

Esercizio 1:

Si consideri un diodo laser *edge-emitting* a doppia eterostruttura (indice di rifrazione $n = 3.6$) che opera in regime stazionario alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 800$ nm. Il laser ha le seguenti caratteristiche: lunghezza della cavità $L = 300$ μm , larghezza del contatto superiore $W = 4$ μm , spessore del layer attivo $d = 200$ nm, tempo di emissione spontanea $\tau_r = 2.5$ ns, *slope-efficiency* $\eta_s = 0.7$ W/A, potenza d'uscita $P_O = 50$ mW, corrente di polarizzazione $I = 100$ mA, larghezza a metà altezza della riga di guadagno $\Delta\lambda_{1/2} = 5$ nm. La cavità sfrutta le riflessioni alle interfacce semiconduttore-aria.

- Determinare il numero di modi oscillanti in cavità.
- Calcolare la corrente di soglia I_{TH} e la concentrazione di elettroni liberi a soglia n_{TH} .
- Calcolare il tempo di vita dei fotoni in cavità.

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 una differenza di indici normalizzata $\Delta = 1.36\%$, da un'apertura numerica $NA = 0.24$, e da un core di raggio $a = 10$ μm . La fibra ha un coefficiente di attenuazione $\alpha_F = 2.5$ dB/km e un coefficiente di dispersione cromatica $D_{ch} = -15 \frac{\text{ps}}{\text{nm km}}$, ed è accoppiata ad una sorgente LED ($\Delta\lambda_{FWHM} = 110$ nm) ad emissione lambertiana che emette una potenza $P_{LED} = 5$ mW. Il rivelatore a valle del sistema presenta rapporto segnale rumore unitario per potenze incidenti pari a $P_{DET} = 100$ nW ed è accoppiato alla fibra con una perdita $\alpha_{DET} = 3$ dB. Si consideri un bit rate *non-return-to-zero* $B_{NRZ} = 1$ Mbps.

- Determinare gli indici di rifrazione di core e cladding.
- Calcolare il numero di modi che si propagano in fibra.
- Considerando i contributi di dispersione e di attenuazione, valutare la massima lunghezza della fibra.

Esercizio 3:

Si consideri un fotorivelatore pin in silicio su cui incide un segnale ottico di lunghezza d'onda $\lambda = 600$ nm ($\alpha = 4 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$). Il fotodiodo è caratterizzato da un'estensione della zona intrinseca $W = 15$ μm , da un'estensione della zona p^+ superficiale $x_p = 500$ nm, e da una corrente di buio $I_d = 2$ nA. Si consideri la superficie del rivelatore ricoperta da uno strato antiriflesso. 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 $S_{i,a} = (5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. La banda del circuito è $BW = 20$ MHz.

- Calcolare la responsività del fotodiodo.
- Determinare il minimo segnale rivelabile in termini di fotocorrente e potenza ottica incidente.
- Riportare in un grafico quotato l'andamento del rapporto segnale rumore SNR_{dB} in funzione della potenza ottica incidente.

Domande di teoria:

- Discutere il principio di funzionamento dei laser a 3 livelli e 4 livelli.
- Descrivere la struttura ed il principio di funzionamento di un fotodiodo a valanga, mettendo in luce i vantaggi rispetto ad un fotodiodo pin.

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 $^{-1}$
 $c = 2.998 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$
 $\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m $^{-1}$

Exercise 1:

Consider a double heterostructure edge-emitting laser diode (refractive index $n = 3.6$) operating in CW at $\lambda_0 = 800$ nm. The laser has the following properties: cavity length $L = 300$ μm , top electrode width $W = 4$ μm , active layer thickness $d = 200$ nm, spontaneous decay time constant $\tau_r = 2.5$ ns, slope-efficiency $\eta_s = 0.7$ W/A, output power $P_O = 50$ mW, bias current $I = 100$ mA, optical gain linewidth $\Delta\lambda_{1/2} = 5$ nm. The cavity uses the reflections at the semiconductor-air interfaces.

- Determine the number of oscillating cavity modes.
- Calculate the threshold current I_{TH} and the threshold electron concentration n_{TH} .
- Calculate the photon cavity lifetime.

Exercise 2:

An optical communication system working at $\lambda_0 = 1310$ nm uses a step-index optical fiber with a core of radius $a = 10$ μm , a normalized index difference $\Delta = 1.36\%$, and a numerical aperture $NA = 0.24$. The fiber has an attenuation coefficient $\alpha_F = 2.5$ dB/km and a chromatic dispersion coefficient $D_{ch} = -15 \frac{ps}{nm \cdot km}$, and is coupled to a lambertian LED source ($\Delta\lambda_{FWHM} = 110$ nm) emitting a power $P_{LED} = 5$ mW. The detector at the end of the fiber has unitary signal to noise ratio for an input power $P_{DET} = 100$ nW. The detector-fiber coupling loss is $\alpha_{DET} = 3$ dB. Consider a *non-return-to-zero* bit rate $B_{NRZ} = 1$ Mbps.

- Determine core and cladding refractive indexes.
- Calculate the number of modes propagating along the fiber.
- Considering both dispersion and attenuation contributions, evaluate the maximum fiber length.

Exercise 3:

Consider a silicon pin photodetector having an intrinsic region of extension $W = 15$ μm , and a p^+ surface layer of extension $x_p = 500$ nm with antireflection coating. To detect a light signal of wavelength $\lambda = 600$ nm ($\alpha = 4 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$), 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 $S_{i,a} = (5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. The circuit bandwidth is $BW = 20$ MHz. The photodiode has a dark current $I_{d,0} = 2$ nA.

- Calculate the photodiode responsivity.
- Determine the minimum measurable signal in terms of photocurrent and input optical power.
- Plot a quantitative graph of the signal-to-noise ratio SNR_{dB} as a function of the input optical power.

Theory questions:

- Discuss the working principle of 3 levels and 4 levels laser sources.
- Describe the structure and the working principle of avalanche photodiodes, highlighting the advantages with respect to pin photodiodes.

Physical constants:

electron rest mass	$m_0 = 9.109 \cdot 10^{-31}$ kg
Planck constant	$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J s
electron charge	$e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C
Boltzmann constant	$k_B = 1.381 \cdot 10^{-23}$ J K $^{-1}$
speed of light	$c = 2.998 \cdot 10^8$ m s $^{-1}$
vacuum permittivity	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m $^{-1}$