

Laser, laser a diodo, fotodiodo a livello zero

francesco.fuso@unipi.it; <http://www.df.unipi.it/~fuso/dida>

(Dated: version 2 - FF, 16 maggio 2016)

Il laser può essere considerato come una delle “applicazioni” più eclatanti della meccanica quantistica. Descriverne il funzionamento richiede quindi di usare concetti e tecniche che non sono alla portata degli studenti del secondo anno di fisica. Trattare poi di laser a diodo e fotodiodi pone l'ulteriore problema di modellare il comportamento dei materiali, che a sua volta richiede concetti piuttosto avanzati e specifici. In questa breve nota si cerca di trattare gli aspetti fondamentali coinvolti nell'operazione di un laser, con particolare riferimento al laser a diodo (e con cenni ai fotodiodi), mantenendo al minimo, a “livello zero”, l'introduzione di nuovi concetti. Sarete in grado di revisionare criticamente tutto quanto qui riportato proseguendo nei vostri studi.

I. LASER

L'invenzione del laser, avvenuta una cinquantina di anni fa grazie alla straordinaria e fruttuosa convergenza di approcci di ricerca industriale e accademica in tante parti del mondo, ha aperto la strada a un'incredibile varietà di sviluppi applicativi e fondamentali, che sono tuttora un vivissimo argomento di ricerca in fisica.

Il termine laser è una sigla, presto diventata un acronimo. Laser significa *Light Amplifier Stimulated Emission Radiation*. In questa sigla è contenuta la gran parte delle caratteristiche di funzionamento del laser, che è appunto un dispositivo in cui si verifica *amplificazione* della radiazione luminosa (tipicamente nel visibile o nel vicino infrarosso) grazie a processi di *emissione stimolata*. La sigla, però, omette di specificare che nel laser l'amplificazione di radiazione è normalmente accoppiata a fenomeni di retroazione (feedback) che portano il dispositivo a operare come un oscillatore, cioè a produrre, non solo amplificare, radiazione luminosa in modo “autonomo”.

Le caratteristiche speciali della luce emessa da un laser sono ben note e possono essere riassunte affermando che il laser emette radiazione *coerente*. L'elevata coerenza della radiazione, che può essere declinata in varie forme (spettrale, temporale, spaziale), è alla base di quelle proprietà che non possono essere riprodotte con altre sorgenti (lampade, per esempio), come la possibilità di essere focalizzata in modo efficace (al limite di diffrazione), l'eccellente livello di monocromaticità, la capacità di essere impiegata in misure interferometriche di tante diverse tipologie, e altre che qui non citiamo.

Dal punto di vista corpuscolare, la caratteristica di coerenza implica che il fascio di un laser possa essere qualitativamente descritto da un fascio di fotoni che hanno *tutti* le stesse proprietà (energia, quantità di moto e anche momento angolare). È evidente che un fascio così realizzato permette di disporre di uno strumento che, una volta messi in atto opportuni schemi di interazione con la materia, realizza un grado di controllo elevatissimo sulla materia stessa. Per esempio, in conseguenza di questo elevato grado di controllo, manipolazioni e analisi della materia condotte con luce laser possono portare a modifiche fortemente selettive nella materia, oppure a misure

estremamente sensibili delle grandezze analizzate. Anche se, come in parte discuteremo nel seguito, in un laser reale la coerenza non può essere completa, ugualmente l'uso del laser porta a una generalizzata capacità di controllare i sistemi materiali che non può essere ottenuta con altre sorgenti. Questo è uno dei principali motivi per l'importanza e la diffusione dei laser nelle applicazioni scientifiche degli ultimi decenni.

A. Componenti del laser

Per scopi “didattici”, è possibile distinguere diverse componenti, materiali o concettuali, che concorrono al funzionamento di un laser:

1. il *mezzo attivo*, che è un sistema materiale che, attraverso interazione con la luce, permette di ottenere amplificazione;
2. il *pompaggio*, che rappresenta l'insieme di tecniche e concettuali, che rendono possibile l'amplificazione di luce da parte del mezzo attivo;
3. la *cavità ottica*, che permette di selezionare o controllare le caratteristiche della luce laser e, soprattutto, di modificare il funzionamento del mezzo attivo da amplificatore a oscillatore, necessario affinché il laser possa operare come sorgente di radiazione.

II. MEZZO ATTIVO

Alla base del funzionamento di qualsiasi laser c'è la realizzazione di specifici schemi di interazione tra radiazione (nel range di interesse per l'ottica, quindi luce, in senso estensivo) e materia. L'interazione radiazione materia è un argomento estremamente vasto, all'interno del quale convergono moltissimi modelli sviluppati per interpretare diversi fenomeni. Gran parte di questi modelli impiega in maniera pesante descrizioni di tipo quantistico.

Non è questa la sede opportuna per affrontare l'argomento; tuttavia, è utile e necessario richiamare qualche

concetto molto generale, e a livello assolutamente qualitativo. In particolare occorre chiarire che, in un contesto specifico di semplificazioni modellistiche e approssimazioni, la materia di nostro interesse dispone di *livelli discreti di energia*. Tenerne conto aiuta in maniera sostanziale la comprensione del funzionamento dei laser.

Se prendiamo l'esempio più semplice di "materia" rilevante in questo ambito, un atomo di idrogeno descritto dal modello semiclassico di Bohr, la presenza di livelli discreti di energia è evidente. Basta infatti applicare la regola di quantizzazione del momento angolare a diversi valori del numero quantico principale n per ottenere orbite di raggio diverso. A queste orbite corrispondono specifici valori di energia cinetica e di energia di interazione elettrostatica, e dunque compaiono livelli di energia complessiva diversa (tutti negativi e crescenti con n), come mostrato in Fig. 1(a). Notate che, idealmente e nell'ambito del nostro modello, questi livelli di energia sono perfettamente definiti, cioè l'energia di ogni livello, ovvero la differenza di energia fra diversi livelli, può essere data senza alcuna incertezza.

