

# Formulario di Optoelettronica


Lorenzo Rossi - [lorenzo14.rossi@mail.polimi.it](mailto:lorenzo14.rossi@mail.polimi.it)

AA 2020/2021

Email: [lorenzo14.rossi@mail.polimi.it](mailto:lorenzo14.rossi@mail.polimi.it)

GitHub: <https://github.com/lorossi>

Quest'opera è distribuita con Licenza Creative Commons Attribuzione

Non commerciale 4.0 Internazionale 

Versione aggiornata al 26/06/2021

# Indice

<b>1</b>	<b>Riguardo al formulario</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Richiami di base</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Onde elettromagnetiche e pacchetti d'onda</b>	<b>2</b>
3.1	Leggi di Snell . . . . .	2
3.2	Riflessione e trasmissione . . . . .	2
3.3	Tunnelling ottico . . . . .	2
3.4	Sfasamento . . . . .	3
3.5	Coerenza . . . . .	3
3.6	Interferenza . . . . .	3
3.7	Riflettore di Bragg . . . . .	4
3.8	Strato antiriflesso . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Cavità di Fabry-Perot</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>Guida d'onda</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Fibra ottica</b>	<b>7</b>
6.1	Fibra step index . . . . .	7
6.2	Fibra GRIN . . . . .	7
<b>7</b>	<b>Laser</b>	<b>8</b>
7.1	Laser a gas . . . . .	8
7.1.1	Effetto Doppler . . . . .	8
7.2	Laser a stato solido . . . . .	8
<b>8</b>	<b>Semiconduttori</b>	<b>9</b>
<b>9</b>	<b>LED</b>	<b>9</b>
9.1	Emettitore lambertiano . . . . .	9
9.2	Efficienza . . . . .	9
<b>10</b>	<b>Fotodiodi</b>	<b>10</b>
10.1	Fotodiodo a valanga - APD . . . . .	10
10.2	Diodo fotovoltaico . . . . .	10
<b>11</b>	<b>Domande di teoria dei temi di esame</b>	<b>11</b>
11.1	01/02/2021 . . . . .	11
11.2	19/02/2021 . . . . .	11
11.3	04/09/2020 . . . . .	11
11.4	20/07/2020 . . . . .	11
11.5	22/06/2020 . . . . .	11
11.6	13/02/2020 . . . . .	11
11.7	31/01/2020 . . . . .	11
11.8	29/07/2020 . . . . .	12
11.9	20/02/2019 . . . . .	12
11.10	12/09/2019 . . . . .	12

11.1128/06/2019 . . . . .	12
11.1204/02/2019 . . . . .	12
11.1323/07/2019 . . . . .	12
11.1405/09/2018 . . . . .	12
11.1529/06/2018 . . . . .	13
11.1612/02/2018 . . . . .	13
11.1727/06/2017 . . . . .	13
11.1820/07/2017 . . . . .	13
11.19 . . . . .	13

## 1 Riguardo al formulario

Quest'opera è distribuita con Licenza Creative Commons - Attribuzione Non commerciale 4.0 Internazionale 

Questo formulario verrà espanso (ed, eventualmente, corretto) periodicamente fino a fine corso (o finché non verrà ritenuto completo).

Link repository di GitHub: <https://github.com/lorossi/formulario-optoelettronica>

L'ultima versione può essere scaricata direttamente cliccando [su questo link](#).

In questo formulario ho cercato prima di tutto di mettere le formule importanti per la risoluzione degli esercizi, preferendole a quelle utili alla comprensione della materia.

## 2 Richiami di base

- Angolo solido:
  - Assume valori nell'intervallo  $[0, 4\pi]$
  - Elemento infinitesimo  $d\Omega = 2\pi \sin(\theta)d\theta$
  - Integrale  $\Omega = \int_0^{2\pi} = 2\pi [1 - \cos(\theta)]$
  - Unità di misura *steradiane*, (*sr*)
- Spettro di luce visibile:

Colore	Lunghezza d'onda [nm]	Frequenza Thz
Viola	380 - 450	670 - 790
Blu	450 - 485	620 - 670
Ciano	485 - 500	600 - 620
Verde	500 - 565	530 - 600
Giallo	565 - 590	510 - 530
Arancione	590 - 625	480 - 510
Rosso	625 - 700	400 - 480

### 3 Onde elettromagnetiche e pacchetti d'onda

- Velocità di gruppo  $v = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{c}{N_g}$
- Velocità di fase  $v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n}$
- Indice di gruppo  $N_g = n - \lambda_0 \frac{\partial n}{\partial \lambda_0}$
- Variazione della lunghezza d'onda  $\Delta \lambda = \frac{c}{\nu^2} |\Delta \nu|$

