



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

“SORGENTI A SEMICONDUCTORE: CONFRONTO TRA LED E LD”

Relatore: Prof. GALTAROSSA ANDREA

Laureando: LEONARDI FILIPPO

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 17/03/2022

Indice

1 – INTRODUZIONE	5
1.1 – Cenni storici	5
1.2 – Sistema di trasmissione in fibra ottica.	6
1.2.1 – Trasmettitore ottico	7
1.2.2 – Fibra Ottica	7
1.2.3 – Ricevitore ottico.....	10
1.3 – Sorgenti a semiconduttore	10
1.3.1 – Introduzione alla fisica dei semiconduttori.....	10
1.3.2 – Materiali per sorgenti a semiconduttore.....	13
2 – LED	15
2.1 – Struttura	15
2.2 – Efficienza quantica e Potenza	16
2.3 – Risposta in frequenza	18
2.3 – Caratteristiche tipiche dei LED	20
3 – LASER	21
3.1 – Funzionamento	21
3.2 – Feedback ottico	22
3.3 – Condizioni di soglia	23
3.5 – Modulazione	25
3.6 – Effetti della temperatura	26
3.7 – Configurazioni dei dispositivi laser	27
3.7.1 – DFB laser	27
3.7.2 – DBR laser.....	28
3.7.3 – VCSEL.....	28
3.8 – Caratteristiche	29
4 - Conclusioni	30
Bibliografia	32

1 – INTRODUZIONE

1.1 – Cenni storici

Uno dei primi metodi usati fin dall'antichità per trasmettere informazioni è stato l'utilizzo di segnali luminosi.

Verso la fine del 1700, grazie a dei ripetitori, si riusciva a trasmettere dei messaggi in codice a circa 100 km di distanza. Il sistema aveva però dei notevoli limiti in quanto, utilizzando la luce, i ripetitori dovevano avere campo libero tra di loro e le condizioni atmosferiche dovevano essere ottimali.

Nel 1830 con l'invenzione del telegrafo, la luce come mezzo di trasporto di informazioni veniva messa in secondo piano sostituita dall'elettricità, che in quel periodo garantiva distanze e bit-rate maggiori. Dopo diversi anni, le scoperte con l'elettricità portavano molte soddisfazioni, una di queste era il primo collegamento transatlantico via cavo (1866).

Invenzioni come il telefono, la trasmissione su cavi coassiali, l'uso delle onde elettromagnetiche, rendevano l'elettricità il metodo di comunicazione dominante grazie ai risultati ottenuti, fermando quasi del tutto lo studio sull'utilizzo della luce.

I problemi che bloccavano lo studio erano principalmente due: riuscire a trasportare la luce in modo semplice, senza troppe perdite e avere una sorgente ottica efficiente e affidabile.

Una importante svolta che risolse uno dei due problemi è stata l'invenzione del laser nel 1960, che nel giro di pochi anni, ha permesso di realizzare sorgenti a semiconduttore operanti a temperatura ambiente. Svolta che portò a nuove ricerche e nuove idee per sviluppare un nuovo sistema per sfruttare il laser nelle comunicazioni ottiche.

Le idee erano molte, come quella di confinare la luce usando delle particolari lenti ma nel 1966, l'intuizione che prese piede prevedeva l'utilizzo di una fibra ottica per trasportare questo segnale luminoso. Le problematiche però non mancavano; infatti, le fibre realizzate, a causa delle impurità presenti nel materiale, producevano una perdita dell'ordine di 1000 dB/km rendendole quindi inutilizzabili.

Si è dovuto aspettare qualche anno e nel 1970 si riuscì ad abbassare le perdite a circa 20 dB/km, raggiungendo un bit-rate di circa 50-100 Mb/s su una distanza di 10 km, rendendo la fibra uno strumento innovativo in grado di rivoluzionare il mondo delle comunicazioni.

Un modo per quantificare la prestazione di un sistema di comunicazione è il prodotto Bit-Rate*Distanza (BL).

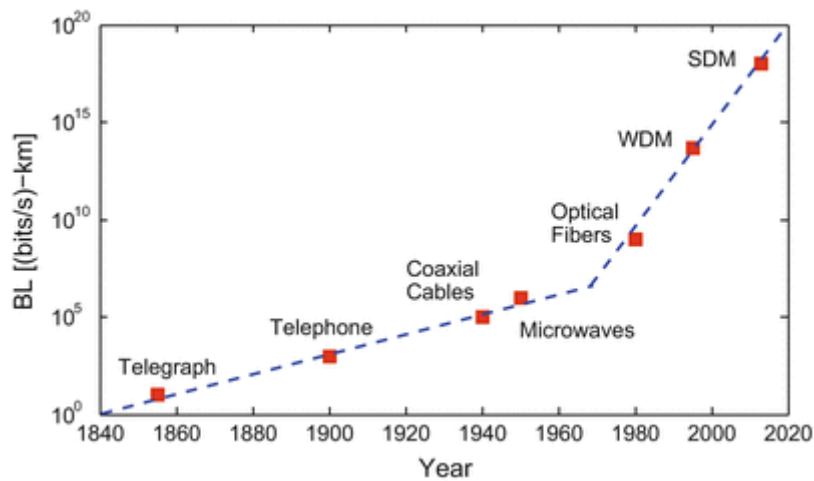


Figura 1.1 Incremento del rapporto BL dal 1850 al 2015. [4]

Dalla fig 1.1 si può notare il notevole cambio di pendenza della curva, ottenuto grazie al passaggio dai cavi in rame ai cavi in fibra ottica; si noti che la scala verticale BL è logaritmica.

Il progresso per le fibre ottiche è stato rapido, incrementando in pochi anni la capacità di trasmissione di parecchi ordini di grandezza.

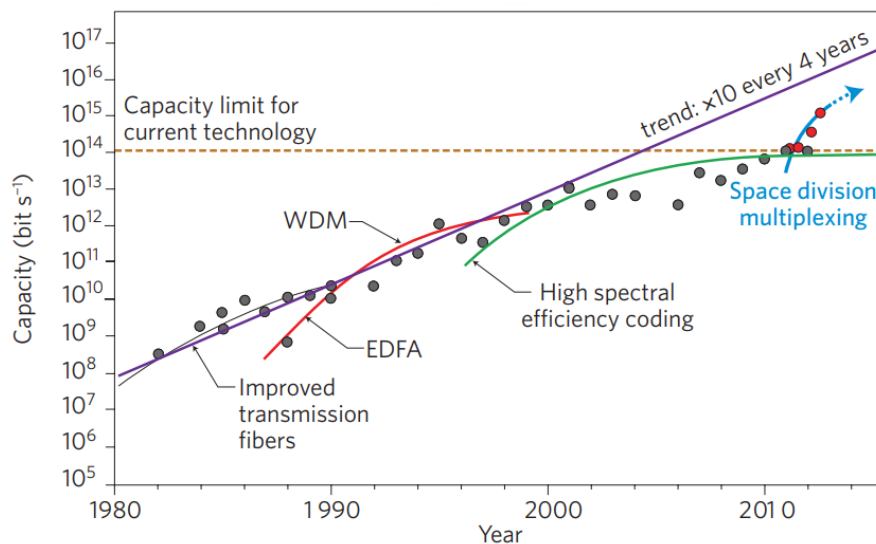


Figura 1.2 Andamento della capacità di trasmissione in termini di bit-rate per sistemi in fibra ottica.

[3]

In 30 anni, come si può osservare nella fig 1.2, sono state sviluppate 5 generazioni di fibre ottiche, partendo da un Bit rate di 100 Mb/s su piccole distanze arrivando a realizzare connessioni lunghe migliaia di chilometri con un Bit rate maggiori di 10 Tbit/s per ogni lunghezza d'onda.

1.2 – Sistema di trasmissione in fibra ottica.

Possiamo dividere un generico sistema di trasmissione in fibra ottica in tre parti: il trasmettitore ottico, la fibra ottica e il ricevitore ottico come nella figura qui sotto.



Figura 1.3 Diagramma a blocchi di un sistema a comunicazione ottica

1.2.1 – Trasmettitore ottico

Il trasmettitore è composto da una sorgente luminosa, un modulatore e un accoppiatore; la sorgente ottica ha il ruolo di convertire un segnale elettrico in un segnale luminoso.

Il segnale elettrico d'ingresso viene applicato al driver della sorgente luminosa la cui onda portante verrà modulata per poi essere trasmessa lungo la fibra.

Un altro importante dispositivo è l'accoppiatore, necessario per non perdere parte della potenza luminosa in trasmissione. Tipicamente è costruito con delle microlenti in grado di mettere a fuoco la luce nel piano d'ingresso della fibra ottica cercando di garantire il massimo passaggio di potenza.