Naturalmente il modello di Bohr rappresenta una descrizione molto approssimata che può essere applicata sensatamente solo nel caso degli idrogenoidi (e, possibilmente, per alti valori di n). Modelli più sofisticati, in cui l'aspetto quantistico diventa via via più rilevante, valgono per sistemi di maggiore complessità, come atomi non idrogenoidi, molecole, fino ad arrivare allo stato condensato (liquidi, solidi). È difficile in questo contesto individuare una linea guida che permetta una descrizione unificata, ma, come in gran parte vedrete nel prosieguo dei vostri studi, è in genere possibile affermare che, mano a mano che il sistema aumenta la sua complessità, cioè aumenta il numero di componenti elementari (atomici) di cui esso è costituito, i livelli di energia del sistema elementare originario tendono a modificarsi. Come rappresentato schematicamente in Fig. 1(b), finché il numero di componenti elementari, indicato con N in figura, è limitato, come per esempio in un sistema molecolare, i livelli si mantengono discreti, ma ogni singolo livello si suddivide in più "sotto-livelli" (*splitting* di energia). Quando invece il numero di componenti è molto grande, come succede per un sistema allo stato condensato (liquido, solido), allora i livelli discreti degenerano in *bande di energia*.

Andando avanti con i vostri studi, vedrete che responsabili delle modifiche allo schema dei livelli energetici sono le interazioni (Coulombiane, ma anche di altro tipo, spesso squisitamente quantistico) fra i singoli componenti elementari del sistema considerato. Per il momento tenete presente che esistono laser che sfruttano mezzi attivi di ogni genere, atomico, molecolare, liquido, solido, e che normalmente la complessità nell'interpretazione del funzionamento aumenta con la complessità del sistema stesso. In altre parole, un laser che sfrutta un mezzo attivo atomico, per esempio un vapore (il laser HeNe ne è un ottimo rappresentante), è molto più semplice da interpretare che non un laser allo stato solido (il laser a diodo ricade purtroppo in questa tipologia). Dunque finché

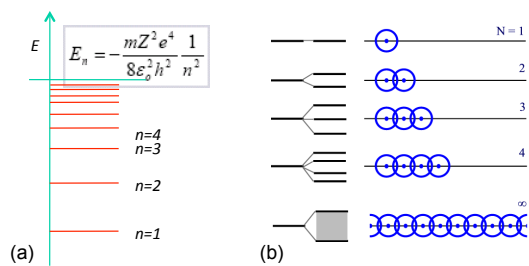


Figura 1. Rappresentazione schematica dei livelli discreti di energia in un atomo di Bohr con numero quantico n (a) e illustrazione dei livelli di energia e della loro origine in sistemi complessi (b), costituiti da un numero N di elementi via via crescente. Illustrazione tratta dal web.

possibile faremo riferimento a casi estremamente semplici, in cui la materia è costituita da atomi non interagenti fra loro e dotati di livelli di energia discreti.

A. Interazione radiazione materia alla Einstein

Facciamo interagire un "atomo quantistico" con la radiazione. Per comodità, o necessità, decidiamo di descrivere anche la radiazione in maniera quantistica: dunque l'evento elementare è costituito dall'interazione di *un* fotone con *un* atomo. Volendo, nell'ottica di strasemplificare il linguaggio usato, potete pensare a questo evento elementare come a un "urto" (un fotone che arriva sull'atomo) o a una "frammentazione" (da un atomo emerge un fotone), stando però attenti a ricordare che una tale semplificazione non rende onore alla quantità e qualità dei processi effettivamente coinvolti.

La descrizione di Bohr contiene già al suo interno un meccanismo in cui compaiono fotoni: questo meccanismo è il decadimento di un atomo da un livello eccitato a un livello meno eccitato (o al fondamentale). Questo processo rappresenta l'*emissione spontanea* da parte di un atomo eccitato. In esso, come in tutti i processi che qui citeremo, devono essere conservate delle grandezze complessive del sistema atomo/fotone. In particolare, occorre che si conservi l'*energia* totale. Dunque il fotone prodotto dal decadimento deve avere un'energia $E_{phot} = h\nu = E_{n''} - E_{n'}$, dove $E_{n''}$ e $E_{n'}$ sono i livelli di energia di partenza e di arrivo nel processo; la Fig. 2(a) mostra una visione pittoresca del processo considerato. È interessante osservare che negli atomi idrogenoidi (più in generale negli atomi) queste differenze di energia cadono proprio nella regione del visibile, o nei suoi dintorni.

Oltre all'emissione spontanea, possiamo facilmente individuare un altro processo che ha solide basi qualitative (esso può anche essere identificato con una trattazione puramente classica): se un fotone arriva su un atomo, è possibile che esso venga assorbito [vedi Fig. 2(b)], cioè che la sua energia venga trasferita al "sistema", come in una sorta di urto anelastico. Per la conservazione dell'energia, il processo di *assorbimento* richiede che il foto-

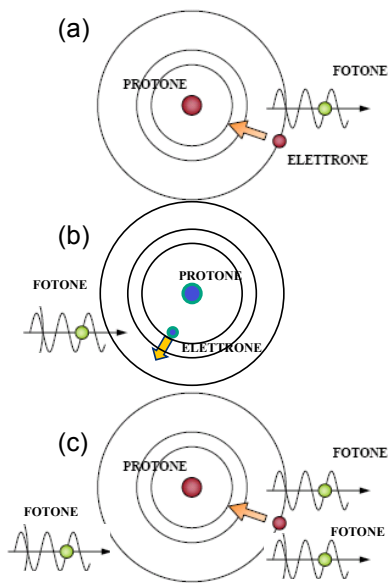


Figura 2. Rappresentazione pittorica dei processi di emissione spontanea (a), assorbimento (b), emissione stimolata (c) a carico di un atomo di Bohr. Illustrazione tratta dal web.

ne abbia un'energia, ovvero la luce abbia una lunghezza d'onda, ovvero una frequenza, *risonante* con la differenza di energia tra due livelli energetici. In questo caso il fotone può “scompare” e l'elettrone del nostro atomo di Bohr essere promosso a un livello maggiormente eccitato.

Secondo Einstein, che si occupò del problema in uno dei suoi famosi lavori di inizio '900, accanto a questi due processi occorre ipotizzarne un terzo. Questo processo si può verificare a carico di un atomo *che si trova “già” a un livello eccitato* e prevede che, in seguito all'arrivo di un fotone (come al solito di energia risonante), avvenga una diseccitazione accompagnata da emissione di un (altro) fotone [vedi Fig. 2(c)]. A questo processo, che non ha un semplice analogo classico, si dà il nome di *emissione stimolata*. Sulla base di ragionamenti molto semplici, Einstein riuscì a determinare la probabilità con cui avvengono i tre distinti processi, e a legarle alle caratteristiche della materia e della radiazione.

È importante ricordare che la meccanica quantistica “seria” richiede precisazioni e impone limitazioni ai processi che abbiamo considerato, la cui interpretazione dettagliata è tutt'altro che banale. Coerentemente con gli scopi di questa nota, trascuriamo completamente questi aspetti.

