

Luigi Ciavarella

Classe 5° Sez. A Spec. Elettronica e Telecomunicazioni

I. T. I. - Leonardo da Vinci - Foggia

A. S. 2004 / 2005

**STORIA, SCIENZA E APPLICAZIONI
DELLA TEORIA QUANTISTICA
DELLA RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA**

Foggia, 21/06/2005

INDICE

INDICE	2
PREFAZIONE	4
INTRODUZIONE	5
LA SPIEGAZIONE DELL’EFFETTO FOTOELETTRICO	6
LE PRIME OSSERVAZIONI SULL’EFFETTO FOTOELETTRICO	6
Le osservazioni di Hertz.....	6
Le esperienze di Hallwachs.....	6
I contributi di Righi, Stoletov, Elster e Geitel.....	7
L’esperienza di Lenard.....	7
IL CORPO NERO E L’IPOTESI DI PLANCK	9
L’IPOTESI DI EINSTEIN: IL QUANTO DI LUCE	12
Il lavoro di Einstein	12
Il dibattito sull’ipotesi di Einstein	14
Conferme sperimentali dell’ipotesi di Einstein.....	15
Lewis conia il termine fotone.....	18
CONCLUSIONI	18
TECNOLOGIE CHE SI BASANO SULLA TEORIA QUANTISTICA DELLA LUCE	19
ELEMENTI DELLA FISICA DEI SEMICONDUTTORI	19
GIUNZIONE P-N	19
I semiconduttori.....	19
Il drogaggio dei semiconduttori	20
La giunzione P-N:	21
Polarizzazione della giunzione P-N	21
DISPOSITIVI FOTOSENSIBILI	22
Dispositivi che sfruttano l’effetto fotoemittente	23
Fotocelle	23
Fotomoltiplicatori.....	24
Intensificatori di immagine	24
Dispositivi che sfruttano l’effetto fotoconduttivo	24
Dispositivi che sfruttano l’effetto fotoelettrico di giunzione	25
Fotodiodi e celle fotovoltaiche.....	26
Fototransistor.....	28
DISPOSITIVI FOTOEMITTENTI	29
Interazione radiazione-materia.....	29
I diodi LED.....	31
Dispositivi LASER.....	34

ACCOPIATORI OTTICI	36
Optoisolatori.....	37
Accoppiamento ottico in aria	38
APPLICAZIONI DEI DISPOSITIVI DI OPTOELETTRONICA	39
FIBRE OTTICHE	39
Propagazione della luce nelle fibre ottiche	40
Dispersione nelle fibre ottiche	42
Attenuazione nelle fibre ottiche	43
Vantaggi e svantaggi delle fibre ottiche.....	43
MEMORIZZAZIONE OTTICA	44
Lettura	44
Scrittura	45
Cancellazione	45
<i>Standard CD e DVD</i>	46
BIBLIOGRAFIA	48

PREFAZIONE

Questo lavoro illustra il percorso che ha portato dall'osservazione di un fenomeno fisico alla sua spiegazione, e le relative ricadute tecnologiche.

Il fenomeno in questione è l'effetto fotoelettrico, il quale è stato il principale, ma non unico, protagonista delle ricerche che portarono al modello corpuscolare della luce, e, da qui, alla doppia natura della radiazione stessa.

Nella prima parte si descrive la storia che ha portato alla spiegazione dell'effetto fotoelettrico. Questa parte è stata estrapolata da un lavoro che ho redatto per un convegno in occasione del WYP2005, al quale ho partecipato come relatore, riguardo alla spiegazione dell'effetto fotoelettrico. In quella occasione decisi di non utilizzare le derivate parziali, per definire la distribuzione spettrale dell'intensità d'irraggiamento. Ciò spiega come mai l'abbia definita in un modo piuttosto insolito, ma forse più accessibile e intuitivo.

