

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) che opera in regime stazionario alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 632.8$ nm. La cavità Fabry-Perot è realizzata mediante un tubo in quarzo (coefficiente di espansione lineare $\alpha = \frac{dL}{L dT} = 0.59 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹), alle cui estremità sono posti due specchi di riflettività $R_1 = 96\%$ e $R_2 = 99.99\%$. Si conoscono le perdite interne $\alpha_s = 0.05$ m⁻¹ e l'allargamento di riga per effetto Doppler $\Delta\nu_{\text{FWHM}} = 1.55$ GHz.

- Determinare la temperatura T [°C] all'interno della cavità.
- Progettare la lunghezza L della cavità per avere:
 - un solo modo longitudinale oscillante, corrispondente al centro della riga di guadagno.
 - un guadagno di soglia g_{TH} inferiore a 0.3 m⁻¹.
 Indicare il numero m del modo oscillante.
- Calcolare la massima variazione di temperatura ammissibile per limitare il *mode sweeping* a $\Delta\lambda_{0,\text{MS}} = \Delta\lambda_{\text{FWHM}}/10$.

Esercizio 2:

Si consideri un LED realizzato in InGaN (energy gap $E_g = 2.66$ eV) che opera a temperatura ambiente T = 300K. Il dispositivo è caratterizzato da un'efficienza di conversione $\eta_{\text{PCE}} = 13.79\%$, da un'efficienza di estrazione $\eta_{\text{EE}} = 20\%$, ed ai suoi capi cade una tensione diretta $V_F = 2.9$ V.

- Determinare la lunghezza d'onda centrale λ_0 e la larghezza a metà altezza $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ dello spettro d'emissione. Discutere qualitativamente l'effetto di una variazione di temperatura sullo spettro d'emissione del dispositivo.
- Calcolare l'efficienza quantica esterna η_{EQE} , l'efficienza quantica interna η_{IQE} , ed il rapporto tra i rate di ricombinazione radiativa e non radiativa R_r/R_{nr} .
- Sapendo che la sorgente può essere considerata lambertiana e che la potenza totale emessa è pari a $P_0 = 4$ mW, calcolare il numero di fotoni per unità di tempo incidenti su un rivelatore posto a distanza L = 4 m, ad un angolo $\theta = 30^\circ$ rispetto alla direzione di massima emissione. La superficie del rivelatore è circolare di raggio r = 4 mm.

Esercizio 3:

Si consideri un fotodiodo pin in Silicio la cui superficie fotosensibile, di area A = 1mm x 1mm, è trattata con uno strato antiriflesso. Il dispositivo è caratterizzato da un'estensione dello strato p+ superficiale $x_{p+} = 100$ nm e da una regione intrinseca debolmente drogata n ($N_v = 5 \cdot 10^{13}$ cm⁻³) di spessore W = 25 μm. Il fotodiodo deve rivelare una radiazione incidente di lunghezza d'onda $\lambda_0 = 800$ nm ($\alpha = 10^3$ cm⁻¹).

- Determinare la polarizzazione inversa V_{REV} richiesta ai capi del fotodiodo per minimizzare il tempo di transito dei portatori fotogenerati nella zona intrinseca ($F_{\text{SAT}} = 20$ kV/cm).
- Sapendo che la detettività specifica del rivelatore è $D^* = 10^{12}$ cm²√Hz/W, calcolare la densità della corrente di buio J_d . (Si assuma trascurabile il rumore shot associato alla minima fotocorrente rivelabile rispetto al rumore shot della corrente di buio).

Si consideri ora il fotorivelatore collegato ad un circuito di lettura costituito da una resistenza di carico $R_L = 20$ kΩ, da un preamplificatore ideale (rumore trascurabile), e da una banda BW = 5 MHz.

- Si vogliono confrontare le prestazioni del pin, in termini di rapporto segnale rumore, con quelle di un APD (M = 50, F = 5, $I_{d,0} = I_{d,\text{pin}}$) al variare della potenza ottica incidente:
 - Calcolare la potenza ottica di "crossover" P_O^* per la quale si ha $\text{SNR}_{\text{pin}} = \text{SNR}_{\text{APD}}$, ed il rapporto segnale rumore corrispondente.
 - Spiegare quale dei due fotorivelatori risulti vantaggioso, in termini di SNR, per potenze ottiche incidenti rispettivamente inferiori e superiori a P_O^* .