#### 3.1 Leggi di Snell

- Angoli (rispetto alla normale della superficie):
  - Fascio incidente  $\theta_i$
  - Fascio riflesso  $\theta_r$
  - Fascio trasmesso  $\theta_t$
- Prima legge  $\theta_i = \theta_r$
- Seconda legge  $n_1 \sin(\theta_i) = n_2 \sin(\theta_t)$
- Total internal reflection  $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

#### 3.2 Riflessione e trasmissione

- Coefficiente di riflessione  $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$
- Coefficiente di trasmissione  $T = \left(\frac{2n_2}{n_2 + n_1}\right)^2$

#### 3.3 Tunnelling ottico

- Campo evanescente  $\vec{E} \propto e^{-\alpha z} e^{i\omega t}$
- Coefficiente di attenuazione  $\alpha = \frac{2\pi n}{\lambda} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2(\theta_i) - 1}$
- Penetrazione  $\delta = \frac{1}{\alpha}$

### 3.4 Sfasamento

- Dovuto alla riflessione interna  $\phi = 0$
- Dovuto alla riflessione esterna  $\phi = \pi$
- Dovuto all'attraversamento di un mezzo  $\Delta\phi = \frac{2\pi n}{\lambda_0} l$
- Della componente riflessa all'interfaccia:
  - Coefficiente perpendicolare  $r_{\perp} = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2(\theta_i)}}$
  - Sfasamento perpendicolare  $\Phi_{\perp} = 2 \arctan \left[ \frac{\sqrt{\sin^2(\theta_i) - (n_2/n_1)^2}}{\cos(\theta_i)} \right]$
  - Relazione degli sfasamenti  $\tan \left( \frac{1}{2}\Phi_{\perp} + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{1}{n^2} \tan \left( \frac{1}{2}\Phi_{\perp} \right)$

### 3.5 Coerenza

- Spaziale  $l_c = c \cdot \Delta\nu$
- Temporale  $t_c = 1/\Delta\nu$

### 3.6 Interferenza

- Campo totale  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$
- Modulo quadro  $|\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + 2\vec{E}_1 \times \vec{E}_2$
- Intensità  $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\delta)$  con  $\delta = k(r_2 - r_1) + \phi_2 - \phi_1$
- Interferenza costruttiva  $\delta = 2m\pi$ ,  $I = 4I_1 = 4I_2$  *in fase*
- Interferenza distruttiva  $\delta = 2(m+1)\pi$ ,  $I = 0$  *in quadratura*
- Interferometro di Young:
  - Picchi di interferenza costruttiva  $y = \frac{L}{S} \lambda m$
  - Intensità dei picchi  $I = I_0 \left[ 1 + \cos \left( k \frac{S}{L} y \right) \right]$
  - Figure di interferenza:
    - \* Massimi  $k = \frac{S}{L} y = 2m\pi$
    - \* Minimi  $k = \frac{S}{L} y = 2(m+1)\pi$

### 3.7 Riflettore di Bragg

- Spessore  $d = \frac{\lambda_0}{n \cdot 2} = \frac{\lambda}{2}$
- Riflettanza di un riflettore a N strati  $R = \left( \frac{n_1^{2N} - n_0/n_3 n_2^{2N}}{n_1^{2N} + n_0/n_3 n_2^{2N}} \right)^2$
- Larghezza a metà altezza dello spettro  $\Delta\lambda_{1/2} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{4}{\pi} \arcsin \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)$

### 3.8 Strato antiriflesso

- Spessore  $d = \frac{\lambda_0}{n \cdot 4} = \frac{\lambda}{4}$
- Indice di rifrazione  $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$
- Riflettività  $\left( \frac{n_0 n_1 - n_2}{n_0 n_1 + n_2} \right)^2$

## 4 Cavità di Fabry-Perot

- Frequenze ammesse  $\nu = m \frac{c}{2L}$ ,  $m$  numero intero positivo, indice del modo
- Lunghezza della cavità  $L = m \frac{\lambda}{2}$
- Free spectral range  $\Delta\nu_{\text{FSR}} = \nu_m - \nu_{m-1} = \frac{c}{2L}$
- Campo elettrico totale  $\vec{E} = \frac{A_0}{1 - R \cdot e^{j2kl}}$
- Intensità totale  $I = |E|^2 = \frac{A_0^2}{(1 - R)^2 + 4R \sin(kL)^2}$
- Massima ampiezza  $I_{\text{max}} = \frac{I_0}{(1 - R)^2}$
- Finezza spettrale  $F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R}$
- Larghezza a metà altezza dello spettro della frequenza  $\Delta\nu_{1/2} = \frac{\frac{C}{2L}}{\frac{\pi\sqrt{R}}{1 - r}}$
- Larghezza a metà altezza dello spettro dell'intensità  $\Delta I_{1/2} = \sin(kL) = \frac{1 - R}{2\sqrt{R}}$
- Fattore qualità  $Q = \frac{\nu_m}{\Delta\nu} = mF$