Nella seconda parte viene descritto come le tecnologie dell'informazione abbiano sfruttato la moderna teoria della radiazione, con particolare riguardo al suo aspetto corpuscolare.

Nella terza vi sono esempi di applicazioni che sfruttano le tecnologie suddette.

Chiaramente un unico elaborato non può essere in grado di descrivere in dettaglio i vasti e articolati argomenti, che, qui, verranno solo illustrati nei tratti fondamentali e di nostro interesse.

INTRODUZIONE

Il 2005 è stato designato dall'Unesco come “*Anno internazionale della fisica*” in omaggio al centenario dall'*Annus Mirabilis* di *Albert Einstein*. Il 2005 cade, tra l'altro, a cinquanta anni dalla sua morte.

Nel 1905 Einstein elaborò ben cinque scritti destinati ad incidere profondamente sull'edificio della fisica:

1. *Una nuova determinazione delle dimensioni molecolari*
2. *Sul moto di piccole particelle in sospensione nei liquidi a riposo come prescritto dalla teoria cinetico-molecolare del calore*
3. *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*
4. *L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?*
5. *Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e trasformazione della luce*

Il nostro elaborato si occupa delle applicazioni tecnologiche dei contributi di Einstein nel 1905.

Ci occuperemo, quindi, solo della spiegazione dell'effetto fotoelettrico, l'unica ad avere propriamente delle implicazioni tecnologiche; in quanto la prima opera dà una “solo” una conferma della teoria atomica; mentre la seconda non è una teoria che si occupa di particolari fenomeni fisici, ma più che altro descrive le proprietà del “contenitore” in cui essi avvengono.

All'inizio del XX secolo nessuno si sarebbe mai aspettato una rivoluzione del genere, infatti la meccanica newtoniana era un successo oltremodo consolidato, la termodinamica aveva permesso di spiegare tutti i fenomeni termici e la teoria elettromagnetica di Maxwell era in grado non soltanto di descrivere i fenomeni elettrici, ma aveva risolto il problema della natura della luce, riconducendo tutti i fenomeni ottici a fenomeni elettromagnetici.

C'erano però alcune difficoltà: oltre ad alcuni fenomeni non ancora chiariti, vi era difficoltà a conciliare la prima teoria con l'ultima (nella quale vi erano forze dipendenti dalla velocità), ma entrambe erano ampiamente suffragate dall'esperienza.

Probabilmente l'unico pilastro veramente solido della fisica era la termodinamica classica, fondata su principi la cui violazione provocherebbe conseguenze pratiche di gigantesca portata. Vedremo infatti che Plank ed Einstein si affidarono ad essa per superare gli ostacoli più duri.

LA SPIEGAZIONE DELL'EFFETTO FOTOELETTRICO

LE PRIME OSSERVAZIONI SULL'EFFETTO FOTOELETTRICO

Le osservazioni di Hertz

Nel 1887 *Heinrich Hertz* portò a termine degli esperimenti che posero le basi sperimentali per la teoria elettromagnetica di Maxwell.

Fondamentalmente tramite un trasmettitore ed un ricevitore costituiti da bobine, verificò sperimentalmente l'esistenza di onde elettromagnetiche, che si propagavano secondo le previsioni della teoria di Maxwell.

Nello stesso esperimento, però Hertz si trovò di fronte ad un fenomeno del tutto nuovo, che in seguito sarà chiamato *effetto fotoelettrico*. Oggi sappiamo che esso consiste nell'emissione di elettroni da parte di una superficie investita da un'onda elettromagnetica.

Per osservare la sottile scintilla prodotta nella spira ricevente, rinchiuso il ricevitore in una scatola. Osservò che la lunghezza massima della scintilla diminuiva rispetto a prima. Si rese, poi, conto che:

- questo effetto era dovuto solamente alla parete della scatola interposta tra trasmettitore e ricevitore e dipendeva dal materiale interposto;
- le scintille delle due bobine si rafforzavano quando una illuminava l'altra o quando erano illuminate da luce proveniente dalla combustione del magnesio;
- la lunghezza d'onda che produceva la scintilla più intensa era nella regione dell'ultravioletto.