Domande di teoria:

- Illustrare i fattori che limitano la massima lunghezza di una fibra ottica in un sistema di comunicazione, evidenziando l'origine fisica dei vari contributi e le possibili soluzioni.
- Descrivere le caratteristiche che distinguono un diodo LED da un diodo LASER in termini di principio di funzionamento, materiali e struttura del dispositivo.

Exercise 1:

Consider a He-Ne laser ($m_{\text{He}} = 0.66 \cdot 10^{-26}$ kg e $m_{\text{Ne}} = 3.35 \cdot 10^{-26}$ kg) operating in CW at $\lambda_0 = 632.8$ nm. The Fabry-Perot cavity is made of a quartz tube (linear expansion coefficient $\alpha = \frac{dL}{L dT} = 0.59 \cdot 10^{-6}$ K⁻¹). The reflectances of the mirrors at the ends of the tube are $R_1 = 96\%$ and $R_2 = 99.99\%$. The internal loss coefficient is $\alpha_s = 0.05$ m⁻¹ and the Doppler broadened linewidth is $\Delta\nu_{\text{FWHM}} = 1.55$ GHz.

- Determine the operation temperature T [°C] inside the cavity.
- Design the cavity length L to have:
 - only one oscillating longitudinal mode, coinciding with the center of the gain curve.
 - a threshold gain g_{TH} less than 0.3 m⁻¹.
 Specify the number m of the oscillating mode.
- Find the maximum allowable temperature variation to have a *mode sweeping* lower than $\Delta\lambda_{0,\text{MS}} = \Delta\lambda_{\text{FWHM}}/10$.

Exercise 2:

Consider a InGaN LED (energy gap $E_g = 2.66$ eV) operating at room temperature $T = 300$ K. The conversion efficiency is $\eta_{\text{PCE}} = 13.79\%$, the extraction efficiency $\eta_{\text{EE}} = 20\%$, and the forward voltage $V_F = 2.9$ V.

- Determine the central wavelength λ_0 corresponding to peak emission and the spectral linewidth $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$. Discuss qualitatively the dependence of the emission spectrum on temperature.
- Calculate the external quantum efficiency η_{EQE} , internal quantum efficiency η_{IQE} , and the ratio of radiative to non-radiative recombination rate R_r/R_{nr} .
- The LED source emits a total power $P_0 = 4$ mW and has a lambertian emission pattern. Compute the number of photons per unit time impinging on a photodetector placed at a distance $L = 4$ m, at an angle $\theta = 30^\circ$ with respect to maximum emission direction. The photodetector has a circular surface of radius $r = 4$ mm.

Exercise 3:

Consider a Silicon pin photodetector having an AR coated surface and a photosensitive area $A = 1$ mm x 1mm. The p+ surface layer has a thickness $x_{\text{p+}} = 100$ nm, the intrinsic region is slightly n-doped ($N_v = 5 \cdot 10^{13}$ cm⁻³) and has a thickness $W = 25$ μm. The photodiode must detect a light signal of wavelength $\lambda_0 = 800$ nm ($\alpha = 10^3$ cm⁻¹).

- Determine the reverse bias voltage V_{REV} across the diode needed to minimize the photogenerated carriers transit time across the intrinsic region ($F_{\text{SAT}} = 20$ kV/cm).
- Knowing the specific detectivity $D^* = 10^{12}$ cm²√Hz/W, calculate the dark current density J_d . (*Assume the shot noise of the minimum detectable photocurrent negligible with respect to the dark current shot noise*).

Now consider the pin photodiode connected to an electronic read-out circuit consisting in a load resistor $R_L = 20$ kΩ, an ideal preamplifier (negligible noise), and a bandwidth $\text{BW} = 5$ MHz.

- Compare the pin photodiode with an APD ($M = 50$, $F = 5$, $I_{\text{d},0} = I_{\text{d,pin}}$) in terms of signal-to-noise ratio performance at varying incident optical power:
 - Compute the “crossover” optical power P_O^* which gives $\text{SNR}_{\text{pin}} = \text{SNR}_{\text{APD}}$, and the corresponding signal-to-noise ratio.
 - Explain which of the two detectors is advantageous, in terms of SNR, for incident optical power lower and higher than P_O^* , respectively.

Theory questions:

- Illustrate the factors limiting the maximum length of an optical fiber in a communication system, pointing out the physical origin of various mechanisms and the possible solutions.
- Describe the differences between a LED diode and a LASER diode in terms of working principle, materials and device structure.

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
Si relative permittivity	$\epsilon_r = 11.7$