

Capitolo 1

I dispositivi per l'optoelettronica

1.1 Introduzione - sistema ottico di comunicazione

L'optoelettronica è una branca molto importante dell'elettronica, che si pone il seguente problema da risolvere: passare dal dominio dei segnali elettrici a quello dei segnali ottici, e viceversa, mediante dispositivi elettronici. I principali, di questi dispositivi, sono i LED, i LASER, i fotorivelatori. Questi dispositivi sono utili in ambito di telecomunicazione (sistemi di trasmissione), di storage, o altro ancora. L'esempio più completo di sistema optoelettronico è proprio nell'ambito delle telecomunicazioni: un sistema di comunicazione ottico; esso è composto da tre blocchi:

- trasmettitore;
- canale di trasmissione;
- ricevitore.

Il canale è un supporto che deve permettere la propagazione guidata, ed è realizzato mediante una fibra ottica (cosa sia essa verrà approfondito in seguito); se la tratta è lunga, tuttavia, sarà necessario introdurre blocchi di rigenerazione del segnale: man mano che si percorre più strada, il segnale tende a degradarsi, dunque sarà fondamentale l'uso di sistemi di condizionamento anche per il segnale ottico, quali per esempio gli amplificatori ottici, realizzati su semiconduttore o in fibra ottica.

Sia a monte sia a valle sono necessarie due categorie di sotto-blocchi:

- a monte serve un generatore per la portante ottica, e un meccanismo che permetta di tradurre il segnale elettrico in ottico, dunque di trasferirlo sulla portante ottica (il **modulatore**). La sorgente luminosa assorbe potenza elettrica e la restituisce (possibilmente con un'efficienza molto elevata) sotto forma di segnale ottico, mediante un LED o un LASER. Questi possono essere realizzati con qualcosa di molto simile a una giunzione $p - n$, in cui però si cerca di massimizzare il meccanismo di generazione termica / ricombinazione; per questo motivo, in questi casi, la giunzione utilizzata deve essere polarizzata direttamente;
- a valle si ha un sistema duale: il ricevitore. Anche in esso vi sarà una parte elettronica e una optoelettronica: la seconda dovrà prendere la portante ottica e convertirla in un segnale elettrico; ciò può essere fatto utilizzando un fotorivelatore.

I semiconduttori sono molto interessanti sotto il punto di vista dell'optoelettronica, dal momento che un segnale ottico è a tutti gli effetti un'onda elettromagnetica, a frequenza molto elevata (nel campo del visibile). Come già detto, si usa come fenomeno di trasduzione la generazione/ricombinazione, ossia la formazione/eliminazione di coppie elettrone-lacuna per la promozione/caduta di elettroni da E_V a E_C . Il segnale ottico, come noto dalle relazioni di De Broglie, può essere pensato anche in termini particellari, dunque come flusso di fotoni, dotati di un'energia pari a:

$$E = \hbar\omega$$

Si deve chiedere dunque alla frequenza del segnale ottico di essere tale da far avere un'energia ai fotoni almeno pari a E_g : dal momento che, infatti, $\hbar\omega$ è dell'ordine degli eV, l'uso dei semiconduttori è perfetto: si tratta proprio dell'ampiezza dell'energy gap.

Si vuole ottenere dunque un sistema di propagazione guidata, dunque una guida d'onda; strutture di questo tipo possono essere studiate mediante le equazioni di Maxwell, applicandovi il formalismo di Marcuvitz e Schwinger, ma anche in modo diverso: un'analisi più semplice può essere basata sull'osservazione secondo cui:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}$$

Dove n è l'indice di rifrazione opposto da un materiale. Usando due strati, dunque, si riesce a confinare, nello strato con n minore, il segnale ottico.

Una struttura del genere potrebbe essere studiata semplicemente con l'ottica geometrica, con le leggi di Snell, senza dover scomodare le complicate

equazioni di Maxwell. In ambito di ottica, solitamente le guide più utilizzate sono quelle circolari, ossia le già citate fibre ottiche. Tutti i ragionamenti, basati sull'ottica geometrica, possono essere applicati, a patto che la lunghezza d'onda dei segnali ottici sia trascurabile rispetto alle dimensioni spaziali in gioco.