Un importante parametro per descrivere una sorgente ottica è la potenza trasmessa definita come:

$$P(\text{dBm}) = 10 \log \frac{P(\text{mW})}{1\text{mW}} . \quad (1.1)$$

- 1 mW come livello di riferimento che corrisponde a 0 dBm.

Per le sorgenti a laser tipicamente si possono raggiungere valori attorno a 0 ÷ 10 dBm, mentre per i LED la potenza risulta particolarmente bassa, infatti si aggira attorno ai -40 ÷ -20 dBm.

1.2.2 – Fibra Ottica

È il canale di trasmissione del segnale ottico e deve garantire il trasporto della luce per grandi distanze senza l'utilizzo di amplificatori ottici presentando perdite minime.

Il funzionamento della fibra ottica si basa su una particolare proprietà fisica: la riflessione totale, che si può avere quando si passa da un mezzo a indice di rifrazione più alto ad uno più basso. Per comprenderne il funzionamento è utile conoscere come si propaga la luce in un mezzo.

Un raggio di luce incidente su una superficie viene in parte riflesso e in parte trasmesso. Questa proprietà fisica viene descritta dalla Legge di SNELL che, noti gli indici di rifrazione dei due materiali e l'angolo di incidenza, descrive il comportamento dell'angolo trasmesso.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \tag{1.2}$$

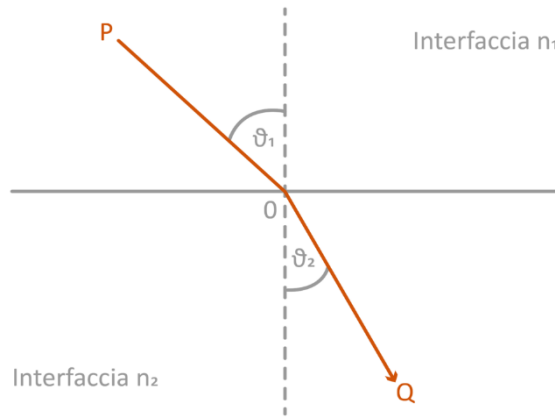


Figura 1.4 Legge di Snell e rappresentazione grafica^[5]

Per la trasmissione in fibra ottica, ci si basa su un particolare fenomeno della legge: l'angolo limite che è il massimo angolo di incidenza oltre il quale non si ha raggio trasmesso. L'angolo limite si ricava dalla legge, imponendo che l'angolo del raggio trasmesso sia 90°, come in fig. 1.5. Ottenendo così:

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right). \tag{1.3}$$

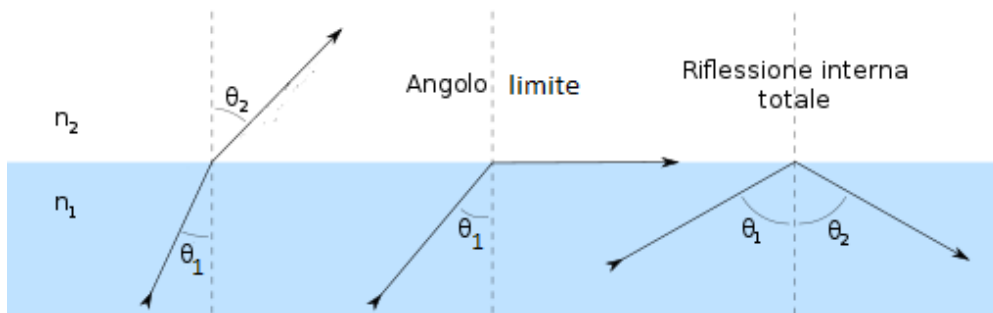


Figura 1.5 Angolo critico e riflessione totale^[6]

Assicurando un angolo d'incidenza maggiore dell'angolo limite e $n_1 > n_2$, si avrà una riflessione totale, fondamentale per la trasmissione in fibra ottica. Per garantire questo, è necessario conoscere gli indici di rifrazione e conoscere quindi la struttura della fibra.

La fibra ottica è composta da un sottile filo di materiale vetroso posto al centro chiamato nucleo e da un ulteriore strato esterno che avvolge il nucleo, chiamato mantello, con un coefficiente di rifrazione minore di quello del nucleo.

È poi composta da altri strati esterni di materiale acrilico che svolgono il compito di proteggere la fibra e irrobustirla.

Per fare in modo che ci sia riflessione totale è necessario che il raggio entri nel nucleo della fibra nel modo corretto, ossia nel cono di accettazione, detto apertura numerica (NA), come mostrato in fig. 1.6.

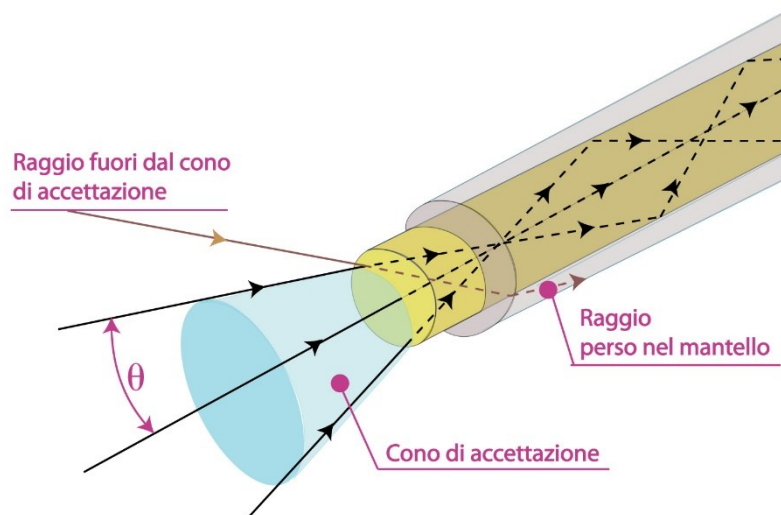


Figura 1.6 Cono di accettazione^[7]

L'apertura numerica, si ricava utilizzando nuovamente la Legge di Snell considerando che l'angolo di incidenza nell'interfaccia nucleo – mantello deve essere maggiore a quello ricavato con la formula (1.3).

Conoscendo l'angolo limite, grazie alle proprietà dei triangoli rettangoli, si può calcolare l'angolo massimo del raggio trasmesso applicando la Legge nell'interfaccia aria – fibra.

$$n \sin \theta = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) \quad (1.4)$$

- n indice di rifrazione del mezzo esterno, n_1 indice di rifrazione del nucleo e θ angolo di accettazione come in fig. 1.6.

Per ricavare l'apertura numerica si esegue qualche passaggio trigonometrico partendo dall' Eq (1.4).

$$n \sin \theta = n_1 \cos(\theta_1) \quad (1.5)$$

$$n \sin \theta = n_1 \sqrt{1 - \sin^2(\theta_1)} \quad (1.6)$$

Sostituendo θ_1 con l'Eq (1.3) si ottiene:

$$n \sin \theta = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} .$$

(1.7)

$$NA = n \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} .$$

(1.8)

Tutti i raggi al di fuori del cono di accettazione, finendo nel mantello o totalmente riflessi dalla superficie d'ingresso della fibra, andranno persi risultando inutilizzabili.

1.2.3 – Ricevitore ottico

L'esatto opposto del trasmettitore. Il ricevitore svolge il compito di convertire un segnale luminoso in un segnale elettrico ed è composto da un accoppiatore, un foto-rilevatore e un demodulatore. L'accoppiatore è necessario per mettere a fuoco il segnale nel rilevatore, il foto-rilevatore è un particolare componente in grado di captare un segnale ottico e trasformarlo in un segnale elettrico mentre il compito del demodulatore ricevere il segnale elettrico captato e trasformarlo in modo da renderlo uguale al segnale d'ingresso dalla sorgente ottica.

1.3 – Sorgenti a semiconduttore

1.3.1 – Introduzione alla fisica dei semiconduttori

Il trasmettitore ottico, come scritto in precedenza, è il primo elemento della catena di un sistema a trasmissione ottica.

Utilizza come sorgente luminosa LED (light-emitting diode) e laser a semiconduttore per i loro molteplici vantaggi: dimensioni contenute, alta efficienza, affidabilità, buona risposta in modulazione in alta frequenza, ottimo range di lunghezze d'onda e un'area di emissione luminosa compatibile con le dimensioni del nucleo della fibra.

I dispositivi a semiconduttore si distinguono dai materiali conduttori e isolanti in quanto permettono il passaggio di una piccola corrente solo in condizioni specifiche (variazioni di temperatura nel materiale).

