

Esercizio 1:

Si consideri un diodo laser *edge-emitting* a doppia eterostruttura in GaAs (indice di rifrazione del mezzo attivo $n = 3.6$) che opera in regime stazionario alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 850$ nm. Il laser ha le seguenti caratteristiche: lunghezza della cavità $L = 250$ μm , larghezza del contatto superiore $W = 6$ μm , spessore del layer attivo $d = 70$ nm, tempo di vita dei fotoni in cavità $\tau_{\text{ph}} = 2.4$ ps, fattore di confinamento $\Gamma = 1$, tempo di emissione spontanea $\tau_r = 2$ ns, concentrazione di elettroni liberi a soglia $n_{\text{TH}} = 1.85 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} . La cavità sfrutta le riflessioni alle interfacce semiconduttore-aria.

- a) Calcolare le perdite interne α_s .
- b) Determinare la concentrazione di fotoni in cavità N_{ph} quando il laser è polarizzato alla corrente $I = 40$ mA.
- c) Valutare lo spostamento della lunghezza d'onda di emissione λ_0 in seguito a una variazione della temperatura di operazione $\Delta T = 5$ K, sapendo che $\frac{\partial n}{\partial T} = 2.6 \cdot 10^{-4}$ K^{-1} e che il coefficiente di dilatazione termica lineare del materiale è $\alpha_L = \frac{dL}{L dT} = 5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} .

Esercizio 2:

Un sistema di comunicazione ottico lavora alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 1310$ nm e utilizza una fibra ottica *step-index* caratterizzata da un diametro del core $d = 5$ μm e da un indice di rifrazione del cladding $n_2 = 1.44$. La fibra ha coefficienti di dispersione del materiale e di guida d'onda rispettivamente pari a $D_m = -8 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ e $D_w = -12 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$. La sorgente è un diodo laser caratterizzato da una larghezza spettrale di emissione $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.4$ nm, ed accoppiato alla fibra mediante una resina epossidica di indice di rifrazione $n_0 = 1.42$.

- a) Considerando un indice di rifrazione del core $n_1 = 1.48$, calcolare la lunghezza d'onda di *cutoff* e commentare il risultato ottenuto.
- b) Dimensionare l'indice di rifrazione del core n_1 affinché la fibra sia monomodale e il massimo angolo d'accettazione sia $\alpha_{\text{MAX}} \geq 6^\circ$.
- c) Determinare la massima lunghezza della fibra compatibile con un bit rate *return-to-zero* $B_{\text{RTZ}} = 2$ Gbps.

Esercizio 3:

Si consideri un fotodiodo *reach-through* APD in silicio avente le seguenti caratteristiche: estensione della regione di assorbimento $W_\pi = 20$ μm , estensione della regione di valanga $W_{p,av} = 600$ nm, estensione dello strato n+ superficiale $W_{n+} = 200$ nm, corrente di buio primaria $I_{d,0} = 1$ nA, fattore di eccesso di rumore $F = M^x$, con $x = 0.7$. Il fotodiodo è collegato ad un circuito di lettura costituito da una resistenza di carico $R_L = 47$ k Ω , e da un preamplificatore con densità spettrale di potenza del rumore di corrente riferito all'ingresso $S_{i,a} = (1.5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. La banda del circuito è $BW = 20$ MHz. Si assuma una fotocorrente primaria $I_{\text{ph},0} = 550$ pA.

- a) Calcolare la frazione di potenza ottica incidente sul dispositivo assorbita rispettivamente nella zona p di valanga e nella zona π di assorbimento, assumendo un coefficiente di assorbimento $\alpha = 10^3$ cm^{-1} .
- b) Assumendo un guadagno $M = 100$ e considerando il contributo di ionizzazione dovuto alle lacune ($k = \alpha_h/\alpha_e = 0.12$), determinare il coefficiente di ionizzazione degli elettroni α_e .
- c) Determinare il guadagno ottimo M_{opt} e calcolare il rapporto segnale rumore SNR [dB] corrispondente.