B. Emissione stimolata

Due osservazioni importantissime sul meccanismo dell'emissione stimolata:

1. il fotone che incide sull'atomo *non* viene assorbito, ma serve solo per “triggerare” il processo: esso si ritrova quindi “in uscita” assieme al fotone

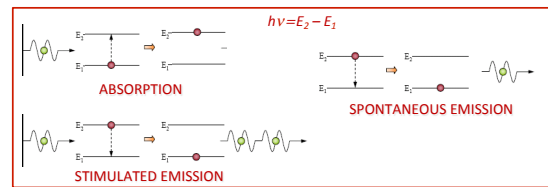


Figura 3. Ulteriore rappresentazione schematica dei processi di assorbimento, emissione stimolata, emissione spontanea. Illustrazione tratta dal web.

che è prodotto dalla transizione dell'atomo a livello energetico inferiore;

2. per ragioni di tipo fondamentale, i fotoni emessi per emissione stimolata sono *indistinguibili* dai fotoni che triggerano il processo; notate che, invece, i fotoni emessi per emissione spontanea, pur avendo energia definita (e quindi corrispondendo tutti a luce di una certa frequenza o lunghezza d'onda), hanno quantità di moto, ovvero direzione di emissione, distribuita in modo virtualmente casuale. Essi infatti possono essere considerati emergere in modo spazialmente isotropo dall'atomo che li produce.

A questo punto è molto semplice capire perché la sigla laser enfatizza l'emissione stimolata: questo processo è evidentemente in grado di aumentare il numero di fotoni, dunque *amplificare* la radiazione, e i fotoni emessi sono tutti simili tra loro, cioè l'emissione è *coerente*.

La Fig. 3 mostra un nuovo quadro riassuntivo dei tre processi considerati, stavolta rappresentati ponendo l'accento sulla presenza di livelli energetici.

III. POMPAGGIO E INVERSIONE DI POPOLAZIONE

La possibilità di amplificare radiazione attraverso meccanismi di emissione stimolata potrebbe suonare contraria alle esigenze generali di bilancio energetico. Così ovviamente non è. Infatti per avere emissione stimolata occorre che l'atomo si trovi “già” a uno stato eccitato, cosa che comporta un certo dispendio energetico a monte del meccanismo.

Invece di un singolo elemento (per esempio, atomo) in grado di interagire con la radiazione, consideriamo ora un sistema fatto di tantissimi elementi, cioè un *campione* di elementi. Tantissimi, infatti, sono i fotoni che vogliamo produrre, per cui non è sufficiente considerare un singolo elemento, o atomo, come coinvolto nel processo. Il campione di cui parliamo è generalmente caratterizzato da una distribuzione statistica delle sue grandezze, un po' come succede per gli atomi o le molecole di un gas. Senza entrare nei dettagli della meccanica statistica, è convinzione generalizzata che il campione tenda ad assumere configurazioni in cui l'energia è minimizzata rispetto alle condizioni (in particolare la temperatura) in cui esso si

trova. In altre parole, in un mezzo attivo lasciato evolvere spontaneamente a una data temperatura, troveremo che la maggior parte dei suoi elementi sta a livello energetico basso (semplificando, il fondamentale). È importante ricordare che i livelli energetici di cui ci stiamo occupando hanno separazioni che corrispondono a fotoni nel visibile (o dintorni), cioè nel range dell'eV. La temperatura ambiente, invece, corrisponde a un'energia $k_B T \simeq 1/40$ eV, per cui a temperatura ambiente (ma anche a temperature superiori, purché tali da non distruggere la struttura del campione) sarà molto poco probabile avere elementi eccitati nel campione.

Si chiama *popolazione* il numero di elementi di un campione che si trova a un certo livello energetico. Spontaneamente un sistema evolve in modo che la sua popolazione sia quasi tutta allo stato fondamentale. Se si vuole invece che la maggior parte degli elementi del campione si trovi a livelli eccitati, come necessario per l'emissione stimolata, allora occorre realizzare condizioni dette di *inversione di popolazione*. I processi che conducono all'inversione di popolazione si chiamano processi di *pompaggio*.

A seconda della tipologia di laser sono stati messi a punto nel corso del tempo tanti metodi di pompaggio. I principali sono quelli che sfruttano della radiazione luminosa come pompa (pompaggio ottico), che per altro sono anche di gran lunga i più semplici da descrivere, e quelli in cui invece l'inversione di popolazione è realizzata grazie al passaggio di corrente, o alla formazione di scariche elettriche. Nel laser a diodo il pompaggio avviene elettricamente, in seguito all'iniezione di cariche elettriche attraverso la giunzione operata tramite opportuna polarizzazione della giunzione stessa. È ovvio che questo passaggio di corrente richiede della potenza, per cui, alla fine, le considerazioni di bilancio energetico sono ben soddisfatte (anzi, normalmente i laser sono macchine poco efficienti, nel senso che molta dell'energia fornita viene impiegata per fare altro rispetto alla produzione di luce laser). Per rimanere nell'ambito di oggetti piccoli e molto diffusi, il puntatore laser verde, quello che si usa nelle partite di calcio per accecare i portieri quando devono parare un rigore, è invece un sistema a pompaggio ottico, essendoci al suo interno un ulteriore laser, normalmente a diodo, che emette radiazione (nel vicino infrarosso) che serve a pompare otticamente uno specifico mezzo attivo.

IV. CAVITÀ OTTICA

Sulla base di quanto sopra descritto, si capisce come un mezzo attivo opportunamente pompato si possa comportare da amplificatore di radiazione, dato che al suo interno sono possibili, e anzi prevalenti, meccanismi elementari di emissione stimolata. Però, come già abbiamo affermato, un laser non è propriamente un amplificatore, ma piuttosto un oscillatore in grado di produrre radiazione coerente, e non solo di amplificarla. Nel passaggio da amplificatore a oscillatore ha un ruolo importantissimo la

cavità ottica all'interno della quale viene posto il mezzo attivo opportunamente pompato.

Cominciamo con il chiarire cosa intendiamo per cavità ottica facendo riferimento al sistema più semplice possibile: una cavità costituita da due specchi piani perfettamente riflettenti, posti parallelamente a una certa distanza d l'uno dall'altro, come in Fig. 4. Supponiamo che all'interno di questa cavità, che contiene il mezzo attivo *pompato*, sia presente della radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda λ , per esempio con vettore d'onda \vec{k} orientato lungo l'asse geometrico della cavità (asse Z) e diretto verso la destra di figura. La riflessione dallo specchio di destra provoca la sovrapposizione di due onde contropropaganti, ovviamente della stessa frequenza, che dà luogo a una sorta di interferenza. Si forma un'onda stazionaria che può essere descritta dalla funzione $\vec{E} = E_0 \sin(kz) \cos(\omega t) \hat{e}$, dove tutti i simboli dovrebbero avere significato ovvio e dove si è supposto di prendere lo zero dei tempi in modo da esprimere l'andamento temporale come indicato dall'espressione.

