

**Esercizio 1:**

Si consideri un laser a gas He-Ne ( $m_{He} = 0.66 \times 10^{-26}$  Kg,  $m_{Ne} = 3.35 \times 10^{-26}$  Kg) che opera alla lunghezza d'onda caratteristica  $\lambda_0 = 632.8$  nm. Il laser è realizzato mediante un tubo in vetro delimitato da due specchi di riflettività  $R_1 = 1$  e  $R_2 = 0.97$  ed è caratterizzato da allargamento di riga Doppler  $\Delta\nu_{1/2} = 1.65$  GHz, numero di modi di emissione  $M = 5$  e tempo di vita dei fotoni in cavità  $\tau_{ph} = 40$  ns.

- Determinare la temperatura di funzionamento del laser.
- Calcolare la lunghezza  $L$  del tubo.
- Stimare le perdite interne della cavità.

**Esercizio 2:**

Un LED in AlGaAs opera a temperatura ambiente con picco di emissione a  $\lambda_0 = 800$  nm. Il LED presenta le seguenti caratteristiche:

- Potenza di uscita  $P_0 = 8$  mW quando opera a  $I_F = 17$  mA
  - efficienza di conversione elettro-ottica  $\eta_{PCE} = 5$  %.
- Determinare l'energy-gap del layer attivo in AlGaAs.
  - Determinare la larghezza FWHM  $\Delta\lambda_{1/2}$  dello spettro di emissione.
  - Calcolare l'efficienza quantica esterna  $\eta_{EQE}$  del LED e la tensione diretta  $V_F$  applicata ai capi del dispositivo.

**Esercizio 3:**

Si consideri un rivelatore APD in silicio la cui struttura prevede uno strato superficiale trattato antiriflesso di tipo  $n^+$  di spessore  $W_{n^+} = 2$   $\mu$ m, una regione di valanga drogata p ( $N_{A,av} = 10^{16}$   $cm^{-3}$ ) di spessore  $W_{p,av} = 1$   $\mu$ m, una zona quasi intrinseca  $\pi$  ( $N_{A,\pi} = 10^{14}$   $cm^{-3}$ ) di spessore  $W_{\pi} = 20$   $\mu$ m e un substrato  $p^+$ . Il fotodiodo, su cui incide un segnale ottico, è caratterizzato inoltre da un guadagno di moltiplicazione  $M=100$  e da un rapporto tra i coefficienti di ionizzazione di lacune ed elettroni  $k = 0.1$ .

- Determinare la polarizzazione inversa applicata ai capi del rivelatore sapendo che il campo elettrico all'interfaccia tra la zona di valanga e quella quasi intrinseca  $E_{\pi} = 60$  kV/cm.
- Calcolare la frazione di potenza ottica incidente sul dispositivo assorbita rispettivamente nella zona p di valanga e nella zona  $\pi$  assumendo un coefficiente di assorbimento  $\alpha = 0.1$   $\mu$ m $^{-1}$ .
- Fornire una stima del tempo di risposta del fotodiodo a valanga specificando il significato di ciascun contributo.

**Domande di teoria:**

- Illustrare l'amplificatore in fibra drogata Erblio (Erbium-doped fiber amplifier, EDFA), dal meccanismo fisico base all'implementazione hardware.
- Illustrare la struttura ed il funzionamento del LED a quantum well, spiegando i principali vantaggi rispetto al LED ad 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 nel vuoto	$\epsilon_0 = 8.85419 \cdot 10^{-12}$ F m $^{-1}$

	<b>Si</b>
costante dielettrica relativa $\epsilon_r$	11.7
concentrazione intrinseca $n_i$ [ $cm^{-3}$ ]	$1.45 \times 10^{10}$
gap di energia $E_G$ [eV]	1.12
campo di saturazione [ $kV$ $cm^{-1}$ ]	20
velocità di saturazione [ $cm$ s $^{-1}$ ]	$10^7$
densità di stati effettiva in banda di conduzione $N_c$ [ $cm^{-3}$ ]	$2.8 \times 10^{19}$
densità di stati effettiva in banda di valenza $N_v$ [ $cm^{-3}$ ]	$1.04 \times 10^{19}$

Consider a He-Ne gas laser ( $m_{\text{He}} = 0.66 \times 10^{-26}$  Kg,  $m_{\text{Ne}} = 3.35 \times 10^{-26}$  Kg) operating at wavelength  $\lambda_0 = 632.8$  nm. It consists of a narrow glass tube with two end mirrors of reflectivity  $R_1 = 1$  and  $R_2 = 0.97$ , respectively, and is characterized by Doppler broadened linewidth  $\Delta\nu_{1/2} = 1.65$  GHz,  $M = 5$  modes and photon cavity lifetime  $\tau_{\text{ph}} = 40$  ns.

- Determine the operating temperature of the laser.
- Calculate the laser tube length.
- Evaluate the internal loss coefficient of the cavity.

**Exercise 2:**

Consider an AlGaAs LED operating at room temperature with emission wavelength  $\lambda_0 = 800$  nm. The LED has the following characteristics:

- Output power  $P_0 = 8$  mW when is biased with a forward current  $I_F = 17$  mA,
  - Conversion efficiency  $\eta_{\text{PCE}} = 5$  %.
- Calculate the energy-gap of the active material.
  - Determine the spectral linewidth FWHM  $\Delta\lambda_{1/2}$ .
  - Calculate the external quantum efficiency  $\eta_{\text{EQE}}$  and the direct voltage  $V_F$  applied across the device.

**Exercise 3:**

Consider a silicon APD structure with a AR coated  $n^+$ -doped surface layer of thickness  $W_{n^+} = 2$   $\mu\text{m}$ , a p-doped ( $N_{A,p} = 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ ) avalanche layer of thickness  $W_{p,av} = 1$   $\mu\text{m}$ , a light-doped ( $N_{A,\pi} = 10^{14}$   $\text{cm}^{-3}$ )  $\pi$ -layer of thickness  $W_{\pi} = 20$   $\mu\text{m}$  and a  $p^+$  substrate. In addition, the detector, on which an optical signal impinges, has multiplication gain  $M = 100$  and hole/electron ionization coefficient ratio  $k = 0.1$ .

- Determine the reverse bias applied to the detector knowing that the electric field at the interface between the avalanche and  $\pi$  layer  $E_{\pi} = 60$  kV/cm.
- Calculate the percentage of incident optical power absorbed in the avalanche and  $\pi$  layer respectively assuming an absorption coefficient  $\alpha = 0.1$   $\mu\text{m}^{-1}$ .
- Give an estimate of the APD response time specifying each term.

**Theory questions:**

- Illustrate the Erbium-doped fiber amplifier (EDFA), from the fundamental physical mechanism to the hardware implementation.
- Illustrate the quantum-well LED structure and operation, explaining the main advantages with respect to the heterojunction LED.

**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