

Esercizio 1:

Un sistema di comunicazione ottico lavora alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 1100 \text{ nm}$ e utilizza una fibra ottica step-index caratterizzata da un diametro del core $d = 5 \text{ }\mu\text{m}$ e da un indice di rifrazione del cladding $n_2 = 1.4$. La fibra ha coefficienti di dispersione del materiale e di guida d'onda rispettivamente pari a $D_m = -26 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ e $D_w = -6 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$. La sorgente è un diodo laser VCSEL caratterizzato da una larghezza spettrale di emissione $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.2 \text{ nm}$.

- a) Dimensionare l'indice di rifrazione del core n_1 affinché la fibra sia monomodale e il massimo angolo d'accettazione sia $\alpha_{\text{MAX}} \geq 8^\circ$. (Assumere l'aria come mezzo di accoppiamento sorgente – fibra).
- b) Considerando i contributi di dispersione si determini la massima lunghezza della fibra compatibile con un bit rate *return-to-zero* $B_{\text{RTZ}} = 10 \text{ Gbps}$.
- c) Considerando una sorgente LED di pari lunghezza d'onda di emissione, ricalcolare la massima lunghezza della fibra compatibile con $B_{\text{RTZ}} = 10 \text{ Gbps}$.

Esercizio 2:

Si consideri un diodo laser *edge-emitting* a doppia eterostruttura in GaAs (indice di rifrazione $n = 3.6$) che opera in regime stazionario alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 870 \text{ nm}$. Il laser ha le seguenti caratteristiche: lunghezza della cavità $L = 350 \text{ }\mu\text{m}$, larghezza del contatto superiore $W = 3 \text{ }\mu\text{m}$, spessore del layer attivo $d = 80 \text{ nm}$, tempo di vita dei fotoni in cavità $\tau_{\text{ph}} = 3 \text{ ps}$, tempo di emissione spontanea $\tau_r = 2 \text{ ns}$, corrente di soglia $I_{\text{TH}} = 20 \text{ mA}$. La cavità sfrutta le riflessioni alle interfacce semiconduttore-aria.

- a) Determinare la concentrazione di elettroni liberi a soglia n_{TH} .
- b) Calcolare la *slope-efficiency* η_s .
- c) Valutare la massima variazione di temperatura ammissibile per limitare il *mode sweeping* a $\Delta\lambda_{0,\text{MS}} = 10 \text{ pm}$, sapendo che $\frac{\partial n}{\partial T} = 2.67 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ e che il coefficiente di dilatazione termica lineare del materiale è $\alpha_L = \frac{dL}{L dT} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Esercizio 3:

Si consideri un fotorivelatore APD in silicio caratterizzato da un'estensione della zona di valanga pari a $W_p = 1.5 \text{ }\mu\text{m}$, da una corrente di buio primaria $I_{d,0} = 2 \text{ nA}$, e da un fattore di eccesso di rumore $F = M^x$, con $x = 0.3$. Il fotodiodo è collegato ad un circuito di lettura costituito da una resistenza di carico $R_L = 22 \text{ k}\Omega$, e da un preamplificatore con densità spettrale di potenza del rumore di corrente riferito all'ingresso $S_{i,a} = (2.5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. La banda del circuito è $BW = 20 \text{ MHz}$. Si assuma una fotocorrente primaria $I_{\text{ph},0} = 0.5 \text{ nA}$.

- a) Assumendo un guadagno $M = 100$ e considerando il contributo di ionizzazione dovuto alle lacune ($k = \alpha_h/\alpha_e = 0.1$), determinare il coefficiente di ionizzazione degli elettroni α_e .
- b) Calcolare il rapporto segnale rumore SNR [dB] in assenza di moltiplicazione ($M=1$).
- c) Determinare il guadagno ottimo M_{opt} , calcolare il rapporto segnale rumore SNR [dB] corrispondente, e tracciare un grafico di SNR [dB] in funzione del guadagno M .

Domande di teoria:

- a) Illustrare il principio di funzionamento di una sorgente laser, descrivendo le principali caratteristiche della radiazione emessa.
- b) Discutere la scelta dei materiali nelle sorgenti LED, in particolare per quanto riguarda il colore della luce emessa.

Costanti fisiche:

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

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

Exercise 1:

An optical communication system working at $\lambda_0 = 1100$ nm uses a step-index optical fiber with a core of diameter $d = 5$ μm and a cladding of refractive index $n_2 = 1.4$. The material and waveguide dispersion coefficients are $D_m = -26 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ and $D_w = -6 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$, respectively. The light source is a VCSEL laser diode with an emission spectral width of $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.2$ nm.

- Design the core refractive index n_1 in order to have a single mode fiber and a maximum acceptance angle $\alpha_{\text{MAX}} \geq 8^\circ$. (Assume air as the source – fiber coupling medium).
- Considering the dispersion contributions, find the maximum fiber length L_{MAX} consistent with a *return-to-zero* bit rate $B_{\text{RTZ}} = 10$ Gbps.
- Considering a LED source emitting at the same wavelength, recalculate the maximum fiber length consistent with $B_{\text{RTZ}} = 10$ Gbps.

Exercise 2:

Consider a GaAs double heterostructure edge-emitting laser diode (refractive index $n = 3.6$) operating in CW at $\lambda_0 = 870$ nm. The laser has the following properties: cavity length $L = 350$ μm , top electrode width $W = 3$ μm , active layer thickness $d = 80$ nm, photon cavity lifetime $\tau_{\text{ph}} = 3$ ps, spontaneous decay time constant $\tau_r = 2$ ns, threshold current $I_{\text{TH}} = 20$ mA. The cavity uses the reflections at the semiconductor-air interfaces.

- Determine the threshold electron concentration n_{TH} .
- Calculate the *slope-efficiency* η_s .
- Find the maximum allowable temperature variation to have a *mode sweeping* lower than $\Delta\lambda_{0,\text{MS}} = 10$ pm, knowing that $\frac{\partial n}{\partial T} = 2.67 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ and that the linear expansion coefficient of GaAs is $\alpha_L = \frac{dL}{L dT} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Exercise 3:

Consider a Silicon APD photodetector having an avalanche region of extension $W_p = 1.5$ μm . The photodiode is connected to an electronic read-out circuit consisting in a load resistor $R_L = 22$ k Ω , and in a preamplifier that has equivalent input current noise with a power spectral density $S_{i,a} = (2.5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. The circuit bandwidth is $BW = 20$ MHz. The photodiode has an excess noise factor $F = M^x$, with $x = 0.3$, a primary dark current $I_{d,0} = 2$ nA, and a primary photocurrent $I_{\text{ph},0} = 0.5$ nA.

- Assuming a multiplication gain $M = 100$ and considering ionizations initiated by holes ($k = \alpha_h/\alpha_e = 0.1$), determine the electron ionization coefficient α_e .
- Calculate the signal to noise ratio SNR [dB] without multiplication ($M = 1$).
- Determine the optimum gain M_{opt} , calculate the corresponding signal to noise ratio SNR [dB], and plot a graph of SNR [dB] as a function of the gain M .

Theory questions:

- Illustrate the working principle of a laser source, describing the main properties of the emitted radiation.
- Discuss the choice of materials in LED sources, in particular with regard to the color of the emitted light.

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