La presenza degli specchi impone delle specifiche condizioni al contorno sui campi, che devono essere nulli sulle superfici degli specchi stessi (e per continuità al loro interno). Supponendo che gli specchi si trovino nelle posizioni $z = 0$ e $z = d$, deve essere *in ogni istante* $\sin(kd) = 0$, ovvero $kd = (2\pi/\lambda)d = m\pi$, con m intero [1]: la cavità che stiamo considerando supporta dei modi stazionari di radiazione con lunghezza d'onda λ tale che $d = m\lambda/2$, con m intero.

È facile stabilire quanto vale la differenza *in frequenza* tra due modi (longitudinali) supportati, per esempio corrispondenti alle lunghezze d'onda λ_1 e λ_2 . Ponendo $\lambda_{1,2} = 2d/m_{1,2}$, con m_1 e m_2 interi consecutivi [tali, cioè, che $(m_2 - m_1) = 1$], si ha $\Delta\nu_{f_{sr}} = (c/n)/\lambda_1 - (c/n)/\lambda_2 = c/(2nd)$, con n stavolta indice di rifrazione del mezzo attivo (supposto riempire il volume della cavità). A questa separazione in frequenza si dà spesso il nome di *free spectral range*.

Immaginate ora di avere a un dato istante un fotone di energia tale che la lunghezza d'onda della radiazione corrispondente soddisfi la condizione appena detta. Supponiamo poi che il fotone si trovi nella cavità con quantità di moto diretta lungo l'asse della cavità stessa (asse Z): questo fotone potrà rimanere intrappolato nella cavità rimbalzando continuamente tra i due specchi. Nel suo rimbalzare, si troverà ad attraversare continuamente il mezzo attivo. Supponendo che questo sia pompato, il fotone potrà triggerare tanti eventi di emissione stimolata, producendo tantissimi fotoni tutti virtualmente uguali a lui, e dunque in grado a loro volta di triggerare ancora eventi di emissione stimolata. In altre parole, la presenza del fotone nella cavità dà luogo a una sorta di processo a "valanga", risultante, dopo pochi "rimbalzi" dei fotoni sugli specchi, in un'enorme amplificazione di radiazione.

Prima di procedere con le debite considerazioni, facciamo due osservazioni di dettaglio: (i) la cavità potrebbe anche essere realizzata con degli specchi dielettrici (le equazioni di Fresnel consentono di determinare la riflet-

tività all'interfaccia fra dielettrici di diverso indice di rifrazione, ovvero fra un dielettrico e il vuoto), portando a condizioni al contorno concettualmente diverse, ma con esiti del tutto simili a quanto affermato per gli specchi metallici; (ii) nel nostro approccio semplificato trascuriamo, almeno finché possibile, il comportamento della cavità in direzione trasversale.

A. Perdite e innesco

Nel modello che stiamo impiegando, avere una cavità con specchi completamente riflettenti implica che il fotone rimbalzi per un tempo *infinito* tra gli specchi. Se il fotone, o i fotoni, restano confinati indefinitamente nella cavità, non possiamo certamente realizzare un laser: questi fotoni, infatti, vogliamo ‘impiegarli’ nel fascio laser, e quindi essi devono in qualche misura uscire fuori dalla cavità.

Infatti, affinché possa essere usata in un laser, la cavità deve avere almeno uno specchio *semiriflettente*, da cui la luce possa uscire (si parla in gergo di *output coupler* proprio per indicare che da questo specchio esce la radiazione laser). L'uscita di una frazione dei fotoni significa che parte dell'energia immagazzinata nella cavità sotto forma di modi stazionari di radiazione viene persa nel tempo. Questo rappresenta un inevitabile meccanismo di *perdita* nell'operazione del sistema che stiamo considerando.

Esistono anche altri inevitabili meccanismi di perdita. Per esempio essi possono essere legati all'assorbimento residuo di radiazione da parte dei materiali (specchi, ma anche mezzo attivo), oppure alla presenza della *diffrazione* da parte degli specchi. Infatti essi avranno necessariamente una dimensione finita, e pertanto forniranno alla radiazione una componente non nulla di vettore d'onda in direzione trasversale. In altre parole, potrà verificarsi che alcuni fotoni acquistino quantità di moto in direzione trasversale: dopo aver rimbalzato un certo numero di volte sugli specchi, questi fotoni lasceranno la cavità. Per minimizzare l'effetto della diffrazione è possibile studiare configurazioni ottiche specifiche, per esempio quelle che fanno uso di specchi sferici.

Occupiamoci ora di capire come può essere innescata, cioè ‘iniziata’, l'emissione laser. Un mezzo attivo pompato ha livelli eccitati popolati. Può dunque esserci emissione spontanea in transizioni da questi livelli eccitati a livelli di energia più bassa. I fotoni prodotti per emissione spontanea possono avere qualsiasi direzione di propagazione, essendo il processo isotropo (nel nostro modello). Potrà sicuramente verificarsi che un fotone (idealmente ne basta uno, trascurando le perdite) sia emesso spontaneamente nella direzione dell'asse della cavità (asse Z). Questo solo fotone potrà, se non viene perso, dare origine all'amplificazione ‘a valanga’ che coinvolge l'emissione stimolata.

È evidente che il meccanismo di rimbalzo tra gli specchi creato dalla cavità è in grado, dopo l'innescò, di provvedere continuamente emissione, cioè di fare del laser un

oscillatore in grado di emettere in modo autonomo radiazione. La presenza di una cavità può essere vista come l'aggiunta di un meccanismo di feedback all'amplificatore: infatti la radiazione amplificata viene continuamente (a parte le perdite) re-iniettata nell'amplificatore stesso, portando a condizioni stazionarie di oscillazione. Come certamente ricorderete, abbiamo già accennato in tutt'altro contesto alla possibilità che un feedback applicato a un amplificatore conduca ad oscillazioni.

