

Errata corrige di Appunti di Optoelettronica

Ringrazio tutti coloro che mi indicheranno gli errori e le inesattezze presenti negli appunti e nelle trasparenze

- **pag. 33**
“A differenza delle fibre silice-plastica ...”

- **pag. 40 (riga 1)**
Benchè la reazione avvenga anche ...

- **pag. 51**

Il paragrafo 8.2.1 (pag. 51-54) va sostituito con quanto segue:

8.2 **Sorgenti ottiche**

8.2.1 **Fisica della luce laser**

a) *Generalità*

Le sorgenti ottiche usate nei sistemi di telecomunicazione sono essenzialmente quelle a semiconduttore costituite in linea di principio, come vedremo, da una o più giunzioni p-n . Riteniamo, tuttavia, utile anche trattare i principi di funzionamento di laser a gas, a liquidi e a stato solido.

Occorre effettuare alcune premesse, ricordando il concetto di livelli energetici di un sistema atomico.

Consideriamo, ad esempio, un sistema atomico molto semplice costituito da una carica positiva attorno alla quale ruoti una carica negativa (elettrone).

Secondo la meccanica classica l'energia dell'elettrone può assumere con continuità tutti valori permessi dalle condizioni di equilibrio dell'atomo. Ovvero l'elettrone può ruotare su qualsiasi orbita, purchè con velocità opportuna in modo da compensare con la corrispondente forza centrifuga l'attrazione del nucleo.

La meccanica quantistica ha smentito questa rappresentazione dimostrando come l'energia dell'elettrone possa, al contrario, assumere solo un numero discreto di valori. L'elettrone in altre parole, può portarsi solo su un certo numero di *livelli di energia*.

Può essere utile ricordare altresì, come atomi eccitati tendano a ritornare verso stati di energia più bassa e, in tali transizioni, cedere l'energia acquistata nel processo di eccitazione, sotto forma di radiazione e.m. di lunghezza d'onda ben determinata.

b) *Emissione spontanea*

Consideriamo un elettrone che abbia in qualche modo acquistato dall'esterno un eccesso di energia, cioè sia stato portato ad un livello di energia E_2 maggiore di quello corrispondente allo stato di minima energia E_1 (stato fondamentale). Esso tenderà a liberarsi, emettendo radiazione, dell'eccesso di energia acquistata, al fine di ritornare al suo stato fondamentale.

Questo processo può avvenire senza il concorso di cause esterne all'elettrone. In tal caso l'elettrone passa **spontaneamente** dal livello E_2 al livello E_1 (FIG. 34a) cedendo energia verso l'esterno sotto forma di onda e.m. la cui frequenza è data da:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

dove h = costante di Plank.

La quantità:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

dicesi **fotone** e rappresenta, in accordo con la meccanica quantistica, la minima quantità di energia e.m. (*quanto* di energia).

Supponiamo che al tempo iniziale t il sistema considerato possieda n_2 elettroni di energia E_2 . La variazione nell'unità di tempo del numero di elettroni presenti sul livello E_2 sarà:

$$\frac{dn_2}{dt} = -A \bullet n_2$$

dove: dn_2/dt è la variazione del numero di elettroni nell'unità di tempo

A = probabilità di emissione spontanea, cioè probabilità che un elettrone passi nell'unità di tempo spontaneamente dal livello E_2 al livello E_1

Il segno negativo indica che la variazione del numero di elettroni sul livello di energia E_2 è una diminuzione.

Si ha anche che:

$$\tau = \frac{1}{A}$$

dove: τ = vita media (tempo di permanenza nel livello "metastabile" E_2).

c) *emissione stimolata*

Se, al contrario del caso precedente, mentre l'elettrone si trova sul livello E_2 viene, in un certo istante, colpito da un fotone di energia coincidente (o molto vicina) a quella che lui stesso può generare spontaneamente, ($h\nu=E_2-E_1$), esso **viene stimolato** a diseccitarsi e a portarsi dal livello E_2 al livello E_1 (FIG. 34b). In tal caso cede un altro fotone di energia $h\nu=E_2-E_1$ che si somma al fotone stimolante.