La cosa più semplice che si possa fare per realizzare fibre ottiche è utilizzare del biossido di silicio drogato: il drogaggio cambia la costante dielettrica relativa ε_r , e con essa il coefficiente di rifrazione n . A seconda delle dimensioni fisiche, dunque, sono possibili diversi comportamenti:

- fibre monomodali: nelle quali si propaga un solo modo;
- fibre multimodali, nelle quali si propagano, assieme, diversi modi.

Le fibre ottiche hanno un grosso problema: quasi tutta la perdita di efficienza deriva dalla difficoltà di accoppiare fibre e dispositivi a semiconduttore, ottenendo grosse *perdite di accoppiamento*, all'interfaccia. Di solito si preferiscono utilizzare fibre monomodali, al fine di garantire una buona purezza spettrale: è noto infatti che introdurre diversi modi può provocare rumori di fase, che devono essere, di fatto, minimi.

In un trasmettitore sono presenti due tipi di dispositivi optoelettronici, come già detto: LED/LASER, e il modulatore. Al fine di realizzare la modulazione, esistono sostanzialmente due tecniche:

- modulazione interna: se si manda una corrente non costante nel tempo, ma a una certa frequenza, se la corrente viene modulata nel tempo, allora si modula in ampiezza l'uscita della sorgente luminosa. In tal caso, se non si ha un modulatore *separato* rispetto al generatore di segnale ottico, la modulazione è detta **interna**; essa è facile da realizzare, evita l'introduzione di ulteriori dispositivi, ma la banda è limitata a circa 20 GHz (ben bassa, rispetto ai THz che si possono ottenere in altri modi).
- modulazione esterna: si utilizza anche un modulatore esterno, ossia un dispositivo terzo, mentre la sorgente di portante ha corrente costante.

Qualche nota riguardo al blocco di ricezione: il ricevitore deve convertire il segnale ottico (solitamente modulato in ampiezza, mediante AM), in un segnale elettrico, utilizzando ancora una volta i processi di generazione/ricombinazione presenti in un fotorivelatore. I parametri caratteristici di un ricevitore sono:

- la sensitivity: la minima potenza ottica rivelabile;
- la larghezza di banda di modulazione: la possibilità di tradurre segnali a elevato bitrate, e dunque molto rapidi.

1.1.1 Assorbimento e emissione

Dal punto di vista del fotone, dunque del segnale ottico, i meccanismi collegati alla generazione/ricombinazione sono l'emissione e l'assorbimento dei fotoni. Come noto dalla teoria dei semiconduttori, generazione/ricombinazione avvengono con una certa facilità, se i semiconduttori sono a **gap diretto**. Ciò non ci piace molto, dal momento che il più importante dei nostri semiconduttori, il silicio, è un dispositivo a gap indiretto; esempi di materiali utili per l'optoelettronica sono il GaAs, o il InP, entrambi materiali a gap diretto. Un parametro molto importante è quello che caratterizza l'assorbimento dei fotoni: il coefficiente di assorbimento α . Si può dimostrare che la potenza ottica incidente decresce esponenzialmente, nello spazio, con una costante di decadimento pari a α^{-1} . Se la potenza ottica è molto ridotta, dunque, significa che i fotoni sono stati assorbiti, e dunque che le coppie elettrone-lacuna sono state generate. Maggiore è α , minore sarà la lunghezza caratteristica di assorbimento. α è una quantità dipendente dalla lunghezza d'onda λ che si considera.

Si noti che, in corrispondenza di $E = E_g$, non si ha assorbimento, e dunque in un grafico si vedrebbero degli asintoti verticali. Una nota positiva: anche se Si o G sono materiali a gap indiretto, essi hanno un α abbastanza elevato, dunque sono di fatto utilizzabili, in applicazioni a bassa qualità. In applicazioni ad alta qualità, il GaAs o il InP sono senza dubbio molto più indicati.

