

**Esercizio 1:**

Si consideri un laser Nd:YAG (indice di rifrazione  $n_{YAG} = 1.82$ ) che opera a  $\lambda_0 = 1064$  nm. La barretta cristallina, di lunghezza  $L = 4$  cm e diametro  $d = 5$  mm, costituisce la cavità di Fabry-Perot: le estremità sono quindi ricoperte da specchi multidielettrici in modo da avere elevate riflettività,  $R_1 = 99.9\%$  e  $R_2 = 98\%$ . Si conoscono le perdite interne  $\alpha_s = 0.05$  m<sup>-1</sup> e l'allargamento di riga collisionale  $\Delta\nu_{FWHM} = 120$  GHz.

- a) Determinare il numero del modo corrispondente alla lunghezza d'onda centrale e il numero di modi che cadono all'interno della riga di guadagno.
- b) Calcolare le perdite totali  $\alpha_T$  e il tempo di vita dei fotoni in cavità  $\tau_{ph}$ .
- c) Nota la potenza emessa dal laser in regime stazionario  $P_o = 50$  mW, determinare la concentrazione di fotoni in cavità  $N_{ph}$ .

**Esercizio 2:**

Per la realizzazione di un sistema di comunicazione ottico in seconda finestra ( $\lambda_0 = 1310$  nm) si adotta una fibra ottica step-index caratterizzata da un core di raggio  $a = 25$  μm e indice di rifrazione  $n_1 = 1.468$ , e da una differenza di indici normalizzata  $\Delta = 1.43\%$ . La fibra ha un coefficiente di attenuazione  $\alpha_F = 1.6$  dB/km e un coefficiente di dispersione cromatica  $D_{ch} = -11 \frac{ps}{nm km}$ , ed è accoppiata ad una sorgente LED ( $\Delta\lambda_{FWHM} = 107$  nm) che emette una potenza  $P_{LED} = 10$  mW. La perdita dovuta all'accoppiamento LED-fibra è  $\alpha_{LED} = 12$  dB. Il rivelatore a valle del sistema presenta rapporto segnale rumore unitario per potenze incidenti pari a  $P_{DET} = 30$  nW ed è accoppiato alla fibra con una perdita  $\alpha_{DET} = 2$  dB.

- a) Verificare che la fibra è multimodale e calcolare il numero di modi.
- b) Determinare la dispersione totale per unità di lunghezza.
- c) Considerando i contributi di attenuazione si determini la massima lunghezza della fibra. Assumendo una codifica *return-to-zero* (RTZ), qual è il massimo bit-rate a cui tale sistema può lavorare?

**Esercizio 3:**

Si consideri un fotorivelatore APD in Silicio caratterizzato da un'estensione della zona di valanga pari a  $W_p = 2$  μm. Il fotodiodo è collegato ad un circuito di lettura costituito da una resistenza di carico  $R_L = 10$  kΩ, e da un preamplificatore con densità spettrale di potenza del rumore di corrente riferito all'ingresso  $S_{i,a} = (100 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$ . La banda del circuito è  $BW = 10$  MHz. Il fotodiodo è caratterizzato da un fattore di eccesso di rumore  $F = M^x$ , con  $x = 0.5$ , e da una corrente di buio primaria  $I_{d,0} = 5$  nA. Si assuma una fotocorrente primaria  $I_{ph,0} = 2$  nA.

- a) Determinare il coefficiente di ionizzazione degli elettroni  $\alpha_e$ , assumendo un guadagno  $M = 100$  e trascurando il contributo di ionizzazione dovuto alle lacune ( $k = \alpha_n/\alpha_e = 0$ ).
- b) Calcolare il rapporto segnale rumore SNR [dB] prima in assenza di moltiplicazione ( $M=1$ ) e in seguito per  $M = 100$ .
- c) Tracciare un grafico del rapporto segnale rumore in funzione del guadagno  $M$  e spiegarne l'andamento.

**Domande di teoria:**

- a) Illustrare i fattori che limitano l'efficienza di conversione nelle celle solari.
- b) Illustrare i meccanismi di generazione di luce nei semiconduttori a gap diretto e indiretto, mostrando quale delle due categorie si presta meglio come sorgente luminosa.