Hertz si limitò a comunicare i suoi risultati, senza fornire alcuna spiegazione teorica, nell'articolo *Gli effetti della luce ultravioletta in una scarica elettrica*.

Inconsapevolmente, quindi, Hertz condusse degli esperimenti che verificavano la teoria di Maxwell, ma che allo stesso tempo mostravano un fenomeno che l'avrebbe messa in crisi.

Le esperienze di Hallwachs

Nel 1888 *Wilhelm Hallwachs* tentò di riprodurre i fenomeni osservati da Hertz sotto condizioni più semplici, in modo da ottenere risultati più facilmente interpretabili.

Egli montò un disco di zinco collegato ad un elettroscopio, esposto alla luce ultravioletta:

- se il disco era carico negativamente si osservava una rapida scarica;

- se il disco era caricato positivamente *non* si osservava alcuna scarica rapida. In un altro esperimento mostrò, invece, che una lastra isolata e neutra, se illuminata, acquistava un piccolo potenziale positivo (*effetto Hallwachs*).

I contributi di Righi, Stoletov, Elster e Geitel

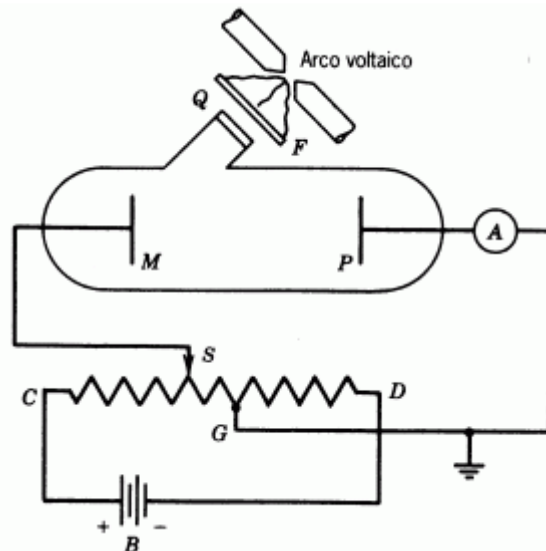
- 1888: **Augusto Righi** osservò che quando due elettrodi erano sottoposti a luce ultravioletta si comportavano come un arco voltaico. A questo fenomeno egli dette il nome di *effetto fotoelettrico*.
- 1889: **Aleksandr Stoletov** riuscì a produrre corrente elettrica continua tramite l'effetto fotoelettrico e riscontrò che l'intensità di corrente era proporzionale all'intensità della luce incidente. Inoltre, analizzando la relazione tra corrente prodotta e differenza di potenziale applicata scoprì l'esistenza di una corrente di saturazione.
- 1889-1892: **Elster e Geitel** trovarono una stretta relazione tra potenziali di contatto nei metalli e l'effetto fotoelettrico: più il metallo è elettropositivo, minore è la frequenza alla quale avviene l'effetto fotoelettrico. Inoltre, nello stesso esperimento, verificarono che la carica trasportata era di segno negativo e che le molecole dei gas presenti nell'ambiente non potevano essere responsabili del trasporto.

L'esperimento di Lenard

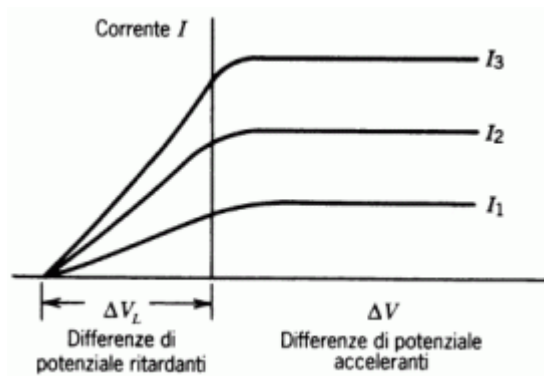
La scoperta dell'elettrone ad opera di Thomson nel 1895 suggerì l'ipotesi che le cariche negative emesse per effetto fotoelettrico fossero elettroni liberi del metallo.