Ripetiamo ancora una volta il concetto di base: il punto di contatto tra il mondo dei segnali elettrici e il dominio ottico è il meccanismo di generazione/ricombinazione presente nei semiconduttori. Valutare la potenza ottica è dunque abbastanza semplice: procedendo nel materiale, da un punto x a un punto $x + dx$, si ha:

$$P_{op}(x + dx) - P_{op}(x) < 0$$

questo è ovvio: più si va avanti in x , più i fotoni sono stati assorbiti, e dunque la potenza ottica si riduce. Andando avanti, ricordando che l'assorbimento segue una legge esponenziale, si avrà:

$$P_{op}(x + dx) - P_{op}(x) = P_{op}(0)e^{-\alpha(x+dx)} - P_{op}(0)e^{-\alpha x}$$

Sviluppando mediante Taylor l'espressione, troncando al primo ordine, si ottiene:

$$P_{op}(x + dx) - P_{op}(x) \sim -\alpha P_{op}(x)dx$$

dove

$$P_{op}(x) = P_{op}(0)e^{-\alpha x}$$

A questo punto definire il tasso di generazione ottica è semplice: dato $\alpha P_{op}(x)$, dividendolo per l'energia di un singolo fotone, si può vedere quante coppie elettrone/lacuna sono state generate:

$$G_{op}(x) = -\frac{\alpha P_{op}(x)}{\hbar\omega} = \alpha\Phi_0(x)$$

Dove $\Phi_0(x)$ è il flusso dei fotoni incidenti su x .

Volendo invece generare un fotone, è necessario avere la **morte** di una coppia elettrone-lacuna, in modo da poter generare questo fotone come eccesso di energia; questo processo è detto **emissione spontanea**. In realtà, questo non è l'unico processo di emissione possibile: esiste infatti un altro processo di emissione, ossia l'**emissione stimolata**: esso è un fenomeno di emissione di fotoni, dove però la ricombinazione avviene in presenza di altri fotoni; la particolarità di questo fenomeno è il fatto che il nuovo fotone sarà coerente col precedente. Questo fenomeno è alla base dei LASER, e si realizza introducendo una reazione positiva, in un ambiente contenente molti fotoni; questi dispositivi verranno trattati più in profondità in seguito.

1.2 LED: Light Emitting Diode

La struttura di un LED è abbastanza semplice: si tratta sostanzialmente di una giunzione $p - n$ in polarizzazione diretta. Il punto chiave è fare in modo che, nella regione di svuotamento (nel caso di polarizzazione diretta dunque una regione in cui prevale un comportamento ricombinativo), la ricombinazione sia di tipo ottico. Ovviamente, molto favoriti in tal senso sono i materiali a gap diretto. Di solito questi materiali sono o GaAs o InP; il materiale è scelto in modo da avere una finestra, nel grafico delle perdite, tale da avere *adattamento con la fibra ottica*.

In questi dispositivi il meccanismo di emissione prevalente è il meccanismo di emissione spontanea; conseguenza di ciò sarà una scarsa purezza spettrale, dal momento che lo spettro di emissione è dell'ordine di $k_B T$:

$$\Delta\lambda \sim 1\mu\text{m}$$

Una relazione semplice da ricavare è quella che permette di avere un'idea dell'ordine di grandezza della potenza ottica emessa:

$$P_{op} = \hbar\omega \frac{n_{\text{fotoni}}}{t} = \hbar\omega \frac{\text{coppie elettrone - lacuna}}{t} \sim$$

$$\sim \hbar\omega \frac{I}{q} \sim IE_g$$

Dove I è la corrente che permette l'emissione. Si ricordi che questo è solo un valore di massima, a efficienza unitaria. Si può provare anche a stimare la banda dei LED, come:

$$B = \frac{1}{2\pi\tau_r}$$

dove per τ_r si intende il tempo di vita radiativo.

Esistono sostanzialmente due tipi di strutture per la realizzazione dei LED:

- LED verticali: la direzione da cui i fotoni vengono estratti è tale da avere il flusso dei fotoni ortogonale rispetto ai *piani* della struttura multi-strato. Il quantum-well sarà il materiale dal quale si vogliono prelevare i fotoni: al fine di non far attraversare troppi strati ai fotoni, perdendoli e riducendo efficienza, si realizza uno scavo, mediante il quale si volge direttamente la fibra ottica al quantum well;
- LED orizzontali: in questa struttura i flussi di corrente e dei fotoni sono ortogonali tra loro; questa struttura di fatto non è molto dissimile dai LASER. La *campana* indica il fatto che i fotoni sono soprattutto localizzati nel luogo in cui sono generati. Si può anche avere, oltre all'emissione spontanea, un po' di emissione stimolata; in tal caso, si parla di LED super-radianti.