**Costanti fisiche:**

massa dell'elettrone  
 costante di Planck  
 carica elettronica  
 costante di Boltzmann  
 velocità della luce  
 costante dielettrica nel vuoto

$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$  kg  
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  J s  
 $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$  C  
 $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>  
 $c = 2.998 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>  
 $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$  F m<sup>-1</sup>

**Exercise 1:**

Consider a Nd:YAG laser (refractive index  $n_{\text{YAG}} = 1.82$ ) operating at  $\lambda_0 = 1064 \text{ nm}$ . The crystal rod, of length  $L = 4 \text{ cm}$  and diameter  $d = 5 \text{ mm}$ , has coated ends to achieve high reflectances  $R_1 = 99.9\%$  and  $R_2 = 98\%$ , thus forming a Fabry-Perot optical cavity. The internal loss coefficient is  $\alpha_s = 0.05 \text{ m}^{-1}$  and the collision linewidth is  $\Delta\nu_{\text{FWHM}} = 120 \text{ GHz}$ .

- Determine the mode number corresponding to peak emission wavelength and the number of cavity modes within the optical gain curve.
- Calculate the total loss coefficient  $\alpha_T$  and the photon cavity lifetime  $\tau_{\text{ph}}$ .
- Given the steady state output power  $P_o = 50 \text{ mW}$ , determine the photon concentration inside the cavity  $N_{\text{ph}}$ .

**Exercise 2:**

An optical communication system working at  $\lambda_0 = 1310 \text{ nm}$  uses a step-index optical fiber with a core of radius  $a = 25 \text{ }\mu\text{m}$  and refractive index  $n_1 = 1.468$ , and a normalized index difference  $\Delta = 1.43\%$ . The fiber has an attenuation coefficient  $\alpha_F = 1.6 \text{ dB/km}$  and a chromatic dispersion coefficient  $D_{\text{ch}} = -11 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ , and is coupled to a LED source ( $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 107 \text{ nm}$ ) emitting a power  $P_{\text{LED}} = 10 \text{ mW}$ . The LED-fiber coupling results in a loss of  $\alpha_{\text{LED}} = 12 \text{ dB}$ . The detector at the end of the fiber has unitary signal to noise ratio for an input power  $P_{\text{DET}} = 30 \text{ nW}$ . The detector-fiber coupling loss is  $\alpha_{\text{DET}} = 2 \text{ dB}$ .

- Verify that the fiber is multimode and calculate the number of allowed modes.
- Determine the total dispersion per unit length.
- Considering the attenuation contributions, determine the maximum length of the fiber. Which is the maximum return-to-zero (RTZ) bit rate?

**Exercise 3:**

Consider a Silicon APD photodetector having an avalanche region of extension  $W_p = 2 \text{ }\mu\text{m}$ . The photodiode is connected to an electronic read-out circuit consisting in a load resistor  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ , and in a preamplifier that has equivalent input current noise with a power spectral density  $S_{i,a} = (100 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$ . The circuit bandwidth is  $\text{BW} = 10 \text{ MHz}$ . The photodiode has an excess noise factor  $F = M^x$ , with  $x = 0.5$ , a primary dark current  $I_{d,0} = 5 \text{ nA}$ , and a primary photocurrent  $I_{\text{ph},0} = 2 \text{ nA}$ .

- Determine the electron ionization coefficient  $\alpha_e$ , assuming a multiplication gain  $M = 100$  and neglecting ionization by holes ( $k = \alpha_h/\alpha_e = 0$ ).
- Calculate the signal to noise ratio SNR [dB] first without multiplication ( $M = 1$ ) and then for  $M = 100$ .
- Plot and explain a graph of the signal to noise ratio as a function of the gain  $M$ .

**Theory questions:**

- Illustrate the conversion efficiency limiting factors in solar cells.
- Illustrate light emission mechanisms in direct and indirect bandgap semiconductors, explaining which of the two category is more suitable as a light source.

**Physical constants:**

electron rest mass  
 Planck constant  
 electron charge  
 Boltzmann constant  
 speed of light  
 vacuum permittivity

$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$   
 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$   
 $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
 $k_B = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$   
 $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$   
 $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$