

Esercizio 1:

Un sistema di comunicazione ottico in terza finestra ($\lambda = 1.55 \mu\text{m}$) utilizza una fibra ottica step-index con un core di diametro $d = 6 \mu\text{m}$ e indice di rifrazione $n_1 = 1.44$ e un cladding di indice di rifrazione $n_2 = 1.43$. La fibra ha un coefficiente di attenuazione $\alpha_{FO} = 1.8 \text{ dB/km}$ e un coefficiente di dispersione cromatica $D_{ch} = 12 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$. All'ingresso della fibra è accoppiata una sorgente lambertiana ($\Delta\lambda_{1/2} = 50 \text{ nm}$) che ha un tempo di risposta $t_{r, LED} = 5 \text{ ns}$ ed emette una potenza $P_s = 5 \text{ mW}$. Il rivelatore posto a valle della fibra ottica ha un tempo di risposta $t_{r, DET} = 0.5 \text{ ns}$ e una sensibilità $S = 1 \text{ nW}$. Tale sistema prevede inoltre le seguenti perdite di potenza: perdita in corrispondenza della giunzione tra due spezzoni di fibra consecutivi $\alpha_j = 1 \text{ dB}$ e perdita dovuta all'accoppiamento con il rivelatore $\alpha_d = 1.5 \text{ dB}$.

- a) Stabilire se la fibra è monomodale o multimodale.
- b) Determinare la massima lunghezza della fibra imposta dall'attenuazione del segnale ottico, sapendo che il singolo spezzone di fibra a disposizione è lungo $L_s = 1.5 \text{ km}$.
- c) Valutare se la massima lunghezza della fibra calcolata al punto precedente è compatibile con un bit rate in codifica *return-to-zero* $B_{RTZ} = 20 \text{ Mbit/s}$.

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 $L = 250 \mu\text{m}$, larghezza del contatto superiore $W = 5 \mu\text{m}$, spessore del layer attivo $d = 70 \text{ nm}$, tempo di vita dei fotoni in cavità $\tau_{ph} = 2 \text{ ps}$, tempo di emissione spontanea $\tau_r = 2 \text{ ns}$, corrente di soglia $I_{TH} = 13 \text{ mA}$. La cavità sfrutta le riflessioni alle interfacce semiconduttore-aria.

- a) Calcolare le perdite interne α_s .
- b) Determinare la concentrazione di elettroni liberi a soglia n_{TH} .
- c) Calcolare la *slope-efficiency* η_s e la potenza d'uscita P_O quando la corrente di polarizzazione è $I = 20 \text{ mA}$.

Esercizio 3:

Si consideri un fotodiodo pin in silicio caratterizzato da uno strato superficiale p^+ trattato antiriflesso di spessore $W_{p^+} = 300 \text{ nm}$ e da una zona intrinseca di spessore $W_i = 15 \mu\text{m}$. Il rivelatore, la cui apertura a sezione circolare presenta un diametro $d = 0.5 \text{ mm}$, risulta illuminato da una radiazione di intensità $I_{ott} = 0.1 \text{ mW/cm}^2$.

- a) Tracciare il profilo spaziale della potenza ottica nel rivelatore valutando la frazione assorbita nella zona p^+ e nella zona intrinseca quando il coefficiente di assorbimento del materiale assume come valori $\alpha_1 = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ ($\lambda_1 = 800 \text{ nm}$) e $\alpha_2 = 10 \mu\text{m}^{-1}$ ($\lambda_2 = 400 \text{ nm}$).
- b) Assumendo $\lambda = \lambda_2$, valutare lo spessore W_{p^+} tale per cui la potenza assorbita nella zona intrinseca risulti uguale a quella calcolata al punto precedente per $\lambda = \lambda_1$ e $W_{p^+} = 300 \text{ nm}$.
- c) Calcolare lo spessore W_i tale da determinare una corrente $I_{ph} = 100 \text{ nA}$ assumendo $\lambda = \lambda_1$ e $W_{p^+} = 300 \text{ nm}$.

Domande di teoria:

- a) Illustrare i meccanismi di allargamento della riga di guadagno ottico nelle sorgenti laser, riferendosi in particolare ai laser He-Ne e $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$.
- 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	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
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	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

Exercise 1:

An optical communication system operating at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ uses a step-index optical fiber with core of diameter $d = 6 \mu\text{m}$ and refractive index $n_1 = 1.44$ and a cladding of refractive index $n_2 = 1.43$. The fiber has an attenuation coefficient $\alpha_{FO} = 1.8 \text{ dB/km}$ and a chromatic dispersion coefficient $D_{ch} = 12 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$. The lambertian light source ($\Delta\lambda_{1/2} = 50 \text{ nm}$) coupled to the fiber input has a response time $t_{r, LED} = 5 \text{ ns}$ and emits a power $P_S = 5 \text{ mW}$. The detector located at the end of fiber has a response time $t_{r, DET} = 0.5 \text{ ns}$ and a sensitivity $S = 1 \text{ nW}$. Furthermore, this system has the following power losses: the junction loss between two parts of fiber $\alpha_j = 1 \text{ dB}$ and the coupling loss with the detector $\alpha_d = 1.5 \text{ dB}$.

- 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 $L_s = 1.5 \text{ km}$.
- Evaluate if the previously calculated maximum length is compatible with a *return-to-zero* $B_{RTZ} = 20 \text{ Mbit/s}$.

Exercise 2:

Consider a GaAs double heterostructure edge-emitting laser diode (refractive index $n = 3.6$) operating in CW at $\lambda_0 = 870 \text{ nm}$. The laser has the following properties: cavity length $L = 250 \mu\text{m}$, top electrode width $W = 5 \mu\text{m}$, active layer thickness $d = 70 \text{ nm}$, photon cavity lifetime $\tau_{ph} = 2 \text{ ps}$, spontaneous decay time constant $\tau_r = 2 \text{ ns}$, threshold current $I_{TH} = 13 \text{ mA}$. The cavity uses the reflections at the semiconductor-air interfaces.

- Calculate the internal losses α_s .
- Determine the threshold electron concentration n_{TH} .
- Calculate the *slope-efficiency* η_s and the output power P_O when the bias current is $I = 20 \text{ mA}$.

Exercise 3:

Consider a Si-pin photodiode with an AR coated p^+ layer of thickness $W_{p^+} = 300 \text{ nm}$ and an intrinsic layer of thickness $W_i = 15 \mu\text{m}$. Such detector, which has a circular aperture of diameter $d = 0.5 \text{ mm}$, is illuminated by a light of optical intensity $I_{ott} = 0.1 \text{ mW/cm}^2$.

- Draw the evolution of the optical power in the photodiode and calculate the absorbed power in the p^+ and intrinsic (i) layer, respectively, in case of absorption coefficient equal to $\alpha_1 = 0.1 \mu\text{m}^{-1}$ ($\lambda_1 = 800 \text{ nm}$) and $\alpha_2 = 10 \mu\text{m}^{-1}$ ($\lambda_2 = 400 \text{ nm}$).
- Calculate the p^+ -layer thickness W_{p^+} such that the absorbed power in the i-layer for $\lambda = \lambda_2$ is equal to one previously calculated for $\lambda = \lambda_1$ and $W_{p^+} = 300 \text{ nm}$.
- Calculate the i-layer thickness W_i to have a photogenerated current $I_{ph} = 100 \text{ nA}$ assuming $\lambda = \lambda_1$ and $W_{p^+} = 300 \text{ nm}$.

Theory questions:

- Explain the optical gain curve broadening mechanisms in laser sources, in particular regarding the He-Ne and $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ lasers.
- 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	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
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	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$