Rappresentando un cristallo di materiale semiconduttore con un modello a bande, in equilibrio, la banda di valenza contiene tutti gli elettroni mentre la banda di conduzione rimane vuota.

Al crescere della temperatura, gli elettroni eccitandosi tendono ad acquisire un'energia sufficiente per poter rompere il legame tra atomi. L'elettrone sarà quindi in grado di spostarsi in banda di conduzione creando una lacuna in banda di valenza.

L'energia necessaria per la rottura, chiamata anche energia di banda proibita (E_g), dipende dalla tipologia di materiale semiconduttore.

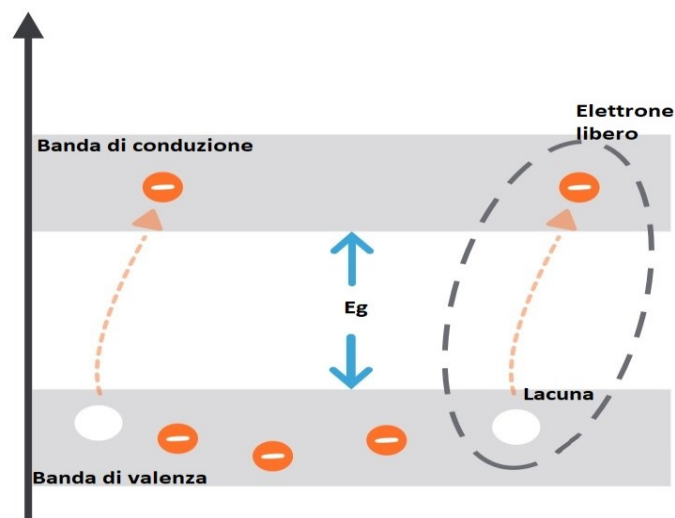


Figura 1.7 Modello a bande, passaggio dell'elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione^[8]

Il continuo spostamento di elettroni e lacune consente il passaggio di corrente sul materiale semiconduttore.

Per migliorare la conduzione, viene utilizzato un metodo chiamato drogaggio che consiste nell'aggiungere delle impurità nel materiale, ossia piccole quantità di atomi. Il drogaggio può essere di due tipi:

Tipo-N

Drogaggio che consiste nell'aggiungere materiale del gruppo V della tavola degli elementi. Questo materiale presenta 5 elettroni in banda di valenza, creando quindi 4 legami covalenti e introducendo un elettrone libero utile per rendere conduttivo il materiale.

Viene chiamato drogaggio di tipo N perché la corrente è trasportata da elettroni (cariche negative).

Tipo-P

In questa tipologia di drogaggio, il materiale apportato proviene dal gruppo III della tavola. Presenta 3 elettroni in banda di valenza, producendo 3 legami covalenti e una lacuna.

In questo caso, il flusso causato dalle lacune sarà positivo, dando così il nome al drogaggio di tipo **P**.

Un materiale semiconduttore drogato P o N serve solo come conduttore. Per costruire dispositivi con questi materiali è necessario usare entrambi i tipi.

I più utili dispositivi a semiconduttore sfruttano una tecnica di costruzione chiamata **Giunzione PN**. Viene costruita mettendo a contatto una regione drogata P ad una drogata N. Una volta creata la giunzione, si avrà una diffusione di lacune da P a N e di elettroni da N a P. Questo spostamento di cariche dà luogo ad un campo elettrico, il quale genera una differenza di potenziale chiamata **barriera di potenziale**.

Grazie alla differenza di potenziale, a ridosso della giunzione si ottiene una condizione di equilibrio, creando legami tra elettroni e lacune non permettendo di avere cariche mobili.

Questa area è chiamata **regione di carica spaziale**.

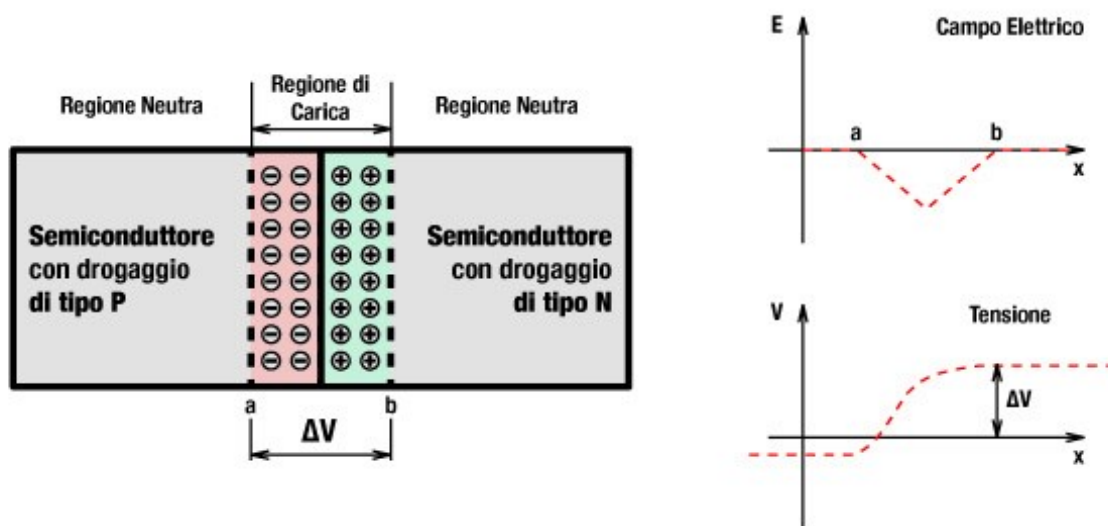


Figura 1.8 Giunzione PN, andamento del campo elettrico e della tensione lungo la giunzione^[9]

Applicando una tensione alle estremità della giunzione si possono verificare due situazioni: polarizzazione inversa e polarizzazione diretta.

Con polarizzazione inversa si intende quando la tensione applicata è positiva dalla parte drogata N e negativa in P. Questo causa un aumento della barriera di potenziale, allargando la regione di carica

spaziale e impedendo del tutto la conduzione.

Applicando invece tensione positiva in P e negativa in N si ottiene la polarizzazione diretta.

Contrariamente alla polarizzazione inversa, nella diretta la barriera di potenziale diminuisce restringendo la regione di carica spaziale, permettendo a elettroni e lacune di muoversi ricombinandosi l'un l'altro.

Le ricombinazioni possono essere di due tipi: radiative e non radiative.

È proprio grazie alle ricombinazioni radiative che la giunzione PN riesce a sprigionare spontaneamente energia sottoforma di fotoni generando una radiazione luminosa. Il principio di funzionamento è comune sia per dispositivi LED che Laser.

Le ricombinazioni non radiative sono invece controproducenti in quanto possono causare un'auto assorbimento nella regione attiva o trasferire energia ad altre cariche sottoforma di energia cinetica.

1.3.2 – Materiali per sorgenti a semiconduttore

L'emissione luminosa in una giunzione PN avviene spontaneamente se nella giunzione la banda proibita è diretta, ossia se nelle bande di conduzione e di valenza gli elettroni e le lacune si muovono con la stessa quantità di moto.

Un semiconduttore a banda proibita diretta si crea unendo elementi del terzo gruppo, come Alluminio, Gallio o Indio, ed elementi del quinto gruppo come Fosforo, Arsenico o Antimonio.

Le combinazioni di coppie che creano un materiale adatto per costruire sorgenti ottiche a semiconduttore sono GaAlAs e InGaAsP.

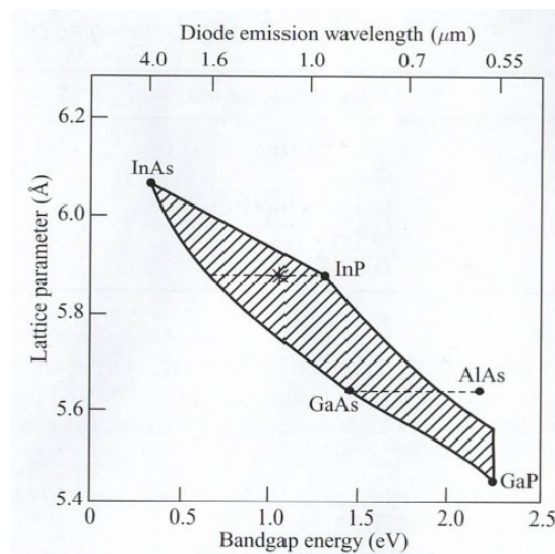


Figura 1.9 Relazione tra energia di banda proibita, distanza tra atomi misurata in Amstrong (lattice parameter) e lunghezza d'onda a temperatura ambiente^[1]

Dalla fig 1.9 la linea orizzontale GaAs - AlAs indica il composto ternario GaAlAs (Arseniuro di gallio e alluminio), composizione che emette una radiazione di lunghezza d'onda di circa 800 nm mentre l'aera evidenziata indica il composto quaternario InGaAsP (fosfuro di indio, gallio e arseniuro) in grado di emettere una radiazione con lunghezze d'onda di circa 1300/1400 nm.