B. Curva di guadagno e soglia

Abbiamo già specificato che i processi di interazione radiazione materia che stiamo considerando sono *risonanti*, cioè l'energia dei fotoni deve essere pari alla differenza di energia dei livelli coinvolti. Inoltre, per quanto abbiamo affermato, anche la cavità produce una ‘selezione’ delle frequenze. Infatti i modi (longitudinali) che non sono supportati dalla cavità, cioè quelli che corrispondono a lunghezze d'onda diverse dalla condizione prima specificata (numero intero di semilunghezze d'onda pari alla distanza dagli specchi), vengono in qualche modo ‘persi’ dalla cavità. Queste due circostanze determinano la frequenza, o le frequenze, dell'emissione laser e il suo carattere monocromatico.

Limitiamo la nostra casistica a mezzi attivi pompati dotati di bande di energia (per esempio, mezzi attivi solidi), che sono quelli di interesse per il laser a diodo. Poiché i livelli energetici non sono discreti, le transizioni sono possibili per un intervallo di energie (la risonanza ‘si allarga’ [2]). Normalmente l'efficienza del processo di amplificazione per emissione stimolata, cioè il *guadagno* fornito dal mezzo attivo, non è uniforme all'interno di questo intervallo di energia, ma ha una forma a campana a cui si dà il nome di *curva di guadagno*. È possibile avere emissione laser quando la curva di guadagno assume valori superiori alle perdite, per esempio quelle dovute a uno dei motivi menzionati in precedenza. Questo determina una *soglia* nell'operazione del laser, che è possibile superare solo se l'inversione di popolazione, ottenuta tramite pompaggio, supera un certo valore critico (al di sotto di questo valore l'amplificazione non è abbastanza efficiente da superare le perdite).

In queste condizioni la frequenza di emissione laser viene determinata dal modo (longitudinale) di radiazione supportato dalla cavità. Poiché in genere il free spectral range della cavità, che abbiamo definito sopra, è piccolo rispetto alla larghezza della curva di guadagno, un singolo modo della cavità viene selezionato e l'emissione laser ha luogo alla frequenza corrispondente. La proprietà della cavità contribuiscono anche a definire il carattere monocromatico dell'emissione: una cavità ‘migliore’ dal punto di vista ottico (con meno perdite) fornisce in genere un'emissione più monocromatica. Spesso, però, si verifica che più modi della cavità siano coinvolti, in maniera generalmente instabile, nell'emissione laser, che quindi si dice ‘multimodo’. La Fig. 4(b) mostra un'illustrazione quali-

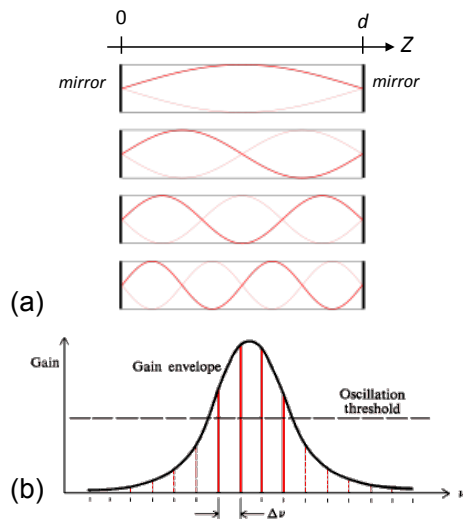


Figura 4. Schema della cavità a specchi piani paralleli (a) e illustrazione di curva di guadagno (gain envelope) e modi della cavità (b): $\Delta\nu$ rappresenta il free spectral range e, nella situazione descritta, sono presenti diversi modi per cui il guadagno supera le perdite (oscillation threshold), cioè l'emissione può virtualmente avvenire a diverse frequenze. Illustrazione tratta dal web.

tativa della curva di guadagno e dei modi della cavità in funzione della frequenza.

V. LASER A DIODO

I primi prototipi, o tentativi di prototipo, di laser a diodo sono coevi all'invenzione dei laser, ma solo negli ultimi decenni questi dispositivi hanno visto un incremento impressionante delle loro caratteristiche e delle possibilità di impiego in un numero crescente di applicazioni di ogni genere. La tecnologia produttiva e la scienza dei materiali hanno avuto un ruolo fondamentale in questi sviluppi (il Nobel Prize 2014 in Fisica è stato attribuito, tra gli altri, all'inventore dei materiali che consentono di produrre laser a diodo con emissione nel blu), rendendo i laser a diodo dispositivi piuttosto sofisticati e complessi.

Qui ci limitiamo a chiarire solo alcuni degli aspetti dell'operazione di un laser a diodo, fornendo, talvolta, informazioni che non corrispondono all'effettiva tecnologia (complicata) dei dispositivi reali.

Per rimanere nell'ambito della descrizione generale dei laser fatta in precedenza, cominciamo con il notare che:

- il mezzo attivo è costituito da una o più *giunzioni* tra materiali semiconduttori drogati;
- il pompaggio avviene tramite passaggio di corrente attraverso la giunzione *polarizzata direttamente*;
- la cavità ottica è "integrata" nel dispositivo, sfruttando in genere la (bassa) riflettività dell'interfaccia semiconduttore/aria ai bordi del dispositivo stesso.

A. Semiconduttori e leghe

Conosciamo già una descrizione qualitativa (classica) dei materiali semiconduttori, con specifico riferimento al Silicio. La descrizione "quantistica" dei semiconduttori, molto complicata da affrontare nei dettagli, non si discosta, in linea di principio, dalle semplicissime considerazioni a cui abbiamo accennato in precedenza in questa nota. I semiconduttori di cui ci occupiamo sono solidi, dunque i loro livelli di energia non sono discreti, ma rappresentati da bande. Gli elettroni che si trovano nella (o nelle) banda di energia più alta, cioè popolano questa (o queste) banda di energia, hanno la possibilità di muoversi all'interno del materiale: la banda di energia più alta si chiama *banda di conduzione*. Gli elettroni che invece si trovano a energia più bassa si dicono popolare la *banda di valenza* e non godono della proprietà di potersi muovere nel materiale.

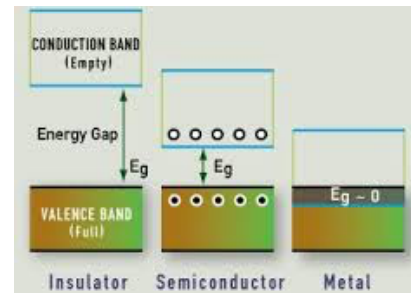


Figura 5. Rappresentazione pittorica delle bande di energia in materiali solidi con diverse proprietà di trasporto elettronico. Illustrazione tratta dal web.