Nel 1899 **Philipp Lenard** verificò questa ipotesi, mostrando che le cariche emesse da un metallo irradiato avevano un rapporto q/m in accordo con le misure di Thomson per l'elettrone.

Successivamente, nel 1902, Lenard eseguì un esperimento per studiare più accuratamente le caratteristiche dell'effetto fotoelettrico. L'apparato sperimentale è quello mostrato in figura:



Variando la d.d.p. tra anodo e catodo ottenne le seguenti caratteristiche (le diverse curve si riferiscono a differenti intensità di luce UV):



Da questo esperimento evinse, quindi, che:

- La corrente massima di saturazione era direttamente proporzionale all'intensità della luce emessa;
- Sorprendentemente anche luce d'intensità estremamente bassa è in grado di produrre l'effetto fotoelettrico, senza il minimo segnale di un livello di soglia;
- Tuttavia l'effetto fotoelettrico avveniva solo se la frequenza della luce era maggiore di una data frequenza di soglia caratteristica del metallo utilizzato
- La corrente non si riduce immediatamente a zero se si inverte la tensione applicata, ciò suggerisce che gli elettroni escano dal metallo con una certa energia cinetica (K). Per un certo potenziale, detto potenziale d'arresto (V_A), la corrente si annulla (anche l'elettrone più veloce viene fermato). Questo, e quindi anche l'energia cinetica degli elettroni, non dipende dall'intensità d'irradiazione.

È immediata la relazione:

$$K_{MAX} = e \cdot V_A$$

- Il valore dell'energia cinetica degli elettroni dipendeva solo dalla frequenza della luce incidente.

Difficoltà nella spiegazione dei risultati

I risultati sperimentali di Lenard non si riescono a spiegare con l'elettromagnetismo classico:

- Dato che l'energia totale fornita dall'onda è data da:

$$E_{tot} = E_{onda} \cdot S \cdot \Delta t$$

All'aumentare di S (superficie investita) o di Δt (intervallo di tempo) sarebbe dovuta aumentare l'energia fornita, perciò l'emissione di elettroni sarebbe dovuta avvenire, prima o poi, per qualunque frequenza. Ma ciò non accade.

- Secondo la teoria di Maxwell le onde elettromagnetiche avrebbero dovuto porre in oscillazione gli elettroni. Quindi, questi, al variare dell'irradiazione, sarebbero dovuti fuoriuscire con energia cinetica massima diversa. Ma ciò non avviene.
- Inoltre non si riscontra l'apprezzabile ritardo tra irradiazione ed emissione previsto dalla teoria classica, poiché l'effetto si manifesta dopo un tempo dell'ordine dei nanosecondi.

Nel 1902 era chiaro che qualcosa doveva essere cambiato nel modello della luce.

IL CORPO NERO E L'IPOTESI DI PLANCK

Il *corpo nero* è un oggetto capace di assorbire ed emettere radiazione di qualsiasi frequenza. Esso è quindi il sistema ideale e più semplice da studiare nelle questioni riguardanti l'emissione o l'assorbimento di radiazione.