Come si vede in fig. 1.9, variando le quantità degli elementi del composto è possibile perfezionare l'energia di banda proibita e di conseguenza la lunghezza d'onda di emissione.

2 – LED

Il LED è la sorgente ottica usata principalmente in sistemi di trasmissione dove non è richiesta un'elevata potenza ottica e un alto bit-rate. È la soluzione più economica in termini di resa in quanto non richiede complessi circuiti di pilotaggio e sistemi di controllo della temperatura.

2.1 – Struttura

Per essere efficiente in una trasmissione ottica, il LED deve avere una struttura che consente di concentrare tutta la potenza ottica in una superficie di emissione ricombinando elettroni e lacune in una regione ben definita nella giunzione.

Il modo più efficace per confinare la ricombinazione è l'utilizzo di una doppia eterogiunzione, tecnica di costruzione che consiste nell'applicare due strati di diverso drogaggio per ogni lato della regione di ricombinazione, come in fig. 2.1.

Metal contact	<i>n</i> -type GaAs substrate	<i>n</i> -type Ga _{1-x} Al _x As Light guiding and carrier confinement ~ 1 μm	<i>n</i> -type Ga _{1-y} Al _y As Recombination region ~ 0.3 μm	<i>p</i> -type Ga _{1-x} Al _x As Light guiding and carrier confinement ~ 1 μm	<i>p</i> -type GaAs Metal contact improvement layer ~ 1 μm	Metal contact
---------------	-------------------------------	--	---	--	--	---------------

Figura 2.1 Sezione di una eterogiunzione^[2]

Questa struttura permette al LED di avere un'alta efficienza accompagnata da una alta emissione luminosa.

Per i LED, le configurazioni usate nella trasmissione ottica sono principalmente due: l'emissione superficiale chiamata SLED (surface-emitting LED) e l'emissione laterale ELED (edge-emitting LED).

Nella configurazione SLED, il piano di emissione è realizzato creando una cavità nel substrato ed è orientato perpendicolarmente all'asse della fibra (fig 2.2). La superficie di emissione misura normalmente 50 μm di diametro e con uno spessore massimo di 2.5 μm mentre la potenza emessa cala del 50% del suo massimo a 60° dalla normale.

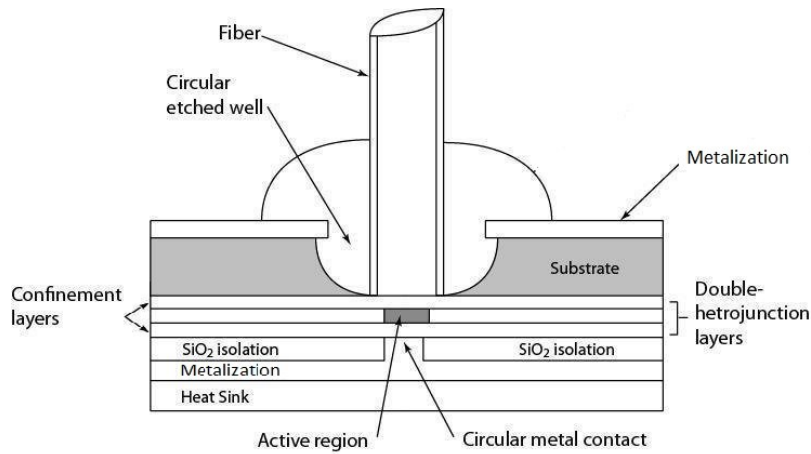


Figura 2.2 Schema di una configurazione SLED^[2]

Per la configurazione ad emissione laterale (fig. 2.3), si utilizza sempre una doppia eterogiunzione dove la regione attiva e gli strati di confinamento si estendono per tutta la lunghezza del LED. Questo tipo di configurazione crea un canale a guida d'onda rendendo la sorgente molto più direttiva rispetto al SLED, riducendo il cono di emissione nel piano perpendicolare alla giunzione a $25 \div 35^\circ$. La lunghezza della regione attiva è di circa $100 \div 150 \mu\text{m}$ con una superficie di contatto larga $50 \div 70 \mu\text{m}$.

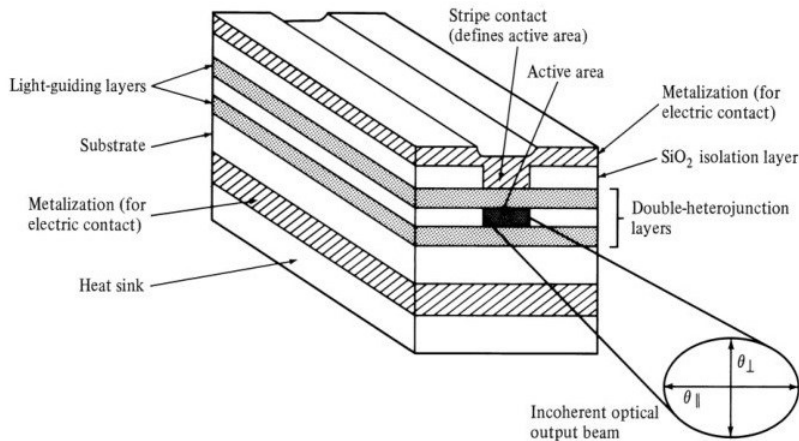


Figura 2.3 Schema di una configurazione ELED^[1]

2.2 – Efficienza quantica e Potenza

Per definire la quantità di ricombinazioni radiative nella regione attiva, si utilizza un parametro chiamato efficienza quantica interna (IQE) ed è descritta come il rapporto tra il numero di ricombinazioni radiative e il numero di ricombinazioni totali.

$$\eta_{\text{int}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\text{nr}}} \quad (2.1)$$

Chiamando N densità di carica nella regione e τ_r e τ_{nr} i tempi di ricombinazione radiativa e non radiativa rispettivamente, possiamo definire i tassi di ricombinazione come

$$R_r = \frac{N}{\tau_r}, R_{nr} = \frac{N}{\tau_{nr}}, \quad (2.2)$$

per poi riscrivere l'efficienza interna

$$\eta_{int} = \frac{1}{1 + \frac{\tau_r}{\tau_{nr}}} = \frac{\tau}{\tau_r}. \quad (2.3)$$

τ = tempo di ricombinazione totale.

Per i dispositivi LED con una struttura a doppia eterogiunzione, l'efficienza quantica interna si aggira attorno al 60 ÷ 80 %.

Considerando una corrente costante I applicata alla giunzione, con q carica dell'elettrone, il numero totale di ricombinazioni per secondo sono

$$R_r + R_{nr} = \frac{I}{q}. \quad (2.4)$$

Per calcolare la potenza ottica interna, calcoliamo il numero di fotoni generati al secondo sostituendo l'Eq. (2.4) nell'Eq. (2.1) e ricavando R_r . Sapendo che l'energia sprigionata da ogni fotone generato da una ricombinazione è $h\omega$ (dipendente dalla lunghezza d'onda) la potenza risulta:

$$P_{int} = \eta_{int} \frac{I}{q} h\omega = \eta_{int} \frac{hcI}{q\lambda}. \quad (2.5)$$

Per poter calcolare la potenza emessa dal LED, è necessario valutare quanti fotoni prodotti riescono ad uscire dal dispositivo in quanto, a causa della riflessione all'interfaccia, non tutti vengono trasmessi.

Come si può notare dalla fig. 2.4, i fotoni che escono dal dispositivo devono incidere la superficie di emissione con un angolo (ϕ_c) inferiore dell'angolo critico descritto dalla formula (1.3).

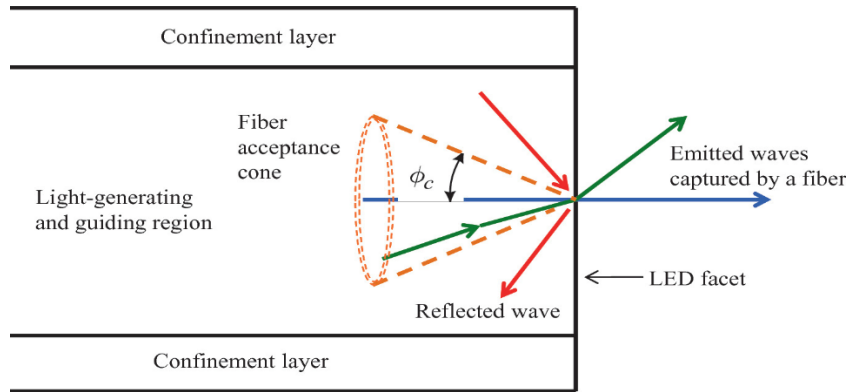


Figura 2.4 Superficie di emissione e angolo critico. [2]

Gli indici di rifrazione questa volta sono $n_1 \cong n$ indice del materiale semiconduttore e n_2 indice del materiale esterno (tipicamente aria $n_2 = 1$).