## 5 Guida d'onda

- Angolo caratteristico del modo  $\theta_m = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$
- Condizione di guida d'onda  $\frac{2\pi n_1(2a)}{\lambda} \cos(\theta_m) - \Phi_m = m\pi$
- Componenti del modo
  - Componente viaggiante  $\beta_m = k_1 \sin(\theta_m)$
  - Componente stazionaria  $\kappa_m = k_1 \cos(\theta_m)$
- Numero di modi
  - V-number  $V = \frac{2\pi a n_1}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$
  - Numero di modi  $m < \frac{2V - \Phi_m}{\pi}$
  - Numero totale di modi  $\text{int}\left(\frac{2V}{\pi}\right) + 1$
  - Propagazione  $V < \frac{\pi}{2}$
  - Lunghezza di cut-off  $\lambda_c = 4a\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$
- Dispersione
  - Intermodale  $\frac{\Delta\tau}{L} \approx \frac{n_1 - n_2}{c}$
  - Di materiale  $\frac{\Delta\tau}{L} \approx D_m \Delta\lambda$ , con  $D_m = \left| -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \right|$
  - Intramodale  $\Delta\omega = \frac{2\pi}{\Delta\tau}$

## 6 Fibra ottica

- Perdita per accoppiamento led-fibra  $\alpha_{LF} = \text{NA}^2$

### 6.1 Fibra step index

- Differenza di indice relativa  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$
- Numero di modi  $M \approx \frac{V^2}{2}$
- Dispersione
  - Intermodale  $\frac{\Delta\tau}{L} \approx \frac{n_1 - n_2}{c} = \frac{n_1\Delta}{c}$
  - Di materiale  $\frac{\Delta\tau}{L} \approx |D_m|\Delta\lambda$ , con  $D_m = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2}$
  - Cromatica  $\frac{\Delta\tau}{L} = |D_m + D_w|\Delta\lambda = |D_{Cr}|\Delta\lambda$
- Apertura numerica (NA)
  - $\text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$
  - Angolo di accettazione massimo  $\alpha = \arcsin\left(\frac{\text{NA}}{n_0}\right)$
  - V-Number  $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{NA}$
  - Per  $V < 2.405$  si ha fibra monomodale

### 6.2 Fibra GRIN

- $n \sin(\theta) = \text{cost}$  in tutta la sezione di fibra

## 7 Laser

- Guadagno  $g = \frac{c^2}{8\pi\nu^2 c^2 \tau_{sp} \Delta\nu} (N_2 - N_1)$
- Condizione di soglia  $g_{th} = \alpha_t = \alpha_s + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$ ,  $\alpha_s$  perdite interne
- Guadagno di soglia  $g_{th} = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)$
- Guadagno del laser (sopra soglia)  $g = \frac{c^2}{8\pi\nu^2 n^2 \tau_{sp} \Delta\nu} (N_2 - N_1)$
- Potenza di uscita  $P_{out} = \frac{N_{ph} c}{2 n} h\nu (1 - R_1) A$ ,  $A$  area della superficie del laser
  - In funzione del flusso fotonico  $P_{out} = \frac{1}{2} \Phi_{ph} A h\nu_0 (1 - R_2)$
- Tempo di spegnimento del laser  $\tau_{ph} = \frac{n}{c \cdot \alpha_t}$

### 7.1 Laser a gas

#### 7.1.1 Effetto Doppler

- Periodo apparente  $T' = T \left(1 + \frac{v_x}{c}\right)$
- Frequenza apparente  $\nu' \approx \nu \left(1 - \frac{v_x}{c}\right)$
- Allargamento Doppler  $\Delta\nu_{FWHM} = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2KT \log(2)}{mc^2}}$
- Numero di modi in cavità  $m = \frac{\nu_{FWHM}}{\nu_{FSR}}$

### 7.2 Laser a stato solido

- Equazione del diodo  $\frac{I}{qwld} = \frac{n}{\tau_r} + C \cdot n \cdot N_{ph}$
- Numero di fotoni  $N_{ph} = \frac{\tau_{ph}}{qwld} (I - I_{th})$
- Slope efficiency  $SE = \frac{hc^2 \tau_{ph}}{2n\lambda qL}$
- Potenza in uscita  $P_0 = SE \cdot (I - I_{th})$

