

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 $\lambda_0 = 543.5$ nm. Il laser ha le seguenti caratteristiche: perdite interne $\alpha_s = 0.04$ m⁻¹, perdite totali $\alpha_T = 0.09$ m⁻¹, diametro della cavità Fabry-Perot $d = 1$ mm, *free spectral range* $\Delta\nu_{FSR} = 500$ MHz, potenza emessa $P_{out} = 2$ mW, concentrazione di fotoni in cavità $N_{PH} = 1.6 \cdot 10^{15}$ m⁻³.

- a) Sapendo che la temperatura operativa è $T = 100$ °C, calcolare l'allargamento di riga per effetto Doppler ed indicare il numero di modi oscillanti in cavità.
- b) Determinare la lunghezza della cavità.
- c) Calcolare le riflettività degli specchi R_1 e R_2 .

Esercizio 2:

Si consideri un LED realizzato in InGaN che opera a temperatura $T = 300$ K (energy gap $E_g(300\text{ K}) = 2.85$ eV). Il dispositivo è caratterizzato da un'efficienza quantica esterna $\eta_{EQE} = 18\%$ 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 $\Delta\lambda_{FWHM}$ dello spettro d'emissione.
- b) Calcolare l'efficienza di conversione η_{PCE} e la potenza ottica emessa quando la corrente di polarizzazione è $I_F = 10$ mA.
- c) Calcolare la variazione di temperatura che causa uno spostamento di 2 nm del picco di emissione λ_0 .

Esercizio 3:

Si consideri una cella solare caratterizzata da una corrente di buio $I_0 = 1$ nA. La corrente fotogenerata è $I_{PH} = 20$ mA nel caso di radiazione incidente di intensità 1 kW/m².

- a) Disegnare il circuito equivalente di una cella solare e determinare la corrente di corto circuito I_{sc} e la tensione di circuito aperto V_{oc} .
- b) Calcolare I_{sc} e V_{oc} nel caso di intensità incidente $I_2 = 500$ W/m².
- c) Ricavare il punto di lavoro ottimo (V_m, I_m) e calcolare il fill factor FF. (*Suggerimento: si ponga $\frac{dP}{dV} = 0$ e si proceda per via iterativa*).

Domande di teoria:

- a) Si descriva il concetto di apertura numerica di una fibra e come questa sia limitata dal requisito di propagazione monomodale. Si descriva come è possibile superare questa limitazione nelle fibre graded index, illustrandone la struttura ed il concetto di funzionamento.
- b) Si descriva la struttura ed il funzionamento di un dispositivo APD, illustrandone i vantaggi e svantaggi rispetto ai fotodiodi pn e pin.

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

Si

costante dielettrica relativa ϵ_r	11.7
velocità di saturazione v_{sat} [cm s ⁻¹]	10^7
concentrazione intrinseca n_i [cm ⁻³]	1.45×10^{10}
gap di energia E_G [eV]	1.12
densità di stati effettiva in banda di conduzione N_c [cm ⁻³]	2.8×10^{19}
densità di stati effettiva in banda di valenza N_v [cm ⁻³]	1.04×10^{19}

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 $\alpha_T = 0.09$ 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 $N_{\text{PH}} = 1.6 \cdot 10^{15}$ m⁻³.

- a) Given the working temperature $T = 100$ °C, calculate the Doppler broadened linewidth.
- b) Determine the length of the cavity.
- c) Calculate the reflectance R_1 and R_2 of the two mirrors.

Exercise 2:

Consider an InGaN LED operating at temperature $T = 300$ K (energy gap $E_g(300 \text{ K}) = 2.85$ eV). The external quantum efficiency is $\eta_{\text{EQE}} = 18\%$ 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 $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$.
- b) Calculate the conversion efficiency η_{PCE} , and the emitted optical power when the bias current is $I_F = 10$ mA.
- c) Calculate the temperature variation resulting in a λ_0 variation of 2 nm.

Exercise 3:

Consider a solar cell with a dark current $I_0 = 1$ nA. The photogenerated current is $I_{\text{PH}} = 20$ mA in the case of incident radiation of intensity 1 kW/m².

- a) Draw the equivalent circuit of a solar cell and determine the short circuit current I_{sc} and the open circuit voltage V_{oc} .
- b) Calculate I_{sc} and V_{oc} for a radiation of intensity $I_2 = 500$ W/m².
- c) Find the optimum operating point (V_m, I_m) and calculate the fill factor FF. (*Hint: put $\frac{dP}{dV} = 0$, then use an iterative method*).

Theory questions:

- a) Describe the concept of numerical aperture of an optical fiber and its trade-off with the single-mode propagation. Describe how it is possible to overcome this limitation by graded index fibers, illustrating its structure and operating principle.
- b) Describe the structure and operation of an APD device, illustrating the advantages and disadvantages with respect to pn and 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

	Si
relative permittivity ϵ_r	11.7
saturation electric field [kV cm ⁻¹]	20
saturation velocity [cm s ⁻¹]	10^7
intrinsic concentration n_i [cm ⁻³]	1.45×10^{10}
energy gap E_G [eV]	1.12
effective density of states in the conduction band N_C [cm ⁻³]	2.8×10^{19}
effective density of states in the valence band N_V [cm ⁻³]	1.04×10^{19}