1.3 LASER

Nei LASER si rende prevalente l'emissione stimolata su quella spontanea: questo è ottimo perché da un lato si eliminano le impurità spettrali, dall'altro si riduce il tempo di vita radiativo, aumentando la banda del dispositivo.

La concentrazione dei fotoni viene aumentata inserendo il LED in una cavità risonante per i fotoni, la quale funge da *specchio* per i fotoni. Questo è un sistema reazionato, nel quale la corrente totale si decompone in due contributi: una parte alimenta l'emissione spontanea, l'altra l'emissione stimolata. In altre parole, la reazione agisce sul segnale ottico: si generano dapprima fotoni non coerenti, che però non saranno emessi, a meno che non si raggiunga la frequenza di risonanza della cavità, f_0 ; mediante la meccanica quantistica si può dimostrare che dunque l'emissione stimolata finisce per prevalere su quella spontanea.

Si ha un meccanismo di *soglia*: è infatti necessario introdurre un minimo valore di corrente, al fine di garantire l'emissione stimolata.

Il laser a cavità risonante di Fabry-Perot è un tipo di laser a cavità risonante realizzata mediante doppia eterostruttura; storicamente è stato il primo a essere realizzato. Il primo miglioramento fu nel confinamento della corrente, in modo da attenuare i modi trasversali, migliorando l'efficienza. Il passo successivo fu dunque l'eliminazione del semiconduttore, sostituendo la cavità risonante con una sorta di specchio distribuito, ottenuto mediante un processo di corrugazione; questo garantisce maggiore purezza spettrale. Il passo *finale* fu l'introduzione di un reticolo di Bragg esterno.

1.4 Fotorivelatori

Studiamo a questo punto gli ultimi dispositivi fondamentali, nonché i duali ai precedenti due: quelli in grado di assorbire fotoni, e generare coppie elettrone-lacuna. Presentiamo direttamente alcuni esempi di realizzazioni, per poi osservare qualche aspetto ulteriore sui dispositivi in questione.

- Un esempio di fotorivelatore può essere basato su fotoconduttori: si tratta di sistemi basati su di un materiale in grado di assorbire la radiazione luminosa, e variare la propria resistività con i fotoni; applicando dunque agli estremi del materiale una tensione, la corrente sarà proporzionale alla resistività, che dipenderà dal numero di fotoni acquisiti.
- Un altro esempio di fotorivelatore può essere una semplice giunzione $p-n$: volendo far prevalere meccanismi di tipo generativo su quelli di tipo ricombinativo, al contrario di prima, bisognerà introdurre una polarizzazione inversa, modulando così, mediante l'acquisizione di fotoni provenienti dall'esterno, la corrente id saturazione inversa. Trattando correnti piccole, ora la sensitivity sarà buona.
- Una variante sul precedente è basata sull'uso di una giunzione $p-i-n$ al posto di una $p-n$: in questo modo si aumenta l'ampiezza della regione di svuotamento, e così si aumenta anche la regione di assorbimento.
- Un ultimo modo per realizzare dispositivi di questo tipo è basato sul fotorivelatore a valanga: si separano spazialmente due regioni drogate p e, con un campo elettrico, si portano via le coppie generate nell'assorbitore, *tirandole* verso una giunzione $p-n$; questa dovrà essere

polarizzata molto inversamente, in modo che si generi una rottura elettrostatica (a *valanga*). Questo dispositivo funziona, è utilizzato, ma è molto rumoroso, di conseguenza la sensitivity sarà minore.

Al fine di caratterizzare un fotorivelatore, un parametro fondamentale è la cosiddetta *responsivity*:

$$R = \frac{I}{P_{op}} = \frac{q \frac{\text{coppie elettrone-lacuna}}{\text{tempo}}}{\hbar\omega \frac{\text{numerodifotoni}}{\text{tempo}}} = \frac{q}{\hbar\omega} \frac{\text{numerocoppie elettrone/lacuna}}{\text{numerodifotoni}} = \frac{q}{\hbar\omega} \eta$$

Si tratta sostanzialmente di una cifra di merito; η è l'efficienza quantica. Si noti che la corrente I è associata al segnale utile, dunque la formula ha senso: non basta infatti che un fotone venga assorbito, dal momento che la coppia elettrone-lacuna deve poter **entrare in circolo**, in modo da dare un contributo utile alla corrente. Nel fotorivelatore a valanga, η sarà elevata.