Questa descrizione vale, sempre in linea di principio, per ogni materiale solido. La differenza tra conduttori, semiconduttori e isolanti è rappresentata dalla distanza in energia tra le bande. Come rappresentato in Fig. 5, nei conduttori le bande si sovrappongono, e dunque è sempre possibile avere elettroni in banda di conduzione (gli elettroni liberi). In isolanti e semiconduttori, invece, le bande sono separate da un *energy gap* E_g : negli isolanti il gap è grande (diversi eV) e quindi è molto improbabile, almeno a temperatura ambiente, trovare elettroni liberi. Nei semiconduttori, invece, il gap è sufficientemente piccolo (dell'ordine dell'eV) perché ci sia una probabilità non nulla di avere qualche elettrone in banda di conduzione già a temperatura ambiente. Questi elettroni sono proprio quelli che avevamo identificato come responsabili per la (debole) conducibilità dei semiconduttori intrinseci.

Nella nostra descrizione qualitativa dei semiconduttori avevamo anche identificato dei portatori di carica positiva, le *lacune*. Nella trattazione quantistica a cui stiamo accennando attribuiamo un'energia anche alle lacune e affermiamo, sulla base di ragionamenti qui non riportati, che esse si trovano nella banda di valenza. Infine, avevamo visto come fosse possibile modificare le proprietà di trasporto elettronico di un semiconduttore mediante drogaggio. Il drogaggio altera lo schema dei livelli di energia,

tuttavia tale modifica può essere considerata trascurabile per i nostri scopi. Quindi l'unica variazione di proprietà che riconosciamo al drogaggio consiste nel modificare la popolazione delle bande di energia: il drogaggio n aumenta la popolazione della banda di conduzione, il drogaggio p aumenta quella della banda di valenza.

A questo punto è necessaria una bella precisazione: per motivi molto importanti, che qui non esaminiamo, tra i materiali semiconduttori che si usano per realizzare diodi laser *non c'è il Silicio*. Infatti, nonostante il Silicio sia il paradigma del materiale semiconduttore e sia sicuramente l'ingrediente fondamentale per ogni diodo che non voglia essere un laser, esso non si presta ad essere impiegato in meccanismi di emissione di fotoni, almeno non nel senso convenzionale che è di nostro interesse. Diversi semiconduttori "artificiali", cioè realizzati tramite *leghe* di elementi (spesso appartenenti alle colonne III-V della tavola periodica), rimpiazzano il Silicio per le applicazioni fotoniche, per esempio la lega binaria GaAs (Arseniuro di Gallio) e la sua variante ternaria GaAlAs (Arseniuro di Gallio Alluminio). Nonostante le difficoltà che la fabbricazione di queste leghe comporta, difficoltà che lo sviluppo tecnologico ha comunque permesso di superare brillantemente, la necessità di impiegarle ha diversi risvolti positivi, per esempio quello di ottenere curve di guadagno piuttosto larghe (decine di nanometri, in termini di lunghezza d'onda) e collocate in posizioni spettrali diverse (dal blu/vicino-ultravioletto fino all'infrarosso, anche se con parecchi ed estesi "buchi" in cui non esistono laser a diodo) a seconda dei materiali usati e, in parte, della loro concentrazione nella lega.

B. Giunzione e ricombinazione radiativa

Una giunzione p-n (drogata) polarizzata direttamente sostiene il passaggio di corrente. Questa corrente è costituita da portatori primari (lacune e elettroni nelle regioni rispettivamente p e n). Al passaggio attraverso la giunzione si verificano dei processi di *ricombinazione* in seguito ai quali, per esempio, gli elettroni provenienti dalla regione n si "uniscono" alle lacune presenti nella *zona di svuotamento* (e viceversa le lacune provenienti dalle regioni p si "uniscono" agli elettroni).

La visione quantistica (molto) qualitativa del processo di ricombinazione elettrone-lacuna prevede che in esso l'elettrone passi dalla banda di conduzione a quella di valenza. Nella ricombinazione è quindi coinvolta una variazione di energia, che, nello specifico, deve essere rilasciata. È possibile che questo rilascio di energia avvenga con emissione di un fotone. Più in generale, e a livello decisamente qualitativo, possiamo identificare tra i fenomeni che coinvolgono elettroni e lacune tutti i tre processi (assorbimento, emissione spontanea, emissione stimolata) che abbiamo prima descritto per i sistemi a livelli discreti (atomi, per esempio). Il gioco è allora fatto e siamo in grado di ricondurre il funzionamento delle

giunzioni tra semiconduttori drogati a quanto descritto in precedenza.

C'è inoltre un altro aspetto estremamente rilevante: nelle condizioni che stiamo esaminando (polarizzazione diretta), gli elettroni sono continuamente spostati verso la giunzione dalla d.d.p. applicata tra anodo e catodo del diodo. Dunque essi possono entrare nella zona di svuotamento avendo una densità maggiore di quella delle lacune che vi si trovano. Di conseguenza si possono realizzare in maniera "automatica" le condizioni di inversione di popolazione necessarie per pompare il mezzo attivo, cioè la giunzione polarizzata direttamente si può comportare automaticamente come un mezzo attivo che ha un guadagno molto elevato.

A questo punto sarebbe necessario introdurre una lunga serie di precisazioni e di caveat, che, fortunatamente, vanno al di là degli scopi di questa nota. Qualcosa, però, va accennato:

- l'esito della ricombinazione può condurre alla produzione di fotoni solo se le funzioni d'onda di elettrone e lacuna si sovrappongono spazialmente. Questa affermazione, che abbiamo dato con il linguaggio della meccanica quantistica, si traduce in pratica nel requisito che elettroni e lacune si trovino "vicini" tra loro prima di ricombinarsi. In una giunzione ordinaria, fatta di un solo materiale, la condizione richiesta si realizza con poca probabilità. È possibile aumentare l'efficienza dei processi radiativi di ricombinazione (quelli che coinvolgono fotoni) creando delle giunzioni fra materiali diversi (dette *eterogiunzioni*, per esempio GaAs e GaAsAl), dove la configurazione dei livelli di energia "forza" elettroni e lacune a trovarsi assieme in una piccola regione di spazio a cavallo della giunzione. Storicamente, l'introduzione delle eterogiunzioni è stata un sostanziale passo in avanti per la realizzazione di dispositivi efficienti e durevoli.
- In determinate condizioni, in particolare quando la sovrapposizione spaziale delle funzioni d'onda di elettrone e lacuna è parecchio marcata, si può verificare la formazione di *eccitoni*, cioè sistemi artificiali legati costituiti da una lacuna e un elettrone, che si comportano in modo qualitativamente simile a protone e elettrone dell'atomo di idrogeno. L'emissione tra i livelli energetici (discreti) dell'eccitone può anche contribuire alla realizzazione di emissione laser.