Domande di teoria:

- a) Descrivere la struttura ed il principio di funzionamento del laser He-Ne, illustrando le principali caratteristiche della radiazione emessa.
- b) Illustrare il principio di funzionamento di un fotodiodo pn mediante la dimostrazione del teorema di Ramo.

Costanti fisiche:

massa dell'elettrone	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg
costante di Planck	$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J s
carica elettronica	$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C
costante di Boltzmann	$k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J K^{-1}
velocità della luce	$c = 2.998 \cdot 10^8$ m s^{-1}
costante dielettrica nel vuoto	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m^{-1}
Si relative permittivity	$\epsilon_r = 11.7$

Exercise 1:

Consider a GaAs double heterostructure edge-emitting laser diode (refractive index of active medium $n = 3.6$) operating in CW at $\lambda_0 = 850$ nm. The laser has the following properties: cavity length $L = 250$ μm , top electrode width $W = 6$ μm , active layer thickness $d = 70$ nm, photon cavity lifetime $\tau_{\text{ph}} = 2.4$ ps, optical confinement factor $\Gamma = 1$, spontaneous decay time constant $\tau_r = 2$ ns, threshold electron concentration $n_{\text{TH}} = 1.85 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} . The cavity uses the reflections at the semiconductor-air interfaces.

- Determine the internal cavity losses α_s .
- Determine the coherent photon concentration N_{ph} when the laser operates at a current $I = 40$ mA.
- Evaluate the shift of the operation wavelength λ_0 due to a temperature change $\Delta T = 5$ K knowing that $\frac{\partial n}{\partial T} = 2.6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ and that the linear expansion coefficient of GaAs is $\alpha_L = \frac{dL}{L dT} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Exercise 2:

An optical communication system working at $\lambda_0 = 1310$ nm uses a step-index optical fiber with a core of diameter $d = 5$ μm and a cladding of refractive index $n_2 = 1.44$. The material and waveguide dispersion coefficients are $D_m = -8 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$ and $D_w = -12 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$, respectively. The light source is a laser diode with an emission spectral width of $\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = 0.4$ nm, and is coupled to the fiber with an epoxy resin of refractive index $n_0 = 1.42$.

- Considering a core refractive index $n_1 = 1.48$, calculate the *cutoff* wavelength and comment the result.
- Design the core refractive index n_1 in order to have a single mode fiber and a maximum acceptance angle $\alpha_{\text{MAX}} \geq 6^\circ$.
- Determine the maximum fiber length L_{MAX} consistent with a *return-to-zero* bit rate $B_{\text{RTZ}} = 2$ Gbps .

Exercise 3:

Consider a silicon *reach-through* APD with the following characteristics: absorption region π of width $W_\pi = 20$ μm , avalanche region of width $W_{\text{p,av}} = 600$ nm, surface layer n^+ of width $W_{n^+} = 200$ nm, primary dark current $I_{d,0} = 1$ nA, excess noise factor $F = M^x$, with $x = 0.7$. The photodiode is connected to an electronic read-out circuit consisting in a load resistor $R_L = 47$ k Ω , and in a preamplifier that has equivalent input current noise with a power spectral density $S_{i,a} = (1.5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. The circuit bandwidth is $BW = 20$ MHz. Assume a primary photocurrent $I_{\text{ph},0} = 2$ nA.

- Calculate the percentage of incident optical power absorbed in the avalanche p layer and absorption π layer, respectively, assuming an absorption coefficient $\alpha = 10^3 \text{ cm}^{-1}$.
- Assuming a multiplication gain $M = 100$ and considering ionizations initiated by holes ($k = \alpha_h/\alpha_e = 0.12$), determine the electron ionization coefficient α_e .
- Determine the optimum gain M_{opt} , and calculate the corresponding signal to noise ratio SNR [dB].

Theory questions:

- Illustrate the structure and working principle of a He-Ne laser, describing the main properties of the emitted radiation.
- Illustrate the operation principle of a pn junction photodiode by the demonstration of Ramo theorem.

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	$\epsilon_r = 11.7$