% of the total power emitted by the LED.
- Calculate the number of modes propagating along the fiber.
- Considering all the attenuation contributions, find the maximum length of the fiber.

**Exercise 2:**

Consider a double heterostructure edge-emitting laser diode with an active layer with a refracting index  $n = 3.6$  and thickness  $t = 100 \text{ nm}$ . The laser consists of a Fabry-Perot cavity of  $w = 4.5 \mu\text{m}$  width. Internal losses are described by the coefficient  $\alpha_s = 15 \text{ cm}^{-1}$ . The laser emits an optical power  $P_0 = 30 \text{ mW}$  at the wavelength  $\lambda = 850 \text{ nm}$  when it is polarized with a current  $I = 70 \text{ mA}$ .

- Knowing that the laser has a slope efficiency  $\eta_s = 0.5 \frac{\text{mW}}{\text{mA}}$ , calculate the threshold current.
- Assuming that the separation between the longitudinal modes is equal to  $\Delta\lambda = 1.25 \text{ nm}$ , calculate the concentration of the photons in the cavity when the device operates at  $I = 70 \text{ mA}$ .
- Calculate the concentration of free electrons  $n_{\text{TH}}$  at threshold, knowing that the spontaneous emission time is  $\tau_r = 2 \text{ ps}$ .

**Exercise 3:**

Consider the pn photodetector with these characteristics:

- Circular area with radius  $r = 1.5 \text{ mm}$
- $N_D = 5 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$   $N_A = 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- n zone with thickness  $x_n = 300 \text{ nm}$
- $V_{\text{rev}} = 5 \text{ V}$ ,  $V_{\text{bi}} = 1 \text{ V}$

The photodetector is connected to a load resistance  $R = 10 \Omega$ .

- Draw the photodiode structure and calculate the dimension of the empty zone.
- Determine the dimension  $W$  of the empty zone which minimizes the photodetector response time, specifying the (reasonable) approximations adopted about the electric field trend.
- Calculate the photodetector polarization needed to obtain the above empty zone.

**Theory questions:**

- Illustrate the operation of a heterojunction LED, indicating its main advantages compared to the homojunction LED.
- Describe the operation of the avalanche photodiode illustrating the physical processes that determine its response time. Also indicate the main advantages over the pn and pin photodiode.

**Physical constants:**

|                     |                                                        |
|---------------------|--------------------------------------------------------|
| electron rest mass  | $m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$                |
| Planck constant     | $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$                 |
| electron charge     | $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$                   |
| Boltzmann constant  | $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$          |
| speed of light      | $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$                |
| vacuum permittivity | $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ |

|                                                    |                       |
|----------------------------------------------------|-----------------------|
|                                                    | <b>Si</b>             |
| relative permittivity $\epsilon_r$                 | 11.7                  |
| saturation electric field [ $\text{kV cm}^{-1}$ ]  | 20                    |
| saturation velocity [ $\text{cm s}^{-1}$ ]         | $10^7$                |
| intrinsic concentration $n_i$ [ $\text{cm}^{-3}$ ] | $1.45 \times 10^{10}$ |
| energy gap $E_G$ [eV]                              | 1.12                  |