C. Cavità, costruzione e principali caratteristiche

La produzione di luce da giunzioni di semiconduttori (in particolare GaAs e GaAsAl) polarizzate direttamente è sfruttata non soltanto nei laser, ma anche nei LEDs (Light Emitting Diodes). A grandi linee, la differenza principale tra un LED e un laser è nella presenza di una cavità, che consente nel laser di ottenere radiazione da

emissione stimolata. Esistono numerose configurazioni di cavità per laser a diodo, alcune anche molto tricky, ma la più diffusa è certamente quella che prevede che gli specchi di fine cavità siano realizzati dall'interfaccia tra semiconduttore e aria.

Per fare un esempio, il GaAs ha, nel rosso, un indice di rifrazione $n \sim 3.7$. La sua interfaccia con l'aria ($n = 1$) produce, a incidenza normale, una riflettività $R \sim 30\%$ (risultato che si trova agevolmente usando le equazioni di Fresnel). Si può intuire facilmente come una cavità così realizzata abbia notevoli perdite. Dal punto di vista del funzionamento, le grandi perdite non rappresentano un problema significativo, visto l'elevato guadagno del mezzo attivo. Tuttavia la scarsa qualità ottica della cavità influisce in vario modo sulle caratteristiche di emissione del laser a diodo.

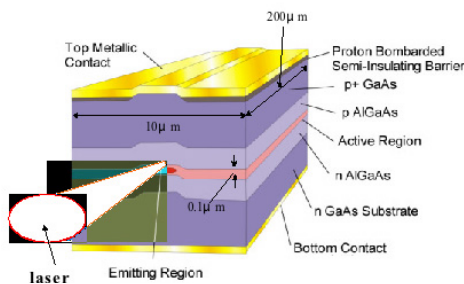


Figura 6. Schema costruttivo di un laser a diodo a eterogiunzione della tipologia gain guided. Illustrazione tratta dal web.

La Fig. 6 mostra lo schema realizzativo di un laser a diodo di una tipologia piuttosto comune. Esso si basa su una eterogiunzione GaAs/GaAsAl ed è realizzato nella configurazione cosiddetta *gain guided*, in cui l'iniezione di carica attraverso la giunzione avviene in una striscia di dimensioni limitate, definita dalle dimensioni degli elettrodi. Trascuriamo questi dettagli e notiamo qualche aspetto generale nella costruzione del laser a diodo che ha immediati risvolti nelle sue caratteristiche di funzionamento.

- La regione da cui provengono i fotoni ha dimensioni fortemente asimmetriche dovute al fatto che l'emissione avviene solo attraverso la giunzione, grosso modo all'interno della zona di svuotamento che, quando la giunzione è polarizzata direttamente, è spesso poche centinaia di nanometri. Nelle altre due direzioni, invece, le dimensioni sono molto maggiori (anche nel caso di laser gain guided, come in figura). Di conseguenza l'emissione è *asimmetrica e astigmatica*, dando luogo a un fascio non collimato e di forma apparentemente ellittica. Notate che l'asse maggiore dell'ellisse corrisponde alla direzione che attraversa la giunzione: infatti, a causa della diffrazione, la divergenza del fascio è maggiore per la direzione in cui la regione da cui provengono i fotoni è minore. Il forte astigmatismo è in contrasto con la visione (naïf) del laser come una sorgente ca-

pace di emettere fotoni tutti con la stessa direzione di propagazione.

- La polarizzazione del fascio laser è legata alla direzione in cui si muovono i portatori di carica. Essi attraversano la giunzione, e quindi la polarizzazione è diretta lungo l'asse maggiore dell'ellisse che descrive il fascio laser.
- La cavità del laser a diodo, oltre a essere di scarsa qualità ottica, è molto corta, tipicamente centinaia di micrometri. Di conseguenza il free spectral range è relativamente grande (decine di GHz). Per condizioni di operazione (corrente e temperatura) adeguate, il laser emette su un singolo modo (longitudinale) della cavità, con una larghezza di riga che può facilmente scendere sotto il MHz (emissione monocromatica). Tuttavia, a causa dell'elevata larghezza della curva di guadagno, è possibile che la lunghezza d'onda cambi, in maniera spesso instabile, da un modo all'altro della cavità.
- L'"efficienza" del laser a diodo è generalmente piuttosto bassa (tipicamente non più del 20-30% della corrente iniettata viene usata per la generazione di luce). Infatti normalmente si usano semiconduttori con drogaggio relativamente basso, quindi i materiali sono caratterizzati da una certa resistività che provoca dissipazione per effetto Joule.
- Di conseguenza, il dispositivo è soggetto a riscaldarsi. Notate che il riscaldamento provoca dilatazione termica della cavità, che comporta una variazione della lunghezza d'onda di emissione. Negli impieghi scientifici, occorre provvedere un sistema di termoregolazione in grado di garantire una stabilità di temperatura notevole (spesso sotto il centesimo di grado centigrado).
- Anche la variazione della corrente iniettata può produrre modifiche della lunghezza d'onda di emissione. Infatti, oltre ad agire indirettamente sulla temperatura, la densità di corrente attraverso la giunzione, che può arrivare a valori molto elevati viste le piccole dimensioni del dispositivo, influisce sull'indice di rifrazione effettivo.
- Naturalmente, affinché ci sia emissione laser, occorre che la corrente iniettata superi un certo valore di soglia. Infatti l'intensità di corrente controlla direttamente l'efficienza di pompaggio e, come in ogni laser, è necessario che il materiale sia pompato al punto che il guadagno superi le perdite (rilevanti, vista la scarsa efficienza della cavità) per avere emissione laser.

In definitiva, le caratteristiche tipiche di un laser a diodo sono poco in accordo con la visione ideale del laser come sorgente in grado di produrre radiazione coerente (per esempio, perfettamente collimata), anche se spesso

caratterizzata comunque da un buon grado di monocromaticità. Tuttavia, oltre a invadere il mercato consumer, negli ultimi decenni i laser a diodo hanno trovato un vastissimo impiego in numerosi esperimenti scientifici, soprattutto grazie alla loro diffusione, economicità, disponibilità in tante varianti.

VI. FOTODIODO

Avendo speso delle parole per descrivere (qualitativamente) il funzionamento del laser a diodo, sarebbe un peccato non servirsene per trattare il funzionamento del fotodiodo, che in un certo senso (molto qualitativamente) è il “negativo” del laser a diodo.

