

Esercizio 1:

Si consideri un laser He-Ne ($m_{He} = 0.66 \cdot 10^{-26}$ kg e $m_{Ne} = 3.35 \cdot 10^{-26}$ kg) operante in regime stazionario alla lunghezza d'onda $\lambda_0 = 632.8$ nm. Il laser ha le seguenti caratteristiche: perdite interne $\alpha_s = 0.07$ m⁻¹, diametro della cavità Fabry-Perot $d = 1.6$ mm, riflettività degli specchi $R_1 = 95$ % e $R_2 = 99.95$ %, concentrazione di fotoni in cavità $N_{PH} = 1.3 \cdot 10^9$ cm⁻³. Si consideri la temperatura operativa $T = 110$ °C, e la riga di guadagno allargata per effetto Doppler.

- a) Progettare la lunghezza L della cavità per avere:
 - un solo modo longitudinale oscillante.
 - un guadagno di soglia g_{TH} inferiore a 0.4 m⁻¹.
- b) Calcolare la potenza d'uscita del laser.
- c) Il fascio gaussiano emesso dal laser ha il *waist* sullo specchio d'uscita ($W_0 = d/2$). Calcolare l'angolo di divergenza del fascio e la dimensione di macchia su un bersaglio posto a distanza $z = 50$ m.

Esercizio 2:

Si consideri un LED ad emissione lambertiana realizzato in AlGaInP (energy gap $E_g = 2.33$ eV), che opera a temperatura ambiente $T = 300$ K. Il dispositivo presenta le seguenti caratteristiche: tempo di vita radiativo $\tau_r = 20$ ns, tempo di vita non radiativo $\tau_{nr} = 100$ ns, corrente di operazione $I_F = 20$ mA, e potenza ottica emessa $P_0 = 8$ mW.

- a) Determinare la lunghezza d'onda centrale λ_0 e la larghezza a metà altezza $\Delta\lambda_{FWHM}$ dello spettro d'emissione.
- b) Calcolare l'efficienza di estrazione η_{EE} .
- c) Si consideri un rivelatore circolare di raggio $r = 1$ mm, posto ad un angolo $\theta = 45^\circ$ rispetto alla direzione di massima emissione del LED. Calcolare la massima distanza L per cui il numero di fotoni raccolti dal rivelatore per unità di tempo è $\phi_{ph} > 3 \cdot 10^9$ fotoni/s.

Esercizio 3:

Si consideri un fotodiodo *reach-through* APD in silicio caratterizzato da una regione di assorbimento π di estensione $W_\pi = 10$ μ m e drogaggio $N_{A,\pi} = 10^{14}$ cm⁻³, e da una regione di valanga p di estensione $W_{p,av} = 500$ nm, e drogaggio $N_{A,av} = 3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. Il coefficiente di ionizzazione degli elettroni è $\alpha_e = 5 \cdot 10^6$ m⁻¹.

- a) Calcolare la tensione inversa da applicare ai capi del fotodiodo per avere un campo elettrico massimo $F_{max} = 330$ kV/cm, e riportare in un grafico quotato il profilo spaziale del campo. (*Si trascuri l'estensione del depletion layer nelle zone n^+ e p^+ laterali*).
- b) Calcolare il guadagno di moltiplicazione M nei casi $k = \alpha_h/\alpha_e = 0$ e $k = 0.1$.
- c) Stimare il tempo di risposta del rivelatore nei casi $k = \alpha_h/\alpha_e = 0$ e $k = 0.1$.

Domande di teoria:

- a) Illustrare il fenomeno della dispersione in una fibra ottica, mostrandone l'impatto sul bit rate di un sistema di comunicazione.
- b) Illustrare il principio di funzionamento di un diodo laser ad omogiunzione, mettendo in luce i principali svantaggi rispetto a strutture a doppia eterogiunzione.

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

	Si
relative permittivity ϵ_r	11.7
saturation electric field [kV cm ⁻¹]	20
saturation velocity [cm s ⁻¹]	10 ⁷

Exercise 1:

Consider a He-Ne laser ($m_{\text{He}} = 0.66 \cdot 10^{-26}$ kg and $m_{\text{Ne}} = 3.35 \cdot 10^{-26}$ kg) operating in CW at $\lambda_0 = 632.8$ nm. The internal loss coefficient is $\alpha_s = 0.07$ m⁻¹, the Fabry-Perot cavity diameter is $d = 1.6$ mm, the mirrors' reflectances are $R_1 = 95$ % and $R_2 = 99.95$ %, the photon concentration inside the cavity is $N_{\text{PH}} = 1.3 \cdot 10^9$ cm⁻³. Consider the gaseous mixture at temperature $T = 110$ °C, and a Doppler broadened linewidth.

- a) Design the cavity length L to have:
 - only one oscillating longitudinal mode.
 - a threshold gain g_{TH} less than 0.4 m⁻¹.
- b) Calculate the output power of the laser.
- c) The *waist* of the emitted gaussian beam is located at the output mirror ($W_0 = d/2$). Calculate the divergence angle of the beam, and the spot size on a target at distance $z = 50$ m.

Exercise 2:

Consider a lambertian AlGaInP LED (energy gap $E_g = 2.33$ eV), operating at room temperature $T = 300$ K. The LED has the following characteristics: radiative recombination lifetime $\tau_r = 20$ ns, nonradiative recombination lifetime $\tau_{\text{nr}} = 100$ ns, forward current $I_F = 20$ mA, and output optical power $P_0 = 8$ mW.

- a) Determine the central wavelength λ_0 corresponding to peak emission and the spectral linewidth $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$.
- b) Calculate the extraction efficiency η_{EE} .
- c) Consider a circular photodetector of radius $r = 1$ mm, at an angle $\theta = 45^\circ$ with respect to maximum LED emission direction. Find the maximum distance L giving a number of impinging photons per unit time $\phi_{\text{ph}} > 3 \cdot 10^9$ photons/s.

Exercise 3:

Consider a silicon *reach-through* APD with a lightly p-type doped ($N_{\text{A},\pi} = 10^{14}$ cm⁻³) absorption region π of width $W_\pi = 10$ μm, and an avalanche region of width $W_{\text{p,av}} = 500$ nm and doping $N_{\text{A,av}} = 3 \cdot 10^{16}$ cm⁻³. The electron ionization coefficient is $\alpha_e = 5 \cdot 10^6$ m⁻¹.

- a) Find the applied reverse bias when the maximum electric field is $F_{\text{max}} = 330$ kV/cm, and plot a quantitative graph of the field profile. (*Neglect the extension of the depletion layer inside the lateral n^+ and p^+ regions*)
- b) Calculate the multiplication gain M when $k = \alpha_h/\alpha_e = 0$ and $k = 0.1$.
- c) Estimate the APD response time when $k = \alpha_h/\alpha_e = 0$ and $k = 0.1$.

Theory questions:

- a) Illustrate the dispersion phenomenon in optical fibers, showing the impact on the bit rate of a communication system.
- b) Illustrate the working principle of a homojunction laser diode, highlighting the drawbacks with respect to double heterostructures.

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 ϵ_r	11.7
saturation electric field [kV cm ⁻¹]	20
saturation velocity [cm s ⁻¹]	10^7