In analogia al caso precedente, la variazione del numero di elettroni nell'unità di tempo sul livello E_2 sarà proporzionale al numero di elettroni inizialmente presenti nel livello E_2 :

$$\frac{dn_2}{dt} = -W_{21} n_2$$

dove: dn_2/dt = variazione del numero di elettroni nell'unità di tempo

W_{21} = probabilità di emissione stimolata, ovvero probabilità che un elettrone passi nell'unità di tempo dal livello E_2 al livello E_1 in modo stimolato

Il segno negativo indica che la variazione del numero di elettroni è una diminuzione.

d) *assorbimento*

Supponiamo questa volta che l'elettrone si trovi sul livello fondamentale E_1 (livello di energia minore) e che, in un certo istante, sia "colpito" da un fotone di energia $h\nu=E_2-E_1$ (FIG. 34c). In tal caso l'elettrone, assorbendo l'energia E_2-E_1 , è indotto a portarsi sul livello E_2 dando (fenomeno dell'assorbimento).

Se il sistema possiede n_1 elettroni sul livello E_1 , la variazione nell'unità di tempo del numero di elettroni su tale livello per effetto dell'assorbimento, sarà proporzionale al numero n_1 di elettroni presenti:

$$\frac{dn_1}{dt} = -W_{12} n_1$$

W_{12} = probabilità di assorbimento, ovvero probabilità che un elettrone passi nell'unità di tempo dal livello E_1 al livello E_2 per effetto dell'assorbimento di energia.

Anche in questo caso il segno negativo sta ad indicare una diminuzione.

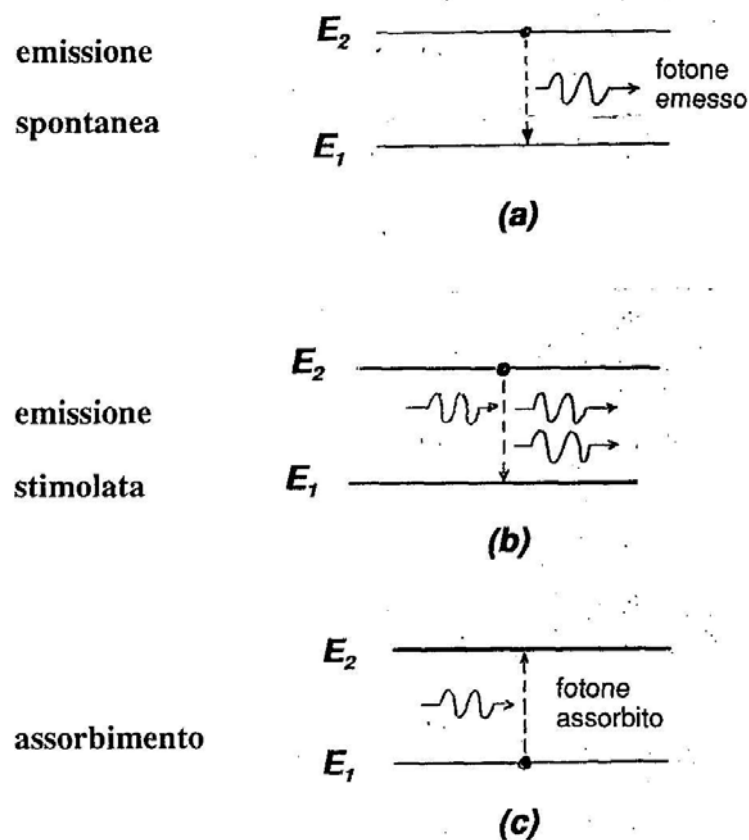


FIG. 34

f) Osservazioni

⇒ Esiste una fondamentale differenza fra emissione spontanea ed emissione stimolata. Nel primo caso gli atomi, opportunamente eccitati, restituiscono l'energia ricevuta in modo temporalmente casuale. Quindi i fotoni emessi non hanno nessuna relazione di fase fra loro e, inoltre, l'emissione non avviene secondo direzioni preferenziali. Ciò accade comunemente nelle lampade ad incandescenza e nei tubi a scarica elettrica dove, rispettivamente, l'agitazione termica e gli elettroni della scarica producono l'energia necessaria per l'eccitazione degli atomi.

Nel caso di emissione stimolata, l'emissione avviene nel medesimo istante in cui l'atomo è "colpito" dalla radiazione stimolante. Quindi, a differenza dell'emissione spontanea, i fotoni emessi sono coerenti rispetto al campo inducente, cioè i loro contributi si sommano con la stessa fase temporale.

