

**Esercizio 1:**

Un sistema di comunicazione ottico in terza finestra ( $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ) utilizza una fibra ottica step-index con un core di diametro  $d = 4 \text{ }\mu\text{m}$  e indice di rifrazione  $n_1 = 1.45$ . Il cladding ha indice di rifrazione  $n_2 = 1.425$ .

La fibra ha un coefficiente di attenuazione  $\alpha_{\text{dB}} = 1.4 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$  e un coefficiente di dispersione cromatica  $D_\lambda = 10 \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$ .

All'ingresso della fibra è accoppiata una sorgente lambertiana ( $\Delta\lambda_{1/2} = 50 \text{ nm}$ ) che ha tempo di risposta  $t_{r,\text{LED}} = 1 \text{ ns}$  ed emette una potenza  $P_s = 2 \text{ mW}$ . Il rivelatore posto a valle della fibra ottica ha un tempo di risposta  $t_{r,\text{RIV}} = 0.5 \text{ ns}$  e una sensibilità  $S = 0.5 \text{ nW}$ .

Vengono fornite inoltre le seguenti informazioni:

- La giunzione tra due spezzoni di fibra fa perdere 0.5 dB.
- L'accoppiamento con il rivelatore fa perdere 2 dB.

- a) Stabilire se la fibra è monomodale o multimodale.
- b) Determinare la massima lunghezza della fibra imposta dall'attenuazione del segnale ottico, sapendo che sono disponibili spezzoni di fibra di lunghezza  $L = 2 \text{ km}$ .
- c) Valutare se la massima lunghezza della fibra calcolata al punto precedente è compatibile con un bit rate in codifica "non-return to zero"  $B_{\text{NRZ}} = 100 \text{ Mbit/s}$ .

**Esercizio 2:**

Si consideri un laser a doppia eterostruttura edge-emitting in AlGaAs ( $n_2 = 3.2$ ) / GaAs ( $n_1 \approx 3.6$ ) avente le seguenti caratteristiche:

- Lunghezza d'onda di operazione  $\lambda_0 = 875 \text{ nm}$
- Larghezza del contatto superiore  $w = 4 \text{ }\mu\text{m}$
- Spessore della zona attiva  $d = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$
- Perdite interne  $\alpha_s = 10 \text{ cm}^{-1}$
- Tempo di vita spontaneo  $\tau_{\text{sp}} = 3 \text{ ns}$
- Tempo di vita dei fotoni in cavità  $\tau_{\text{ph}} = 2 \text{ ps}$
- Guadagno di soglia  $g_{\text{th}} = 54 \text{ cm}^{-1}$
- Concentrazione a soglia  $n_{\text{th}} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

- a) Determinare la lunghezza  $L$  della cavità.
- b) Determinare la larghezza a metà altezza  $\Delta\lambda_{1/2}$  dello spettro di emissione in modo da avere 10 modi oscillanti in cavità.
- c) Determinare la concentrazione di fotoni in cavità  $N_{\text{PH}}$  quando il laser è polarizzato sopra soglia mediante una corrente  $I = 100 \text{ mA}$ .

**Esercizio 3:**

Si consideri un fotodiodo pin in silicio caratterizzato da un layer intrinseco debolmente drogato  $n$  ( $N_v = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ) di spessore  $w = 20 \text{ }\mu\text{m}$ . Sia  $d = 0.3 \text{ mm}$  il diametro della superficie fotosensibile. Sul fotodiodo incide una radiazione di lunghezza d'onda  $\lambda_0 = 750 \text{ nm}$  con potenza ottica  $P_0 = 150 \text{ nW}$ .

- a) Calcolare la responsività  $R$  e la corrente fotogenerata  $I_{\text{ph}}$  sapendo che l'efficienza del rivelatore è  $\eta = 0.6$ .
- b) Calcolare la minima tensione necessaria per svuotare completamente la zona intrinseca (considera  $V_{\text{BI}} = 1\text{V}$ ).
- c) Calcolare il tempo di risposta del rivelatore sapendo che quest'ultimo è connesso ad un carico di resistenza  $R_L = 200 \text{ }\Omega$  (assumere condizioni di minimo tempo di transito).

**Domande di teoria:**

- a) Si illustri il bilancio tra assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata. Sulla base di questo bilancio, si ricavano le condizioni di funzionamento di un laser.
- b) Si ricavi il teorema di Shockley-Ramo nei fotodiodi.