## 8 Semiconduttori

- Legge dell'azione di massa  $n = p = n_i^2 = N_c N_v \exp \frac{E_g}{kT}$
- Corrente di deriva  $J = qF(n\mu_n + p\mu_p)$
- Corrente di diffusione  $J = qD_n \frac{\partial n}{\partial x} - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}$

## 9 LED

- Energia massima dei fotoni  $E_{\text{MAX}} = E_G + \frac{KT}{2}$
- Legge di Varshni  $E_G(T) = E_G(0) - \frac{AT^2}{B + T}$
- Brillanza  $\Phi_V = P_{\text{out}} \cdot 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(\lambda)$

### 9.1 Emittitore lambertiano

- Intensità  $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$
- Potenza emessa  $P_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_0 \cos(\theta) d\Omega = \int_0^{\pi/2} 2\pi \sin(\theta) d\theta$

### 9.2 Efficienza

- Quantica interna  $\eta_{\text{iqe}} = \frac{\text{tasso ricombinazione radiativa}}{\text{tasso ricombinazione}} = \frac{1/\tau_r}{1/\tau_r + 1/\tau_{nr}} = \frac{\Phi_{ph}}{I/q} = \frac{P_{\text{in}}/h\nu}{I/q}$
- Quantica esterna  $\eta_{\text{eqe}} = \frac{P_{\text{out}}/h\nu}{I/q}$
- Di estrazione  $\eta_{\text{ee}} = \eta_{\text{eqe}}/\eta_{\text{iqe}} \leq 1$
- Di conversione di potenza  $\eta_{\text{pce}} = \frac{P_{\text{out}}}{VI} = \eta_{\text{eqe}} \cdot \frac{h\nu}{qV}$
- Luminosa  $\eta_{\text{le}} = \frac{\Phi_v}{VI}$
- Larghezza spettro di emissione  $\Delta\nu_{1/2} = \frac{mkT}{h}$ ,  $m \approx 3$
- Larghezza spettro di emissione  $\Delta\lambda_{1/2} = \frac{mkT\lambda_0^2}{hc}$ ,  $m \approx 3$

## 10 Fotodiodi

- Efficienza quantica  $\eta = \frac{I_{\text{ph}}/q}{P_0/h\nu}$
- Responsività  $R = \frac{I_{\text{ph}}}{P_0} = \eta \frac{q}{h\nu} = \eta \frac{q\lambda}{hc}$
- Capacità di svuotamento  $C = \epsilon_{\text{Si}} \frac{A}{wd}$
- Tensione di built-in  $\Phi_{\text{bi}} = \frac{KT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$
- Lunghezza zona di svuotamento  $w = \sqrt{\frac{2 \epsilon_{\text{Si}}}{q} (V_R + \Phi_{\text{bi}}) \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$

### 10.1 Fotodiode a valanga - APD

- Coefficienti di assorbimento:
  - degli elettroni  $\alpha_e = A_e \cdot \exp \left( \frac{B_e}{F} \right)$
  - delle lacune  $\alpha_h = A_h \cdot \exp \left( \frac{B_h}{F} \right)$
  - rapporto  $k = \frac{\alpha_e}{\alpha_h}$
  - Fattore di guadagno  $M = \frac{1 - k}{e^{-(1-k)\alpha_e w} - k}$

### 10.2 Diode fotovoltaico

- Corrente  $I = -I_{\text{ph}} + I_D \left[ \exp \left( \frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$
- Fill factor  $\text{FF} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{cc}}$

## 11 Domande di teoria dei temi di esame

### 11.1 01/02/2021

1. Si illustri il bilancio tra assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata. Sulla base di questo bilancio, si ricavino le condizioni di funzionamento di un laser.
2. Si ricavi il teorema di Shockley-Ramo nei fotodiodi.

### 11.2 19/02/2021

1. Si discutano gli effetti di dispersione in una fibra ottica, distinguendo i vari contributi alla dispersione.
2. Si illustrino i meccanismi di generazione e ricombinazione nei semiconduttori, discutendo le rispettive applicazioni in optoelettronica e i requisiti in termini di band gap.

### 11.3 04/09/2020

1. Illustrare il principio di funzionamento di un laser ad eterogiunzione.
2. Illustrare le caratteristiche I/V di un fotodiode in assenza e presenza di illuminazione ( $h\nu > E_G$ ). Nel secondo caso descrivere il comportamento del fotodiode per tensione negativa, tensione nulla e corrente nulla.