La potenza emessa per unità di superficie (*radianza*) è distribuita per le varie lunghezze d'onda, infatti si può esprimere come:

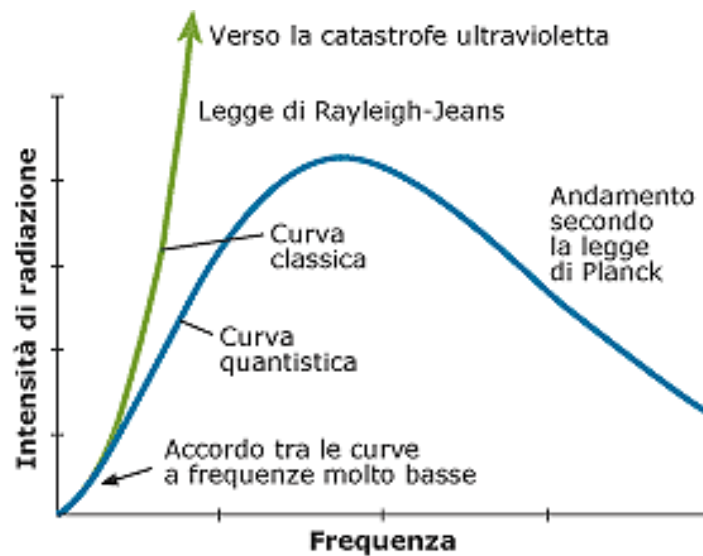
$$R(T) = \int_0^{+\infty} R_\lambda(\lambda, T) d\lambda$$

dove $R_\lambda d\lambda$ rappresenta la radianza nell'intervallo tra λ e $\lambda+d\lambda$ e cioè la funzione $R_\lambda(\lambda, T)$ è la *distribuzione spettrale dell'intensità d'irraggiamento*.

Durante la seconda metà del XIX secolo molti studiosi erano intenti nel ricavare le curve della distribuzione di radiazione per via teorica. Questo calcolo non presentava alcuna difficoltà né concettuale né matematica, infatti, secondo la fisica classica, era possibile

considerare un sistema in cui gli atomi si comportassero come oscillatori che assorbivano ed emettevano radiazione.

Tale calcolo, però, conduceva a conseguenze inaccettabili, infatti, secondo la previsione classica, all'aumentare della frequenza l'energia emessa dal corpo sarebbe aumentata indefinitamente (*catastrofe ultravioletta*), e ciò era in netto contrasto con i risultati sperimentali.



La spiegazione di questa discrepanza impegnò i fisici prima dell'inizio del nuovo secolo. Una teoria formulata da **Wien**, ottenuta tramite considerazioni di termodinamica, portava ad una relazione del tipo:

$$R_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}}}$$

Dove c_1 e c_2 sono costanti da determinarsi sperimentalmente.

Questa relazione, però, era un'interpolazione ottimale solo per il vicino infrarosso, $\lambda=1-8 \mu\text{m}$ (esperimento di *Paschen*), ma per regioni spettrali ancor più spinte nell'infrarosso l'accordo non era più soddisfacente (esperimenti di *Lummer-Pringshein* e *Rubens-Kurlbaum*). La legge esponenziale di Wien non era l'espressione matematica della funzione di Kirchhoff per l'energia scambiata sottoforma di radiazioni.

Max Planck, che aveva lavorato a lungo al problema, si accorse che tramite una semplice modifica essa avrebbe rappresentato meglio la curva empirica. La formula presentata alla Società di Fisica di Berlino il 19 Ottobre 1900 è:

$$R_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

Tale formula, benché importante e probabilmente corretta, era empirica e non dava nessuna interpretazione del fenomeno.

Planck osservò, allora, che la radiazione del corpo nero non era influenzata dalla costituzione delle pareti, ma solo dalla temperatura, per cui poteva essere trattato come se fosse costituito da oscillatori hertziani. Così, attraverso considerazioni di carattere elettromagnetico, di termodinamica classica e di termodinamica statistica ipotizzò che un oscillatore non potesse avere energia qualunque, ma solo multipli interi di una quantità hf , come indica la formula

$$E = n \cdot h \cdot f$$

Dove n è un intero positivo, ottenendo per via teorica la formula precedente e determinando le costanti c_1 e c_2 :

$$R_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T}} - 1}$$

Lui stesso chiamò questi “pacchetti di energia” *quanti del campo elettromagnetico*.