Il fotodiodo è un rivelatore di radiazione, cioè un sensore che fornisce un segnale idealmente proporzionale alla potenza della radiazione che vi incide. Se la radiazione viene descritta in termini di fotoni, allora la potenza rappresenta il numero di fotoni N per unità di tempo, ovvero il loro flusso. Infatti ogni fotone porta una certa energia, $E_{phot} = h\nu$, e il prodotto di questa energia per N fornisce la potenza della radiazione considerata. Tanto per fare un esempio, la potenza $P = 1$ mW di un fascio laser a lunghezza d’onda $\lambda \approx 650$ nm (il laser usato in laboratorio), a cui corrisponde un’energia $E_{phot} = 1240/660$ [eV] $\simeq 1.9$ eV $\simeq 3.0 \times 10^{-19}$ J, implica un flusso $N = P/E_{phot} \simeq 3.3 \times 10^{15}$ fotoni/s.

In termini generali, un fotodiodo è un ordinario diodo a giunzione p-n in cui la giunzione è esposta, protetta da una finestra trasparente, alla radiazione. A differenza del laser a diodo, in questo caso *si usa frequentemente il Silicio*, dunque si ha a che fare con qualcosa che costruttivamente è molto simile a un ordinario diodo a giunzione.

Esistono diverse possibilità di operazione per un fotodiodo, a seconda della polarizzazione della giunzione. Qui facciamo riferimento alla cosiddetta modalità *fotovoltaica*, in cui la giunzione è *non polarizzata*. Ricordando quanto affermato nella descrizione delle giunzioni tra semiconduttori drogati, sappiamo che in queste condizioni si forma una regione di svuotamento priva di cariche libere, in cui è presente un campo elettrico detto di *built-in*. Se in questa regione arriva un fotone può verificarsi un processo di *assorbimento*, in seguito al quale l’energia del fotone viene presa dal materiale e un elettrone viene promosso dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Contestualmente una lacuna si forma nella banda di valenza. A grandi linee, stiamo parlando di un processo che è opposto a quelli di emissione responsabili per la generazione di fotoni nel laser.

L’elettrone promosso alla banda di conduzione e la lacuna nella banda di valenza si trovano liberi di muoversi sotto l’effetto del campo di built-in. Essi possono quindi raggiungere catodo e anodo del dispositivo e essere raccolti dal circuito esterno di lettura (per esempio, un amperometro), producendo una corrente di intensità misurabile. Il processo è evidentemente lineare con il flusso

di fotoni, cioè con la potenza della radiazione. Quello descritto, in forma molto semplificata, è il meccanismo alla base del funzionamento del fotodiodo in modalità fotovoltaica. La conversione di “energia luminosa” in carica elettrica somiglia all’effetto fotoelettrico ben noto nella storia della fisica, ma rispetto a questo ha un’origine differente.

Qualche considerazione di contorno.

- Affinché l’assorbimento del fotone possa avvenire e dare luogo alla produzione della coppia elettrone-lacuna occorre che la sua energia sia maggiore dell’energia di gap E_g del semiconduttore. Nel caso del Silicio, è $E_g \sim 1.1$ eV, per cui è necessario che la radiazione abbia lunghezze d’onda $\lambda < E_g/h \simeq 1.1$ μm .
- Per motivi non semplici da illustrare, l’efficienza del processo dipende dall’energia del fotone: nel caso del Silicio, essa raggiunge il suo massimo per fotoni corrispondenti a lunghezze d’onda nel vicino infrarosso (circa 800 nm).
- In ogni caso, il processo di formazione della coppia elettrone-lacuna ha una certa probabilità di verificarsi. Poiché questo processo compete con altri (per esempio, la “ionizzazione” degli atomi di Silicio dovuti al fatto che il dispositivo si trova a temperatura diversa dallo zero assoluto) e poiché la carica elettrica portata da un singolo elettrone è difficilmente misurabile, il fotodiodo non è adatto per misure di potenze luminose molto deboli, corrispondenti a pochi fotoni al secondo, dove il segnale di corrente è nascosto dal rumore.
- Molto spesso, la costruzione di un fotodiodo presenta delle differenze rispetto a quelle di un diodo ordinario. In particolare, come anche si verifica nei dispositivi in uso in laboratorio (fotodiodi BPW-34), la giunzione pn è rimpiazzata da una giunzione *p-i-n*, in cui la “i” sta ad indicare un sottile (spessore tipico micrometrico) strato di Silicio “intrinseco”, cioè non drogato. Lo scopo principale di questa variante è aumentare lo spessore della giunzione, ovvero della regione di svuotamento nella quale può avvenire il processo di fotogenerazione delle coppie elettrone-lacuna. Questo provoca diverse conseguenze, tra le quali un aumento della “sensibilità” alla radiazione, dovuto all’aumento effettivo del volume della regione “attiva”.

In generale, la modalità fotovoltaica, pur essendo la più semplice tra quelle che possono essere realizzate, soffre di alcuni evidenti limiti. L’estrazione delle cariche dalla giunzione avviene solo per effetto del campo di built-in, poco intenso e poco controllato (la situazione è migliorata nei fotodiodi p-i-n). Inoltre le cariche uscenti dalla giunzione devono attraversare spessori consistenti di materiale semiconduttore prima di giungere a catodo e anodo del dispositivo, dove possono subire effetti dissipativi

dovuti alla resistenza dei materiali stessi. Per superare questi limiti la giunzione può essere polarizzata, sia direttamente che inversamente. In particolare, molto spesso i fotodiodi sono polarizzati inversamente: la polarizzazione inversa aumenta lo spessore della giunzione, consenten-

do una maggiore sensibilità e, soprattutto, un tempo di risposta più rapido. Infatti il tempo di risposta dipende dalla capacità della giunzione, che diminuisce quando lo spessore della giunzione aumenta.

[1] Osservate che la condizione di campo nullo sullo specchio in $z = 0$ è automaticamente soddisfatta dalla scelta della funzione seno per esprimere l'andamento spaziale dell'onda stazionaria. In termini più generali occorrerebbe scegliere una combinazione di seni e coseni, ovvero un seno (o coseno) con un termine di fase costante sommato a kz

nell'argomento.

[2] Per ragioni fondamentali e tecniche, la risonanza non è mai descrivibile con una "funzione delta" dell'energia, o frequenza, ma ci sono sempre processi di allargamento. Però la "larghezza di riga" è sicuramente maggiore per mezzi attivi solidi rispetto a vapori atomici.