L'efficienza quantica esterna è approssimativamente data da:[1]

$$\eta_{ext} \approx \frac{1}{n(n+1)^2} \cdot \quad (2.6)$$

Da questa segue che la potenza emessa dal LED è

$$P = \eta_{ext} P_{int} \approx \frac{P_{int}}{n(n+1)^2} \cdot \quad (2.7)$$

Per un materiale semiconduttore con $n = 3.5$, l'efficienza esterna è circa 1.4%.

2.3 – Risposta in frequenza

Si usa la risposta in frequenza per indicare quanto velocemente varia la sorgente luminosa dato un impulso elettrico.

Sono diversi i fattori che influiscono sulla velocità di un dispositivo LED: le capacità parassite, le tipologie di drogaggi e il tempo di ricombinazione elettrone – lacuna.

Modulando la corrente di controllo del dispositivo ad una frequenza ω , la potenza ottica emessa varia con la legge

$$P(\omega) = P_0 [1 + (\omega\tau)^2]^{-1/2} \cdot \quad (2.8)$$

P_0 = potenza emessa con frequenza di modulazione = 0.

L' Eq. (2.8) tiene conto solo del tempo di ricombinazione totale τ (tipicamente qualche nanosecondo), trascurando il ritardo causato dalle capacità parassite.

La risposta in frequenza di modulazione, si definisce come il punto dove la potenza è metà del suo valore massimo. Elettricamente, questo punto indica la frequenza dove la potenza dell'onda modulata si riduce di 3 dB rispetto alla potenza a modulazione nulla.

Per i dispositivi LED si possono distinguere due larghezze di banda: elettrica e ottica.

Considerando che la potenza elettrica è proporzionale al quadrato della corrente, con la legge $p(\omega) = I^2(\omega)/R$, il rapporto tra potenza elettrica alla frequenza ω e la potenza elettrica senza modulazione è^[1]:

$$RATIO_{ele} = 10 \log \left[\frac{p(\omega)}{p(0)} \right] = 10 \log \left[\frac{|I(\omega)|^2}{|I(0)|^2} \right]. \quad (2.9)$$

Per ottenere la diminuzione di 3 dB, dalla definizione, $p(\omega) = p(0) / 2$ e questo si verifica quando $|I(\omega)|^2 = |I(0)|^2 / 2$ ottenendo così

$$\left| \frac{I(\omega)}{I(0)} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707. \quad (2.10)$$

Si procede in egual modo anche per la larghezza di banda ottica, scrivendo il rapporto tra potenze in decibel.

$$RATIO_{ott} = 10 \log \left[\frac{P(\omega)}{P(0)} \right] = 10 \log \left[\frac{I(\omega)}{I(0)} \right] \quad (2.11)$$

Si può notare come per la potenza ottica, essendo linearmente proporzionale alla corrente, una diminuzione di 3 dB corrisponda ad un rapporto tra le correnti $I(\omega) / I(0) = 0.5$

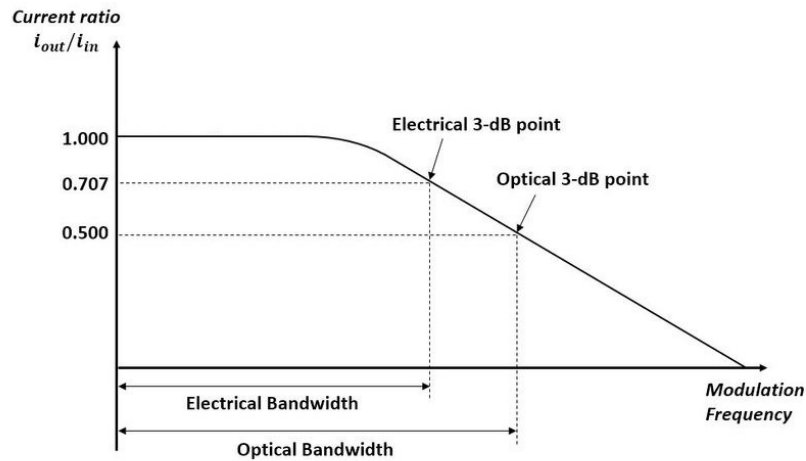


Figura 2.5 Risposta in frequenza di una sorgente LED. Differenza tra larghezza di banda ottica ed elettrica. ^[1]

Dalla fig. 2.5 si osserva come una diminuzione di 3 dB della potenza ottica corrisponda ad una diminuzione di 6 dB della potenza elettrica

2.3 – Caratteristiche tipiche dei LED

I dispositivi LED di ultima generazione riescono ad offrire potenze ottiche di qualche decina di mW con correnti di controllo che possono arrivare fino a 1A e lunghezze d'onda che spaziano dai 500 nm fino ad arrivare oltre ai 1500 nm.

Si possono raggiungere frequenze di modulazione dell'ordine delle centinaia di MHz.

3 – LASER

Il diodo laser (LD) è un dispositivo a semiconduttore in grado di generare una radiazione luminosa coerente. Trova utilizzo in tutte le applicazioni dove la potenza ottica richiesta è dell'ordine delle decine di mW, con frequenza di modulazione superiori a 200 Mhz e dimensioni del nucleo della fibra ridotte.

Il principio di emissione luminosa nei diodi laser, come dice l'acronimo stesso (Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation), sfrutta un particolare processo nella fase di generazione della luce descritto nella sezione 3.1.

3.1 – Funzionamento

Per descrivere il funzionamento di un diodo laser è necessario analizzare i tre processi fondamentali che si verificano nel dispositivo rappresentandoli con un semplice sistema a due livelli di energia, come in fig 3.1, dove E_1 rappresenta lo stato energetico base e E_2 rappresenta lo stato energetico eccitato. L'energia assorbita o emessa del fotone è $h\nu_{12} = E_2 - E_1$.

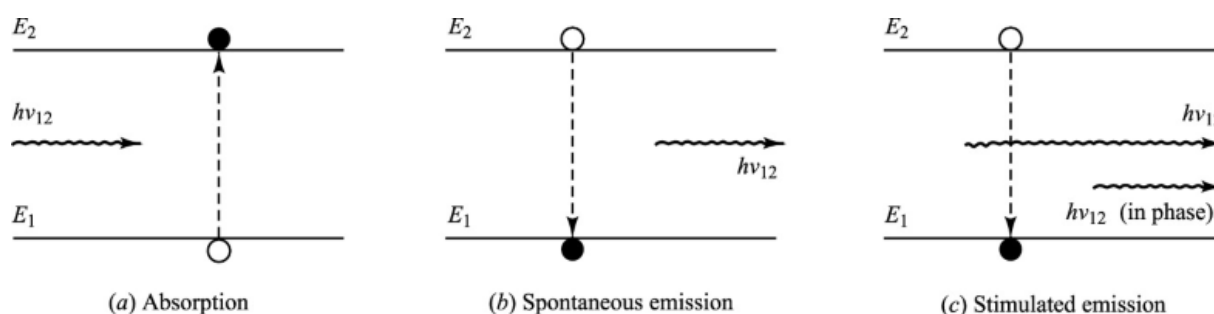


Figura 3.1 Processi fondamentali in un dispositivo laser^[1]

L'assorbimento si verifica quando un fotone colpisce il sistema e un elettrone che si trova in E_1 ne assorbe tutta l'energia eccitandosi passando al livello E_2 . Essendo uno stato instabile, l'elettrone tende a tornare al livello E_1 generando un'emissione spontanea rilasciando un fotone in una direzione casuale.

È possibile anche provocare un'emissione grazie ad uno stimolo esterno. Si verifica quando un elettrone che si trova nel livello E_2 viene colpito da un fotone. L'elettrone, tornando nel livello E_1 , rilascia un fotone in fase con il fotone incidente. Questo è il processo base utilizzato dai laser per generare luce ed è chiamato emissione stimolata.

All'equilibrio termico, la densità di elettroni nel livello E_2 è molto bassa, provocando l'assorbimento della maggior parte dei fotoni incidenti e rendendo trascurabili le emissioni luminose.

