

Esercizio 1:

Si consideri un laser He-Ne ($m_{\text{He}} = 0.66 \cdot 10^{-26}$ kg e $m_{\text{Ne}} = 3.35 \cdot 10^{-26}$ kg) operante in regime stazionario alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 632.8$ nm, realizzato mediante una cavità ottica Fabry-Perot di lunghezza $L = 40$ cm. Gli specchi hanno riflettività $R_1 = 95\%$ e $R_2 = 99.9\%$. Il tempo di vita dei fotoni in cavità è $\tau_{\text{PH}} = 20$ ns, il coefficiente di Einstein per l'emissione stimolata è $B_{21} = 1.52 \cdot 10^{20}$ m kg⁻¹. Si consideri la miscela gassosa alla temperatura $T = 150$ °C, e la riga di guadagno allargata per effetto Doppler.

- a) Calcolare il numero di modi oscillanti in cavità.
- b) Determinare le perdite interne α_s .
- c) Stimare l'inversione di popolazione a soglia.

Esercizio 2:

Si consideri un LED realizzato in InGaN che opera a temperatura $T = 300$ K (energy gap $E_g(300\text{ K}) = 2.8$ eV). Il dispositivo è caratterizzato da un'efficienza quantica esterna $\eta_{\text{EQE}} = 15\%$, ed ai suoi capi cade una tensione diretta $V_F = 3$ V. La dipendenza dell'energy gap dalla temperatura è descritta dall'equazione di Varshni: $E_g(T) = E_{g,0} - \frac{AT^2}{B+T}$, con $A = 4.62 \cdot 10^{-4}$ eV/K e $B = 420$ K.

- a) Determinare la lunghezza d'onda centrale λ_0 e la larghezza a metà altezza $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ dello spettro d'emissione.
- b) Calcolare l'efficienza di conversione η_{PCE} e la potenza ottica emessa quando la corrente di polarizzazione è $I_F = 5$ mA.
- c) Calcolare la variazione di temperatura che causa uno spostamento di 1.5 nm del picco di emissione λ_0 , e calcolare la corrispondente variazione della larghezza a metà altezza dello spettro d'emissione.

Esercizio 3:

Si consideri un fotorivelatore APD in silicio caratterizzato da un'estensione della zona di valanga pari a $W_p = 1.5$ µm. Il fotodiodo è collegato ad un circuito di lettura costituito da una resistenza di carico $R_L = 20$ kΩ, e da un preamplificatore con densità spettrale di potenza del rumore di corrente riferito all'ingresso $S_{i,a} = (100 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. La banda del circuito è $BW = 20$ MHz. Il fotodiodo è caratterizzato da un fattore di eccesso di rumore $F = M^x$, con $x = 0.75$, e da una corrente di buio primaria $I_{d,0} = 5$ nA. Si assuma una fotocorrente primaria $I_{ph,0} = 2$ nA.

- a) Determinare il coefficiente di ionizzazione degli elettroni α_e , assumendo un guadagno $M = 100$ e trascurando il contributo di ionizzazione dovuto alle lacune ($k = \alpha_n/\alpha_e = 0$).
- b) Calcolare il rapporto segnale rumore SNR [dB] prima in assenza di moltiplicazione ($M = 1$) e in seguito per $M = 100$.
- c) Tracciare un grafico del rapporto segnale rumore in funzione del guadagno M e spiegarne l'andamento.

Domande di teoria:

- a) Descrivere il principio di funzionamento di una guida d'onda planare, illustrando la condizione di propagazione guidata e discutendo il numero di modi di propagazione.
- b) Definire l'efficienza luminosa di un LED, discutendo la differenza rispetto ad una sorgente ad incandescenza.

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

Exercise 1:

Consider a He-Ne laser ($m_{He} = 0.66 \cdot 10^{-26}$ kg e $m_{Ne} = 3.35 \cdot 10^{-26}$ kg) operating in CW at $\lambda_0 = 632.8$ nm. The length of the Fabry-Perot optical cavity is $L = 40$ cm, the reflectances of the end mirrors are $R_1 = 95\%$ and $R_2 = 99.9\%$, the photon cavity lifetime is $\tau_{PH} = 20$ ns, the Einstein coefficient for stimulated emission is $B_{21} = 1.52 \cdot 10^{20}$ m kg⁻¹. Consider the gaseous mixture at temperature $T = 150$ °C, and a Doppler broadened linewidth.

- a) Calculate the number of oscillating cavity modes.
- b) Determine the internal losses α_s .
- c) Estimate the threshold population inversion.

Exercise 2:

Consider an InGaN LED operating at temperature $T = 300$ K (energy gap $E_g(300\text{ K}) = 2.8$ eV). The external quantum efficiency is $\eta_{EQE} = 15\%$, and the forward voltage $V_F = 3$ V. The energy gap dependence on temperature is described by the Varshni equation: $E_g(T) = E_{g,0} - \frac{AT^2}{B+T}$, with $A = 4.62 \cdot 10^{-4}$ eV/K and $B = 420$ K.

- a) Determine the central wavelength λ_0 corresponding to peak emission and the spectral linewidth $\Delta\lambda_{FWHM}$.
- b) Calculate the conversion efficiency η_{PCE} , and the emitted optical power when the bias current is $I_F = 5$ mA.
- c) Calculate the temperature variation resulting in a λ_0 variation of 1.5 nm, and calculate the corresponding spectral linewidth variation.

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 $R_L = 20$ kΩ, and in a preamplifier that has equivalent input current noise with a power spectral density $S_{i,a} = (100 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}})^2$. The circuit bandwidth is $BW = 20$ MHz. The photodiode has an excess noise factor $F = M^x$, with $x = 0.75$, a primary dark current $I_{d,0} = 5$ nA, and a primary photocurrent $I_{ph,0} = 2$ nA.

- a) Determine the electron ionization coefficient α_e , assuming a multiplication gain $M = 100$ and neglecting ionization by holes ($k = \alpha_h/\alpha_e = 0$).
- b) Calculate the signal to noise ratio SNR [dB] first without multiplication ($M = 1$) and then for $M = 100$.
- c) Plot and explain a graph of the signal to noise ratio as a function of the gain M .

Theory questions:

- a) Describe the working principle of a planar waveguide, illustrating the waveguide condition and discussing the number of propagating modes.
- b) Define the luminous efficiency of a LED, and discuss the differences with respect to an incandescent light source.

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