

**Esercizio 1:**

Si consideri un laser Nd:YAG realizzato mediante una barretta cristallina di lunghezza  $L = 9$  cm e indice di rifrazione  $n = 1.82$ . Le estremità della barretta sono trattate otticamente in modo tale che i due valori di riflettività  $R_1$  e  $R_2$  siano molto elevati. Le principali caratteristiche del laser sono:  $\lambda_0 = 1064$  nm,  $\Delta\nu_{1/2} = 126$  GHz,  $R_1 = 99.9\%$ , perdite interne  $\alpha_s = 0.19$  m<sup>-1</sup> e tempo di vita dei fotoni in cavità  $\tau_{ph} = 12$  ns.

- a) Calcolare l'energia  $E_{ph}$  [eV] del singolo fotone emesso dal laser.
- b) Calcolare il numero di modi oscillanti in cavità.
- c) Determinare la riflettività  $R_2$  della faccetta di uscita.

**Esercizio 2:**

Si consideri una sorgente LED di tipo lambertiano con layer attivo in  $In_{0.47}Ga_{0.53}As$  caratterizzata da una corrente di polarizzazione  $I_F = 50$  mA, tensione  $V_F = 1$  V ed efficienza quantica esterna  $\eta_{EQE} = 0.15$ .

- a) Determinare la larghezza FWHM  $\Delta\lambda_{1/2}$  dello spettro di emissione a temperatura  $T = 300$  K note le costanti di Varshni del materiale attivo  $E_{gap}(0 K) = 0.814$  eV,  $A = 4.906 \times 10^{-4}$  eV K<sup>-1</sup> e  $B = 301$  K.
- b) Calcolare l'efficienza di conversione elettro-ottica  $\eta_{PCE}$  del LED.
- c) Calcolare la potenza accoppiata in ingresso ad una fibra ottica step-index avente un core di diametro  $d = 20$   $\mu$ m tale che il numero di modi di propagazione in fibra sia  $M = 8$ .

**Esercizio 3:**

Si consideri un fotodiodo pin in Silicio caratterizzato da uno strato superficiale p<sup>+</sup> trattato antiriflesso di spessore  $W_{p+} = 1$   $\mu$ m e da una zona intrinseca di spessore  $W_i = 20$   $\mu$ m. Il rivelatore, la cui apertura a sezione circolare presenta un diametro  $d = 0.4$  mm, risulta illuminato da una radiazione di intensità  $I_{ott} = 0.1$  mW/cm<sup>2</sup>.

- a) Tracciare il profilo spaziale della potenza ottica lungo lo spessore del rivelatore valutando la potenza assorbita nella zona p<sup>+</sup> e nella zona intrinseca quando il coefficiente di assorbimento del materiale assume come valori  $\alpha_1 = 0.1$   $\mu$ m<sup>-1</sup> ( $\lambda_1 = 800$  nm) e  $\alpha_2 = 1$   $\mu$ m<sup>-1</sup> ( $\lambda_2 = 550$  nm).
- b) Assumendo  $\lambda = \lambda_2$ , valutare lo spessore  $W_{p+}$  tale per cui la potenza assorbita nella zona intrinseca risulti uguale a quella calcolata al punto precedente per  $\lambda = \lambda_1$ .
- c) Calcolare lo spessore  $W_i$  tale da determinare una corrente  $I_{ph} = 60$  nA assumendo  $\lambda = \lambda_1$  e  $W_{p+} = 1$   $\mu$ m.

**Domande di teoria:**

- a) Si descriva il principio di funzionamento di un diodo laser, spiegando i vantaggi dell'eterogiunzione e quelli della struttura a buca quantica multipla.
- b) Si descriva il principio di conversione di energia solare in energia elettrica in un dispositivo fotovoltaico, spiegando come sia possibile massimizzare la potenza convertita.