Per poter produrre luce, nei laser, i processi di emissione stimolata devono superare i processi di assorbimento. Per garantire ciò, deve verificarsi la condizione di inversione della popolazione, ossia, la densità di elettroni in E_2 deve essere ben maggiore di quella in E_1 .

Questa condizione, nei diodi laser, si realizza drogando pesantemente le regioni P ed N nella giunzione.

3.2 – Feedback ottico

Anche per i laser, la potenza ottica deve essere concentrata su una piccola regione e, come nei LED, si utilizza la configurazione a doppia eterogiunzione. La costruzione dei laser è però più complessa perché necessita di un secondo confinamento in una piccolissima cavità.

Questo ulteriore confinamento, per la maggior parte dei laser, viene costruito con una cavità risonante di Fabry – Perot (FP) o con un reticolo di Bragg (DFB).

Come si può vedere in fig. 3.2, una cavità FP consiste nell'applicare due specchi parzialmente riflettenti rivolti l'uno verso l'altro con lo scopo di generare una risonanza in direzione longitudinale trasformando il dispositivo in un oscillatore, che in una determinata frequenza di risonanza, è in grado di amplificare la potenza ottica e compensare le perdite nella cavità.

Per fare in modo che la somma delle onde sia costruttiva e che le ampiezze si sommino sulla superficie d'uscita, la lunghezza d'onda deve essere un multiplo intero della lunghezza della cavità. In questo modo tutte le altre onde di diversa lunghezza d'onda si annulleranno. La frequenza con interferenze costruttive è detta frequenza di risonanza e dipende dagli indici di rifrazione dei mezzi.

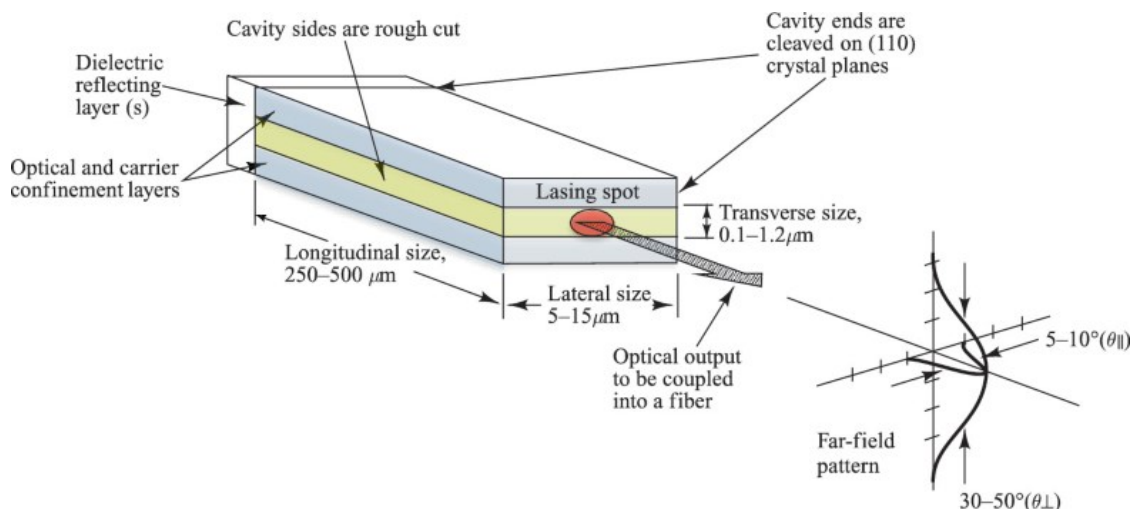


Figura 3.2 cavità risonante di Fabry – Perot per un LD [2]

Come è possibile notare in fig. 3.2, le dimensioni del diodo laser sono parecchio contenute e il cono d'uscita è molto direzionale. Nella figura è inoltre presente uno strato riflettente sulla superficie

opposta a quella di emissione con il compito di ridurre le perdite all'interno della cavità convogliando tutta la potenza ottica verso l'uscita.

3.3 – Condizioni di soglia

Le condizioni di funzionamento descrivono quando l'emissione luminosa nei diodi laser è possibile. Per determinare tali condizioni, si valuta la relazione tra l'intensità del campo ottico ($I(z)$), il coefficiente di assorbimento α_λ e l'amplificazione nella cavità FP (g).^[1]

L'intensità della radiazione varia esponenzialmente lungo la cavità seguendo la relazione:

$$I(z) = I(0)\exp\{[g - \alpha_\lambda]z\}. \quad (3.1)$$

L'amplificazione ottica è generata dal meccanismo di risonanza e avviene grazie al continuo rimbalzo della luce tra i due specchi.

L'emissione luminosa in un laser è possibile solo quando, valutando un viaggio di andata e ritorno di un raggio di luce lungo la cavità (due riflessioni), il guadagno ottico è superiore alle perdite. Si considera quindi $z = 2L$ (L = lunghezza della cavità).

Durante la propagazione nella cavità, dalle due estremità del laser viene riflessa solo una frazione della luce incidente, quantificabile come R_1 e R_2 . R è coefficiente di riflessione per la legge di Fresnel che per la componente polarizzata con il campo elettrico si può scrivere come:

$$R(\phi) = \left(\frac{n_1 \cos \phi_i - n_2 \cos \phi_t}{n_1 \cos \phi_i + n_2 \cos \phi_t} \right)^2. \quad (3.2)$$

Ipotizzando un'incidenza normale, con $\phi_i, \phi_t = 0$, l'Eq (3.2) si può semplificare come.

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (3.3)$$

- n_1 indice di rifrazione della cavità e n_2 indice della superficie riflettente.

Da queste condizioni, considerando i coefficienti di Fresnel R_1 e R_2 per due riflessioni (dalla Eq. 3.3) e la distanza percorsa $z = 2L$, si riscrive l'Eq (3.1) come:

$$I(2L) = I(0)R_1R_2\exp\{2L[g - \alpha_\lambda]\}. \quad (3.4)$$

Il dispositivo, alla condizione di soglia, si trova in uno stato di oscillazione stazionaria. L'onda di ritorno è identica all'onda originale implicando una condizione per le ampiezze.

$$I(2L) = I(0) \quad (3.5)$$

Considerata l'Eq. (3.5), si inverte l'Eq (3.4) per ricavare l'amplificazione nella condizione di soglia (g_{th}).

$$g_{th} = \alpha_\lambda + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_\lambda + \alpha_{mirr} = \alpha_t \quad (3.6)$$

Come detto in precedenza, la condizione di soglia è determinata dall'uguaglianza tra l'amplificazione ottica e le perdite totali (α_t).

Come è possibile vedere nell'Eq. (3.6), α_{mirr} rappresenta le perdite legate alle riflessioni nella cavità. Per garantire il funzionamento, nel dispositivo deve verificarsi la seguente disuguaglianza: $g \geq g_{th}$. La soglia di funzionamento si può osservare nel grafico di fig. 3.3 che mette in relazione la potenza ottica d'uscita con la corrente di driver del laser. Si nota infatti che per correnti al di sotto della soglia, l'emissione è spontanea e il comportamento ricorda quello del LED. Per correnti superiori, l'inversione di popolazione è garantita generando un'emissione stimolata.

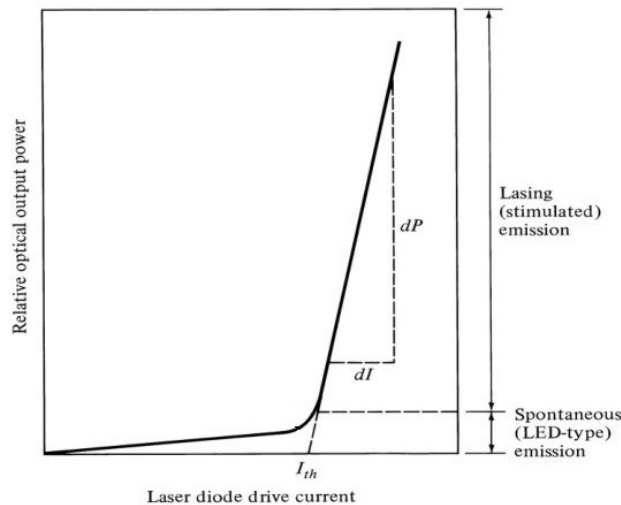


Figura 3.3 Relazione tra potenza ottica e corrente di driver^[2]

Per i laser costruiti con strutture che sopportano un forte confinamento di cariche, la densità di corrente di soglia per l'emissione stimolata J_{th} si può relazionare al guadagno con una buona approssimazione come:

$$g_{th} = B J_{th} \quad (3.7)$$

dove B è il fattore di amplificazione ed è costante e dipende dalle specifiche di costruzione del dispositivo.