### 11.4 20/07/2020

1. Si definisca il V-number per una guida d'onda e per una fibra ottica, illustrando come da esso si possa risalire al numero di modi di propagazione.
2. Si illustri il principio di funzionamento di un laser per il caso a 3 livelli e quello a 4 livelli, fornendo esempi pratici per entrambi.

### 11.5 22/06/2020

1. Illustrare i materiali semiconduttori impiegati nei LED, in particolare le considerazioni che portano alla scelta del materiale in relazione all'efficienza e al colore.
2. Illustrare il principio di funzionamento di un fotodiode e la metrica usata per valutare la sua efficienza.

### 11.6 13/02/2020

1. Descrivere la struttura ed il principio di funzionamento del laser He-Ne, illustrando le principali caratteristiche della radiazione emessa.
2. Illustrare il principio di funzionamento di un fotodiode pn mediante la dimostrazione del teorema di Ramo. *Nota: teorema Shockley-Ramo.*

### 11.7 31/01/2020

1. Discutere il problema dell'attenuazione nelle fibre ottiche, mostrando come esso limiti la massima lunghezza di una fibra in un sistema di comunicazione.
2. Illustrare i fenomeni di allargamento della riga di guadagno in una sorgente laser.

### 11.8 29/07/2020

1. Discutere il principio di funzionamento dei laser a 3 livelli e 4 livelli.
2. Descrivere la struttura ed il principio di funzionamento di un fotodiodo a valanga, mettendo in luce i vantaggi rispetto ad un fotodiodo pin.

### 11.9 20/02/2019

1. Si illustrino la struttura e il funzionamento dei LED bianchi.
2. Illustrare il principio di funzionamento di un fotodiodo pn mediante la dimostrazione del teorema di Ramo. *Nota: teorema Shockley-Ramo.*

### 11.10 12/09/2019

1. Descrivere il principio di funzionamento di una guida d'onda planare, illustrando la condizione di propagazione guidata e discutendo il numero di modi di propagazione.
2. Definire l'efficienza luminosa di un LED, discutendo la differenza rispetto ad una sorgente ad incandescenza.

### 11.11 28/06/2019

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

### 11.12 04/02/2019

1. Illustrare i meccanismi di allargamento della riga di guadagno ottico nelle sorgenti laser, riferendosi in particolare ai laser He-Ne e Nd<sup>3+</sup>:YAG.
2. Illustrare i meccanismi di generazione di luce nei semiconduttori a gap diretto e indiretto, mostrando quale delle due categorie si presta meglio come sorgente luminosa.

### 11.13 23/07/2019

1. Illustrare il principio di funzionamento di una sorgente laser, descrivendo le principali caratteristiche della radiazione emessa.
2. Discutere la scelta dei materiali nelle sorgenti LED, in particolare per quanto riguarda il colore della luce emessa.

### 11.14 05/09/2018

1. Discutere il problema dell'attenuazione in una fibra ottica, descrivendone l'impatto sulla scelta della lunghezza d'onda di lavoro in un sistema di comunicazione in fibra.
2. Illustrare il meccanismo fisico di ionizzazione per impatto, mostrando come possa essere sfruttato nella rivelazione di fotoni.

### **11.15 29/06/2018**

1. Discutere il trade-off tra dispersione ed accoppiamento di potenza in una fibra ottica step-index.
2. Descrivere la struttura e il principio di funzionamento di un diodo laser VCSEL, mettendo in luce i vantaggi rispetto ad una struttura ad emissione laterale.

### **11.16 12/02/2018**

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

### **11.17 27/06/2017**

1. Illustrare i fattori che limitano l'efficienza di conversione nelle celle solari.
2. Illustrare i meccanismi di generazione di luce nei semiconduttori a gap diretto e indiretto, mostrando quale delle due categorie si presta meglio come sorgente luminosa.

### **11.18 20/07/2017**

1. Illustrare i fattori che limitano la massima lunghezza di una fibra ottica in un sistema di comunicazione, evidenziando l'origine fisica dei vari contributi e le possibili soluzioni.
2. Descrivere le caratteristiche che distinguono un diodo LED da un diodo LASER in termini di principio di funzionamento, materiali e struttura del dispositivo.

### **11.19**

1. Descrivere il funzionamento del laser He-Ne: livelli energetici, pompaggio, meccanismo di emissione laser, e spettro d'uscita.
2. Illustrare il principio di funzionamento di un fotorivelatore a giunzione pn, evidenziando i principali limiti e spiegando come essi vengono risolti dal fotodiodo pin.