**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 <sup>-1</sup>
velocità della luce	$c = 2.998 \cdot 10^8$ m s <sup>-1</sup>
costante dielettrica nel vuoto	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m <sup>-1</sup>

	<b>Si</b>
costante dielettrica relativa $\epsilon_r$	11.7
velocità di saturazione $v_{sat}$ [cm s <sup>-1</sup> ]	$10^7$
concentrazione intrinseca $n_i$ [cm <sup>-3</sup> ]	$1.45 \times 10^{10}$
gap di energia $E_G$ [eV]	1.12
densità di stati effettiva in banda di conduzione $N_c$ [cm <sup>-3</sup> ]	$2.8 \times 10^{19}$
densità di stati effettiva in banda di valenza $N_v$ [cm <sup>-3</sup> ]	$1.04 \times 10^{19}$

**Exercise 1:**

Consider a Nd:YAG laser realized by a crystal rod of length  $L = 9$  cm and refractive index  $n = 1.82$ . The crystal rod has coated ends to achieve very high reflectance  $R_1$  and  $R_2$ . The laser has the following properties:  $\lambda_0 = 1064$  nm,  $\Delta\nu_{1/2} = 126$  GHz,  $R_1 = 99.9\%$ , internal loss coefficient  $\alpha_s = 0.19$  m<sup>-1</sup> and photon cavity lifetime  $\tau_{ph} = 12$  ns.

- a) Calculate the photon energy  $E_{ph}$  [eV].
- b) Calculate the number of modes oscillating inside laser cavity.
- c) Determine the emission end reflectance  $R_2$ .

**Exercise 2:**

Consider an  $In_{0.47}Ga_{0.53}As$  LED light source biased at  $I_F = 50$  mA and  $V_F = 1$  V with Lambertian emission and external quantum efficiency  $\eta_{EQE} = 0.15$ .

- a) Calculate the spectral FWHM linewidth  $\Delta\lambda_{1/2}$  of the light source at  $T = 300$  K knowing that the Varshni constants for  $In_{0.47}Ga_{0.53}As$  are  $E_{gap}(0\text{ K}) = 0.814$  eV,  $A = 4.906 \times 10^{-4}$  eV K<sup>-1</sup> and  $B = 301$  K.
- b) Calculate the LED power conversion efficiency  $\eta_{PCE}$ .
- c) Calculate the optical power coupled to a step-index fiber with a core of diameter  $d = 20$   $\mu\text{m}$  such that 8 modes propagate in the fiber.

**Exercise 3:**

Consider a Si-pin photodiode with an antireflection coated-p<sup>+</sup> layer of thickness  $W_{p^+} = 1$   $\mu\text{m}$  and an intrinsic layer of thickness  $W_i = 20$   $\mu\text{m}$ . Such detector, which has a circular aperture of diameter  $d = 0.4$  mm, is illuminated by a light of optical intensity  $I_{opt} = 0.1$  mW/cm<sup>2</sup>.

- a) Draw the evolution of the optical power in the photodiode and calculate the absorbed power in the p<sup>+</sup> and intrinsic (i) layer, respectively, in case of absorption coefficient equal to  $\alpha_1 = 0.1$   $\mu\text{m}^{-1}$  ( $\lambda_1 = 800$  nm) and  $\alpha_2 = 1$   $\mu\text{m}^{-1}$  ( $\lambda_2 = 550$  nm).
- b) Calculate the p<sup>+</sup>-layer thickness  $W_{p^+}$  such that the absorbed power in the i-layer for  $\lambda = \lambda_2$  is equal to the one previously calculated for  $\lambda = \lambda_1$ .
- c) Calculate the i-layer thickness  $W_i$  to have a photogenerated current  $I_{ph} = 60$  nA assuming  $\lambda = \lambda_1$  and  $W_{p^+} = 1$   $\mu\text{m}$ .

**Theory questions:**

- a) Illustrate the working principle of a laser diode, explaining the advantages of the heterojunction and of the multi-quantum well structure.
- b) Illustrate the principle of conversion from solar energy to electrical energy in a photovoltaic device, explaining how to maximize the converted power.

**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 <sup>-1</sup>
speed of light	$c = 2.998 \cdot 10^8$ m s <sup>-1</sup>
vacuum permittivity	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m <sup>-1</sup>
<b>Si</b>	
relative permittivity $\epsilon_r$	11.7
saturation electric field [kV cm <sup>-1</sup> ]	20
saturation velocity [cm s <sup>-1</sup> ]	$10^7$
intrinsic concentration $n_i$ [cm <sup>-3</sup> ]	$1.45 \times 10^{10}$
energy gap $E_G$ [eV]	1.12
effective density of states in the conduction band $N_C$ [cm <sup>-3</sup> ]	$2.8 \times 10^{19}$
effective density of states in the valence band $N_V$ [cm <sup>-3</sup> ]	$1.04 \times 10^{19}$