3.5 – Modulazione

Per poter trasmettere informazioni tramite la luce, è necessario ricorrere alla modulazione, tecnica che consiste nel variare direttamente la corrente di controllo del dispositivo in modo da creare una corrispondenza tra il flusso ottico e quello elettrico.

La frequenza di modulazione in un dispositivo laser dipende dal tempo di ricombinazione nella giunzione per i processi di emissione spontanea e stimolata e dalla vita media dei fotoni nella cavità. Considerando una struttura FP, il tempo in cui un fotone rimane nella cavità dipende dalle perdite totali (α_t), dalla velocità della luce e dall'indice di rifrazione del materiale seguendo la relazione

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{c}{n} \alpha_t. \quad (3.8)$$

Ricordando l'Eq (3.6) dove $\alpha_t = g_{th}$ è possibile riscrivere il tempo di vita di un fotone τ_{ph} come:

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{c}{n} g_{th} = \frac{c}{n} \left(\alpha_\lambda + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right). \quad (3.9)$$

Ad ogni accensione, si verificano in uscita delle oscillazioni smorzate, chiamate oscillazioni di rilassamento e dipendono dal tempo ricombinazione per l'emissione spontanea e da τ_{ph} .

Per sistemi di trasmissione ad alta velocità, la frequenza di modulazione non può essere maggiore della frequenza delle oscillazioni di rilassamento.

Assumendo una dipendenza lineare tra il guadagno ottico e la densità di carica, la frequenza dell'oscillazione di rilassamento si può approssimare come^[2]

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{(\tau_{sp} \tau_{ph})^{1/2}} \left(\frac{I}{I_{th}} - 1 \right)^{1/2}. \quad (3.10)$$

Per esempio, assumendo i seguenti valori: $\tau_{sp} = 1\text{ns}$, $\tau_{ph} = 2\text{ps}$, $I = 2I_{th}$, il picco dell'oscillazione di rilassamento e quindi la massima frequenza di modulazione è a circa 3GHz come in fig. 3.4.

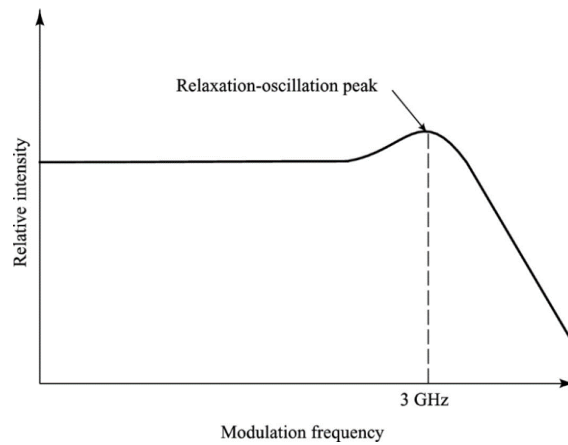


Figura 3.4 Frequenza di modulazione in un dispositivo laser^[2]

3.6 – Effetti della temperatura

Un effetto non trascurabile nei laser è la dipendenza dalla temperatura. In tutti i tipi di laser a semiconduttore, la corrente di soglia cresce al crescere della temperatura ed è possibile approssimare la variazione con l'equazione:

$$I_{th}(T) = I_z \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) .$$

(3.11)

I_z costante e T_0 temperatura alle condizioni di soglia.

Nella fig. 3.5 si osserva come la curva varia per le diverse temperature andando ad influire anche sulla potenza ottica.

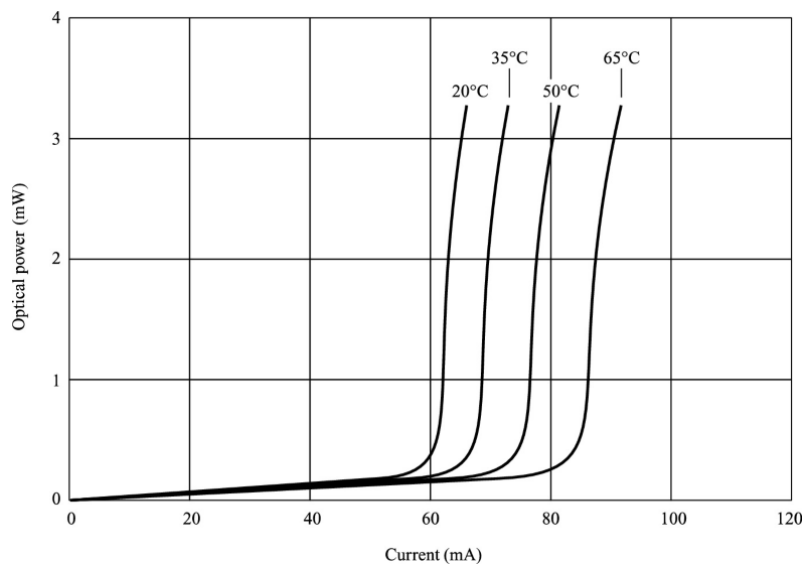


Figura 3.5 Variazione della corrente di soglia in relazione alla temperatura^[2]

Per limitare l'effetto dovuto alla temperatura esistono diverse tecniche. La più semplice consiste nell'applicare un dispositivo di raffreddamento in grado di mantenere il diodo laser ad una temperatura costante.

Un metodo più complesso richiede l'utilizzo di un sistema a retroazione. Con un fotorilevatore viene captato il fascio luminoso uscente dal laser e, comparandolo con un livello di riferimento, viene automaticamente regolata la corrente di pilotaggio per poter mantenere costante la potenza ottica.

Nella maggior parte dei dispositivi laser, per garantire la massima stabilità, le due tecniche coesistono.

3.7 – Configurazioni dei dispositivi laser

Oltre alla struttura base con cavità FP, esistono altre configurazioni che garantiscono la risonanza in diversi modi.

Le configurazioni più comuni sono: DFB (distributed feedback), DBR (distributed Bragg reflector) e VCSEL (vertical cavity surface emitting laser)

3.7.1 – DFB laser

Per questa configurazione, come dal nome, la risonanza si ottiene applicando sopra tutta la regione attiva un reticolo di Bragg come in fig. 3.6. Il reticolo è realizzato da un'alternanza periodica di materiale con indice di rifrazione diverso.

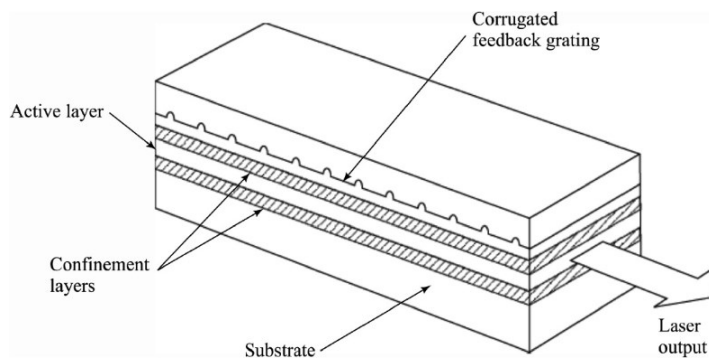


Figura 3.6 Configurazione DFB^[2]

Nella cavità, la risonanza avviene per lunghezze d'onda molto vicine a λ_B , la lunghezza d'onda del reticolo di Bragg che è legata al passo della struttura corrugata.

Grazie a questa proprietà, la configurazione DFB presenta uno spettro d'uscita per le lunghezze d'onda molto definito presentando un picco molto sottile centrato in λ_B . Questa caratteristica rende la sorgente monocromatica.

È uno dei dispositivi più usati nelle trasmissioni ottiche per la proprietà appena descritta risentendo inoltre meno dell'effetto della temperatura.

3.7.2 – DBR laser

A differenza del DFB, in questa configurazione, il reticolo di Bragg viene applicato al posto delle superfici riflettenti della configurazione a cavità FP.

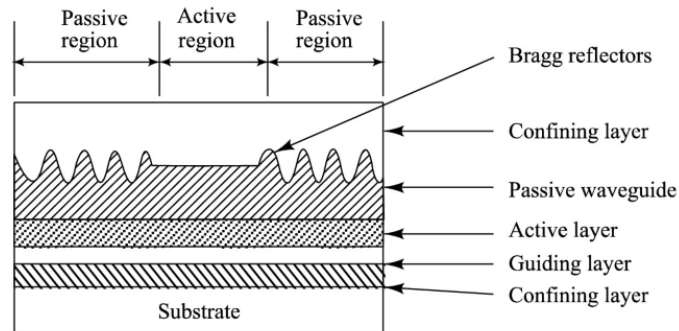


Figura 3.7 Struttura di un laser DBR^[2]

La superficie d'uscita deve essere trattata in modo da permettere l'uscita del raggio luminoso.