**Costanti fisiche:**

massa dell'elettrone

$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

costante di Planck  
carica elettronica  
costante di Boltzmann  
velocità della luce  
costante dielettrica nel vuoto

$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$   
 $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$   
 $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$   
 $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$   
velocità di saturazione  $v_{\text{sat}}$  [ $\text{cm s}^{-1}$ ]  
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**  
11.7  
 $10^7$   
 $1.45 \times 10^{10}$   
1.12  
 $2.8 \times 10^{19}$   
 $1.04 \times 10^{19}$

## Optoelectronics

1.2.2021

### Exercise 1:

An optical communication system is required to operate at  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ . The available step-index optical fiber has a core with a refracting index  $n_1 = 1.45$  and diameter  $d = 4 \text{ }\mu\text{m}$ . The cladding refracting index is  $n_2 = 1.425$ . The optical fiber has an attenuation coefficient  $\alpha_{\text{dB}} = 1.4 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$  and chromatic dispersion  $D_\lambda = 10 \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$ . At the upstream of the fiber there is a Lambertian source ( $\Delta\lambda_{1/2} = 50 \text{ nm}$ ) with a response time  $t_{\text{rLED}} = 1 \text{ ns}$  and emitting power  $P_S = 2 \text{ mW}$ . The detector at the end of the system has a response time  $t_{\text{rRIV}} = 0.5 \text{ ns}$  and sensitivity  $S = 0.5 \text{ nW}$ . It is also known that the junction between two fiber-pieces introduce an attenuation of 0.5 dB and the coupling with the detector cause a loss of 2 dB.

- Determine if the optical fiber is a single-mode or multimode fiber.
- Calculate the maximum length of the optical fiber fixed by the optical signal attenuation, knowing that the available single part of fiber has length  $L = 2 \text{ km}$ .
- Evaluate if the previously calculated maximum length is compatible with a 'non-return to zero' bit rate  $B_{\text{NRZ}} = 100 \text{ Mbit/s}$ .

### Exercise 2:

Consider an AlGaAs ( $n_2 = 3.2$ ) / GaAs ( $n_1 \approx 3.6$ ) edge emitting double heterostructure laser diode which has the following properties: operation wavelength  $\lambda_0 = 875 \text{ nm}$ , stripe top electrode width  $W = 4 \text{ }\mu\text{m}$ , active layer thickness  $d = 0.2 \text{ }\mu\text{m}$ , loss coefficient  $\alpha_s = 10 \text{ cm}^{-1}$ , spontaneous decay time constant  $\tau_{\text{sp}} = 3 \text{ ns}$ , photon cavity lifetime  $\tau_{\text{ph}} = 2 \text{ ps}$ , threshold gain coefficient  $g_{\text{th}} = 54 \text{ cm}^{-1}$  and threshold electron concentration  $n_{\text{th}} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

- Determine the cavity length  $L$ .
- Calculate the spectrum output linewidth  $\Delta\lambda_{1/2}$  so that 10 modes oscillate inside cavity.
- Determine the coherent photon concentration  $N_{\text{ph}}$  when the laser operates above the threshold at the current  $I = 100 \text{ mA}$ .

### Exercise 3:

Consider a silicon pin photodetector with an intrinsic layer lightly n-doped ( $N_v = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ). The layer has a thickness  $w = 20 \text{ }\mu\text{m}$ . The photosensitive surface has a diameter  $d = 0.3 \text{ mm}$ . An optical signal of wavelength  $\lambda_0 = 750 \text{ nm}$  and optical power  $P_0 = 150 \text{ nW}$  impinges the photodiode.

- Calculate the responsivity  $R$  and the photocurrent  $I_{\text{ph}}$  knowing the photodetector efficiency  $\eta = 0.6$ .
- Calculate the minimum voltage necessary to completely empty the intrinsic zone (consider  $V_{\text{BI}} = 1\text{V}$ ).
- Now consider the photodiode connected to a load resistor  $R_L = 200 \text{ }\Omega$ . Calculate the photodiode response time (assume conditions of minimum transit time).

### Theory questions:

- Illustrate the balance between absorption, spontaneous emission and stimulated emission in a laser. Based on that balance, provide the operation condition of the laser.
- Derive the Shockley-Ramo theorem for photodiodes.

### 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	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

### Si

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
effective density of states in the conduction band $N_C$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$2.8 \times 10^{19}$
effective density of states in the valence band $N_V$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.04 \times 10^{19}$