

**Esercizio 1:**

Una fibra ottica step-index, progettata per operare alla lunghezza d'onda  $\lambda_0 = 1.31 \mu\text{m}$ , è accoppiata ad una sorgente laser avente uno spettro di larghezza FWHM  $\Delta\lambda_{1/2} = 2 \text{ nm}$ . Tale fibra possiede le seguenti caratteristiche: diametro del core  $d_1 = 9 \mu\text{m}$ , indice di rifrazione del cladding  $n_2 = 1.451$ , apertura numerica  $NA = 0.1078$ , coefficiente di dispersione del materiale  $D_m = -7.5 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$  e coefficiente di dispersione della guida  $D_w = -5 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ .

- a) Calcolare l'indice di rifrazione del core  $n_1$ .
- b) Determinare la lunghezza d'onda di cut-off della fibra. Che cosa si deduce dal risultato ottenuto?
- c) Determinare la lunghezza  $L$  della fibra ottica tale da garantire un bit rate in codifica RTZ  $B = 2 \text{ Gbit/s}$ .

**Esercizio 2:**

Si consideri un laser a doppia eterostruttura in AlGaAs-GaAs ( $n_s = 3.7$ ) che opera in cavità risonante Fabry-Perot di lunghezza  $L = 200 \mu\text{m}$ . Il laser emette alla lunghezza d'onda di picco  $\lambda_p = 870 \text{ nm}$ . La cavità sfrutta le riflessioni alle interfacce semiconduttore-aria.

- a) Calcolare il modo corrispondente alla lunghezza d'onda di picco.
- b) Calcolare la separazione dei modi  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  e il numero di modi oscillanti sapendo che il guadagno del laser ha una larghezza a metà altezza pari a  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 10 \text{ nm}$ .
- c) Sapendo che il tempo di vita dei fotoni in cavità è pari a  $T_{\text{PH}} = 2 \text{ ps}$ , calcolare le perdite interne  $\alpha_s$ .

**Esercizio 3:**

Si consideri un rivelatore APD in silicio la cui struttura prevede uno strato superficiale trattato antiriflesso di tipo  $n^+$  di spessore  $W_{n^+} = 2 \mu\text{m}$ , una regione di valanga drogata p ( $N_{A,av} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) di spessore  $W_{p,av} = 1 \mu\text{m}$ , una zona quasi intrinseca  $\pi$  ( $N_{A,\pi} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ) di spessore  $W_{\pi} = 20 \mu\text{m}$  e un substrato  $p^+$ . 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  $k = 0.1$ .

- a) 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  $E_{\pi} = 55 \text{ kV/cm}$ .
- b) Calcolare la frazione di potenza ottica incidente sul dispositivo assorbita rispettivamente nella zona p di valanga e nella zona  $\pi$  assumendo un coefficiente di assorbimento  $\alpha = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ .
- c) Fornire una stima del tempo di risposta del fotodiodo a valanga specificando il significato di ciascun contributo.

**Domande di teoria:**

- a) Descrivere il funzionamento di un laser a 4 livelli specificandone i vantaggi rispetto ad un laser a 3 livelli e illustrandone un esempio tra i laser a gas.
- b) Illustrare i contributi di dispersione di una fibra ottica multimodale. Specificare i contributi intramodali e intermodali.

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

<b>Si</b>	
costante dielettrica relativa $\epsilon_r$	11.7
velocità di saturazione $v_{\text{sat}}$ [ $\text{cm s}^{-1}$ ]	$10^7$
concentrazione intrinseca $n_i$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.45 \times 10^{10}$
gap di energia $E_G$ [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:**

A step-index optical fiber, designed to operate at  $\lambda_0 = 1.31 \mu\text{m}$ , is coupled to a laser source with a FWHM spectral linewidth  $\Delta\lambda_{1/2} = 2 \text{ nm}$ . Such fiber has the following characteristics: core diameter  $d = 8 \mu\text{m}$ , cladding refractive index  $n_2 = 1.451$ , normalized index difference  $\Delta = 2.75 \text{ ‰}$ , material dispersion coefficient  $D_m = -7.5 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$  and waveguide dispersion coefficient  $D_w = -5 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ .

- Calculate the refracting index of the core  $n_1$ .
- Determine the cutoff wavelength of the fiber. What can be deduced from the result?
- Determine the length  $L$  of the fiber such as to ensure a RTZ bit rate  $B = 2 \text{ Gbit/s}$ .

**Exercise 2:**

Consider an AlGaAs-GaAs double heterostructure laser ( $n_s = 3.7$ ) operating in a Fabry-Perot resonant cavity of length  $L = 200 \mu\text{m}$ . The laser emits at the peak wavelength  $\lambda_p = 870 \text{ nm}$ . The cavity takes advantage of reflections at the semiconductor-air interfaces.

- Calculate the mode corresponding to the peak wavelength.
- Calculate the mode separation  $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$  and the number of oscillating modes, knowing that the laser gain has a width at half height equal to  $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 10 \text{ nm}$ .
- Knowing that the lifetime of the photons in the cavity is equal to  $T_{\text{PH}} = 2 \text{ ps}$ , calculate the internal losses  $\alpha_s$ .

**Exercise 3:**

Consider a silicon APD structure with a AR coated  $n^+$ -doped surface layer of thickness  $W_{n^+} = 2 \mu\text{m}$ , a p-doped ( $N_{A,p} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) avalanche layer of thickness  $W_{p,av} = 1 \mu\text{m}$ , a light-doped ( $N_{A,\pi} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ )  $\pi$ -layer of thickness  $W_\pi = 20 \mu\text{m}$  and a  $p^+$  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  $E_\pi = 55 \text{ kV/cm}$ .
- 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:**

- Describe the operation of a 4-level laser specifying its advantages compared to a 3-level laser and illustrating an example among gas lasers.
- Illustrate the dispersion contributions of a multimode optical fiber. Specify the intramodal and intermodal contributions.

**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
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 $N_V$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$1.04 \times 10^{19}$