3.7.3 – VCSEL

A differenza di tutte le altre strutture, questa prevede la superficie di emissione in posizione verticale rispetto alla giunzione.

Di rilevante importanza è la realizzazione della cavità risonante; avviene attraverso l'utilizzo di due superfici riflettenti realizzate con materiale semiconduttore come è possibile osservare in fig. 3.8.

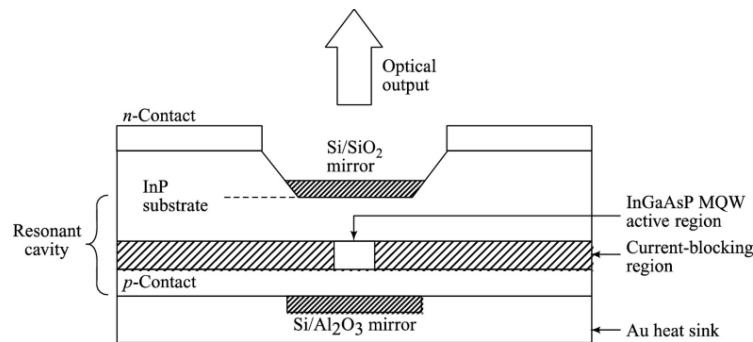


Figura 3.8 Architettura base di un laser a emissione di superficie con cavità verticale^[2]

I vantaggi di questa struttura sono due. Il primo è dato dalle dimensioni ridotte della cavità, caratteristica che riduce notevolmente i tempi di risposta permettendo frequenze di modulazione elevate.

Il secondo vantaggio sfrutta l'emissione verticale che, per particolari applicazioni, permette di realizzare più sorgenti laser in un singolo chip.

3.8 – Caratteristiche

Come per i LED, anche per i laser l'efficienza quantica esterna fornisce informazioni sul rapporto tra il numero di fotoni emessi e quelli generati. L'efficienza esterna, tipicamente, assume valori che possono variare dal 15 % fino al 40 % per dispositivi ad alta qualità. Questi dati si assumono per correnti di controllo al di sopra della condizione di soglia.

In base al materiale semiconduttore utilizzato nella costruzione, i laser sono in grado di emettere un raggio luminoso su un ampio spettro di lunghezze d'onda e la potenza ottica d'uscita nei laser è dell'ordine delle decine di mW per arrivare fino a qualche W per dispositivi ad alta potenza.

La frequenza di modulazione può raggiungere valori nell'ordine delle decine di GHz permettendo una velocità di trasmissione elevata.

4 - Conclusioni

In questo capitolo si cerca di confrontare le due sorgenti a semiconduttore. Nonostante entrambi i dispositivi sfruttino lo stesso processo di ricombinazione tra lacune ed elettroni in una giunzione PN, sono molto diversi tra di loro e con prestazioni differenti.

La maggiore differenza riguarda il fascio luminoso emesso. Il laser, a differenza del LED, produce una radiazione coerente (in fase) creata grazie all'emissione stimolata e alla cavità risonante. Ciò implica una sorgente con un fascio luminoso molto direttivo.

Un altro dettaglio rilevante che fornisce motivo di confronto è il legame tra la corrente di pilotaggio e la potenza ottica d'uscita. È possibile riportare graficamente i due andamenti come in fig. 4.1, valutando anche la capacità di modulazione per i due dispositivi.

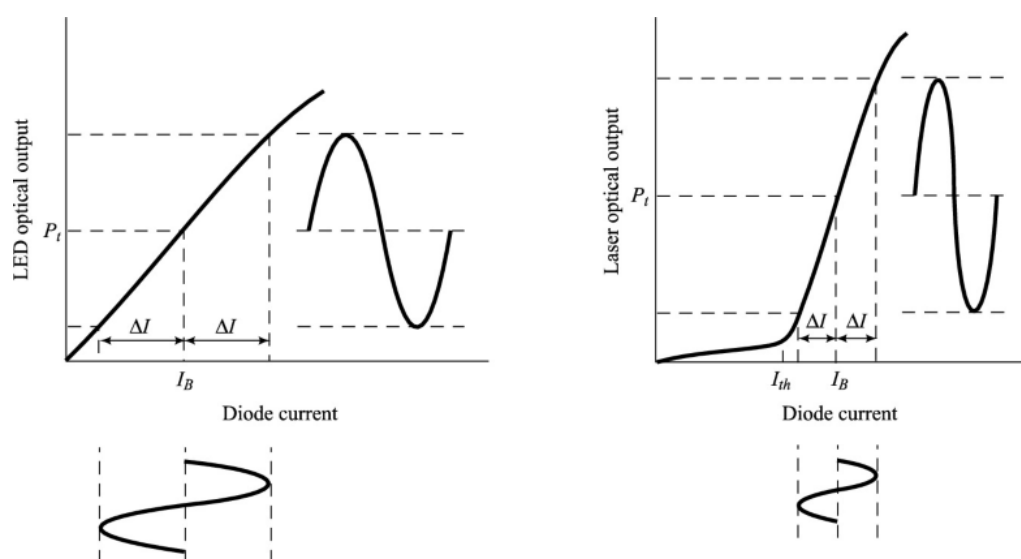


Figura 4.1 Andamento corrente-potenza ottica e range di modulazione per dispositivi LED (sinistra) e LD (destra)^[2]

È bene discutere come siano diversi i circuiti di controllo per i due dispositivi. Per i laser, il punto di lavoro deve esser ben definito per garantire stabilità all'intero sistema di trasmissione. Le condizioni di soglia impongono il pilotaggio con una corrente stabile in modo da evitare anche distorsioni in fase di modulazione, cosa che per i LED è facilmente evitabile vista la quasi linearità.

Anche i tempi di risposta e quindi le frequenze di modulazione descrivono la diversità dei due dispositivi. Per i laser, si possono usare frequenze di modulazione dell'ordine dei GHz mentre per i LED il limite è di circa 200 MHz.

Non è da trascurare la dipendenza dalla temperatura per i diodi laser, che richiede ulteriori risorse per creare un dispositivo stabile.

Sintetizzando, i LED sono dispositivi con una resa limitata ma con costi di realizzazione ridotti e non necessitano di complessi circuiti per il funzionamento mentre i laser richiedono un processo di produzione più complicato, quindi più costoso, e il bisogno di un sistema di pilotaggio per compensare effetti della temperatura e condizioni di funzionamento offrendo però ottime prestazioni. I due dispositivi riescono a soddisfare quindi tutte le esigenze che il mercato richiede.

Oltre ad esser largamente utilizzati nelle comunicazioni ottiche, i LED e LD trovano utilizzo in molti altri campi.

I LED, per esempio, sono molto utilizzati nell'illuminazione mentre i dispositivi laser vengono utilizzati nei trattamenti biomedici, nelle stampanti, per le memorie ottiche, nei settori industriali e molto altro.

Bibliografia

- [1]. Keiser, Gerd. Optical Fiber Communications. 5. ed, McGraw-Hill, 2015.
- [2]. Keiser G. (2021) Light Sources for Fiber Links. In: Fiber Optic Communications. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4665-9_4
- [3]. Richardson, D., Fini, J. & Nelson, L. Space-division multiplexing in optical fibres. Nature Photon 7, 354–362 (2013). <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.94>
- [4]. Agrawal G.P. (2016) Optical Communication: Its History and Recent Progress. In: Al-Amri M., El-Gomati M., Zubairy M. (eds) Optics in Our Time. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_8
- [5]. Luce: riflessione e rifrazione. <https://www.clipnotes.it/luce-riflessione-e-rifrazione/>
- [6]. "Angolo d'incidenza (ottica)." Wikipedia, L'enciclopedia libera. 21 giu 2019. [https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Angolo_d%27incidenza_\(ottica\)&oldid=105909992](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Angolo_d%27incidenza_(ottica)&oldid=105909992)
- [7]. “La fibra ottica” <http://boscoottica.blogspot.com/2015/08/la-fibra-ottica.html>
- [8]. “Basic Electronics | Introduction to Electronics” <https://www.circuitbread.com/study-guides/basic-electronics/introduction-to-electronics>
- [9]. Rosario Ciaglia. Semiconduttori, la giunzione P-N: caratteristiche e funzionamento. 18 nov 2019. <https://rosariociaglia.altervista.org/semiconduttori-la-giunzione-p-n-caratteristiche-e-funzionamento/>