⇒ A parità di condizioni (stesso materiale, stessa intensità di energia stimolante) le probabilità di emissione stimolata e di assorbimento sono uguali:

$$W_{21} = W_{12}$$

Ciò, in parole povere, significa che se l'onda stimolante incide su due atomi, uno eccitato e l'altro no, la probabilità che l'atomo eccitato si disecciti *amplificando* l'onda incidente (cioè emettendo un altro fotone in aggiunta a quello incidente), è pari alla probabilità che l'atomo non eccitato si ecciti assorbendo il fotone incidente e quindi *attenuando* l'onda.

In media, quindi, in condizioni di equilibrio, questi due processi tenderanno a compensarsi. Affinchè l'amplificazione prevalga, invece, sull'attenuazione occorre che il numero di atomi per unità di tempo $|dn_2/dt|$ che, per emissione stimolata passano dal livello E_2 al livello E_1 , sia maggiore del numero di atomi $|dn_1/dt|$ che, per effetto dell'assorbimento, passano dal livello E_1 al livello E_2 :

$$\left| \frac{dn_2}{dt} \right| > \left| \frac{dn_1}{dt} \right|$$

ma poichè, come abbiamo detto, la probabilità di emissione stimolata e di assorbimento sono uguali ($W_{21} = W_{12}$), occorre che sia:

$$n_2 > n_1$$

cioè occorre che il numero di atomi eccitati sia maggiore del numero degli atomi non eccitati., ovvero che la *popolazione* del livello E_2 (numero di atomi nel livello E_2) sia maggiore della popolazione del livello E_1 .

In tali condizioni si dice che si ha una **inversione di popolazione** in quanto ciò non si verifica nelle usuali condizioni di equilibrio termodinamico per le quali invece (vedi la statistica di Boltzman) si ha:

$$n_2 < n_1$$

All'equilibrio termodinamico, infatti, un materiale si comporta notoriamente come assorbitore. Se invece si avesse:

$$n_2 = n_1$$

i due fenomeni di emissione stimolata e di assorbimento verrebbero a bilanciarsi ed il materiale diverrebbe trasparente.

- pag. 67, paragr. “1)Fotodiodi con giunzione p-n”, rigo 1

Sostituire con:

“Tali rivelatori sono costituiti da una giunzione pn polarizzata inversamente (funzionamento cosiddetto fotoconduttivo) o non polarizzata (nelle celle fotovoltaiche che funzionano nel cosiddetto modo fotovoltaico) e ...”

- pag. 67

La figura 50 deve essere sostituita con la seguente:

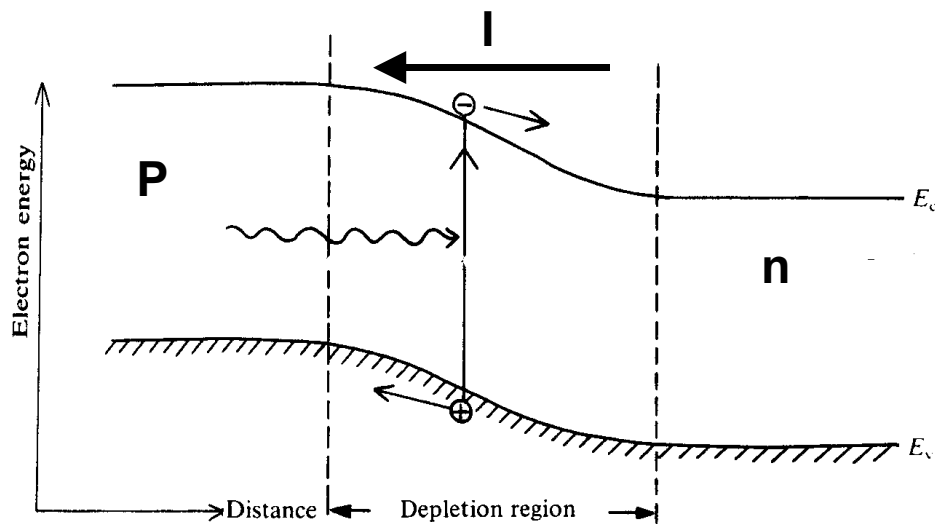


FIG. 7.25 Electron energy level diagram illustrating the generation and subsequent separation of an electron-hole pair by photon absorption within the depletion region of a p-n junction.