

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 $\lambda_0 = 543.5$ nm. Il laser ha le seguenti caratteristiche: perdite interne $\alpha_s = 0.04$ m⁻¹, perdite totali $\alpha_T = 0.092$ m⁻¹, diametro della cavità Fabry-Perot $d = 1$ mm, *free spectral range* $\Delta\nu_{\text{FSR}} = 500$ MHz, potenza emessa $P_{\text{out}} = 2$ mW, concentrazione di fotoni in cavità $N_{\text{PH}} = 1.55 \cdot 10^{15}$ m⁻³.

- Sapendo che la temperatura operativa è $T = 150$ °C, calcolare l'allargamento di riga per effetto Doppler ed indicare il numero di modi oscillanti in cavità.
- Determinare la lunghezza della cavità.
- Calcolare le riflettività degli specchi R_1 e R_2 .

Esercizio 2:

Si vuole realizzare un sistema di comunicazione ottico in seconda finestra ($\lambda_0 = 1310$ nm) utilizzando una fibra *step-index* caratterizzata da un core di indice di rifrazione $n_1 = 1.45$ e raggio $r = 3$ μm, e da un coefficiente di attenuazione $\alpha_F = 0.8$ dB/km. La sorgente è un LED di tipo lambertiano che emette una potenza ottica $P_{\text{LED}} = 1$ mW. Il rivelatore a valle del sistema è caratterizzato da una *sensitivity* pari a $S_{\text{DET}} = 100$ nW, ed è accoppiato alla fibra con una perdita $\alpha_{\text{DET}} = 3$ dB. Sono disponibili spezzoni di fibra lunghi 1 km, la giunzione tra due spezzoni causa un'attenuazione di 1.1 dB.

- Considerando un indice di rifrazione del cladding $n_2 = 1.4$, calcolare la lunghezza d'onda di *cutoff* e commentare il risultato ottenuto.
- Riprogettare n_2 per soddisfare le seguenti condizioni:
 - fibra monomodale a $\lambda_0 = 1310$ nm.
 - attenuazione per accoppiamento LED-fibra $\alpha_{\text{LF}} \leq 20$ dB.
- Considerando tutti i contributi di attenuazione determinare la massima lunghezza della fibra.

Esercizio 3:

Si consideri un fotodiodo *reach-through* APD in silicio caratterizzato da una regione di assorbimento π di estensione $W_\pi = 20$ μm e drogaggio $N_{\text{A},\pi} = 5 \cdot 10^{13}$ cm⁻³, e da una regione di valanga p di estensione $W_{\text{p,av}} = 700$ nm, e drogaggio $N_{\text{A,av}} = 2 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. Lo strato n^+ superficiale, di spessore $W_{n^+} = 300$ nm, è ricoperto da un *layer* antiriflesso realizzato in TiO_2 ($n_{\text{TiO}_2} = 2.5$). Si assuma una radiazione incidente di lunghezza d'onda $\lambda_0 = 800$ nm (coefficiente di assorbimento $\alpha = 10^3$ cm⁻¹).

- Calcolare la frazione di radiazione incidente trasmessa all'interno del fotodiodo a seguito dell'applicazione del *coating* antiriflesso.
- Calcolare la frazione di radiazione incidente assorbita nello strato π di assorbimento.
- Riportare in un grafico quotato il profilo spaziale di campo elettrico quando ai capi del diodo è applicata una tensione inversa $V_{\text{rev}} = 200$ V. (Si trascuri l'estensione del *depletion layer* nelle zone n^+ e p^+ laterali).

Domande di teoria:

- Illustrare i vantaggi di una struttura a *quantum well* nella generazione di luce coerente e non coerente.
- Illustrare il principio di funzionamento di una cella fotovoltaica e discutere l'effetto delle resistenze parassite sulla curva caratteristica I-V.

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 del vuoto	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m ⁻¹
costante dielettrica relativa del silicio	$\epsilon_r = 11.7$

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 $\lambda_0 = 543.5$ nm. The internal loss coefficient is $\alpha_s = 0.04$ m⁻¹, the total loss coefficient is $\alpha_T = 0.092$ m⁻¹, the Fabry-Perot cavity diameter is $d = 1$ mm, the *free spectral range* is $\Delta\nu_{\text{FSR}} = 500$ MHz, the output power is $P_{\text{out}} = 2$ mW. The photon concentration inside the cavity is $N_{\text{PH}} = 1.55 \cdot 10^{15}$ m⁻³.

- a) Given the working temperature $T = 150$ °C, calculate the Doppler broadened linewidth.
- b) Determine the length of the cavity.
- c) Calculate the reflectances R_1 and R_2 of the two mirrors.

Exercise 2:

An optical communication system working at $\lambda_0 = 1310$ nm uses a step-index optical fiber with a core of radius $r = 3$ μm and refractive index $n_1 = 1.45$, and has an attenuation coefficient $\alpha_F = 0.8$ dB/km. The light source is a lambertian LED emitting an optical power $P_{\text{LED}} = 1$ mW. The detector at the end of the fiber has a sensitivity $S_{\text{DET}} = 100$ nW, and the detector-fiber coupling loss is $\alpha_{\text{DET}} = 3$ dB. The fiber is available in segments of length 1 km, the junction between two segments causes a loss of 1.1 dB.

- a) Considering a cladding refractive index $n_2 = 1.4$, calculate the *cutoff* wavelength and comment the result.
- b) Redesign n_2 in order to meet the following specifications:
 - single mode fiber at $\lambda_0 = 1310$ nm.
 - LED-fiber coupling loss $\alpha_{\text{LF}} \leq 20$ dB.
- c) Considering all the attenuation contributions, find the maximum length of the fiber.

Exercise 3:

Consider a silicon *reach-through* APD with a lightly p-type doped ($N_{\text{A},\pi} = 5 \cdot 10^{13}$ cm⁻³) absorption region π of width $W_\pi = 20$ μm, and an avalanche region of width $W_{\text{p,av}} = 700$ nm and doping $N_{\text{A,av}} = 2 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. The n^+ surface layer has a width $W_{n^+} = 300$ nm, and is covered by a TiO₂ ($n_{\text{TiO}_2} = 2.5$) antireflection coating. Assume an incident radiation of wavelength $\lambda_0 = 800$ nm (absorption coefficient $\alpha = 10^3$ cm⁻¹).

- a) Considering the TiO₂ antireflection coating, calculate the percentage of incoming radiation transmitted into the diode.
- b) Calculate the percentage of incoming radiation absorbed in the π region.
- c) Plot a quantitative graph of the electric field profile when the applied reverse bias is $V_{\text{rev}} = 200$ V. (*Neglect the extension of the depletion layer inside the lateral n^+ and p^+ regions*).

Theory questions:

- a) Illustrate the advantages of a quantum well structure in coherent and non-coherent light generation.
- b) Illustrate the working principle of a solar cell and discuss the impact of parasitic resistances on the I-V characteristic curve.

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	$\epsilon_r = 11.7$