Non posso dilungarmi oltre sulla linea di ragionamento che seguì Planck, ma penso sia importante sottolineare come Planck utilizzò (in modo inconsueto) la formula di Boltzmann, considerando, nel calcolo, elementi indistinguibili (pacchetti di energia) invece che elementi distinguibili (come Boltzmann considerava le molecole di un gas). In effetti, questo nuovo metodo di conteggio prefigura la statistica di Bose-Einstein.

Questa conclusione, non convinse Planck, che considerava i quanti come un artificio di calcolo e cercò invano un'altra spiegazione. Solo in seguito la accettò. Quando nel 1931 il fisico R. W. Wood gli chiese come aveva fatto ad inventare una cosa così inaudita come la teoria dei quanti egli rispose: *“Fu un atto di disperazione. Avevo già lottato per sei anni con il problema del corpo nero. Sapevo che il problema era fondamentale e ne conoscevo la legge, una spiegazione teorica doveva trovarsi a qualunque costo, salvo l'inviolabilità delle due leggi della termodinamica”*.

L'IPOTESI DI EINSTEIN: IL QUANTO DI LUCE

Nel 1905 il giovane impiegato dell'ufficio brevetti **Albert Einstein** pubblicò sugli *Annalen der Physik* un articolo intitolato “***Su un punto di vista euristico relativo alla produzione e trasformazione della luce***”, nel quale propose che la luce doveva essere considerata come composta da un insieme di particelle indipendenti di energia (*quanti di luce*), che si comportano come particelle di un gas.

Questo lavoro non fu, come molti credono, scritto con la necessità di spiegare l'effetto fotoelettrico, bensì Einstein cercava una risposta al problema della radiazione del corpo nero. È solo per giustificare la sua teoria, che applica il modello dei quanti di luce all'effetto fotoelettrico, alla fotoluminescenza e alla fotoionizzazione.

Questo è l'unico articolo che Einstein giudicò veramente rivoluzionario ed è sorprendente come una commissione decisamente conservatrice gli assegnò il premio Nobel, nel 1921, con specifico riferimento a questo lavoro. Forse, però, le teorie della relatività ristretta e generale erano ancora troppo scomode e non sufficientemente supportate dall'esperienza.

Il lavoro di Einstein

Nell'**introduzione** della pubblicazione emerge subito il desiderio di Einstein di spiegare la Natura con il minor numero possibile di principi nel quadro di una teoria che comprenda ed unifichi tutti i fenomeni.

Egli pone l'accento sull'asimmetria tra la natura discreta della materia (composta da atomi) ed il modello continuo di Maxwell (il campo elettromagnetico è distribuito in modo continuo nello spazio).

Nel primo paragrafo (**Su una difficoltà relativa alla teoria della “radiazione del corpo nero”**), Einstein, dimostra che combinando le previsioni della teoria cinetica dei gas e dell'elettromagnetismo classico si giungeva al risultato inaccettabile della catastrofe ultravioletta e sottolinea come sia in contrasto con l'esperienza.

Nel paragrafo successivo, intitolato **Sulla determinazione dei quanti elementari ad opera di Planck**, evidenzia che “...*la determinazione dei quanti elementari fornita da Planck è, in una certa misura, indipendente dalla sua teoria sulla radiazione del corpo nero*”. Inoltre dimostra che la formula di Planck, per piccole frequenze, approssima la previsione classica. Conclude, infine, dicendo che studierà la radiazione del corpo nero senza presupporre alcun modello per l'emissione e l'assorbimento.

Poi, in base a considerazioni termodinamiche, Einstein, conclude, nel quarto paragrafo, che da un punto di vista termodinamico, una radiazione monocromatica di densità sufficientemente bassa si comporta come un gas ideale.

Nei paragrafi successivi, partendo da questo risultato ed utilizzando la relazione di Boltzmann sull'entropia giunge alla deduzione, suggerita dal confronto tra il comportamento della radiazione ed un sistema di corpi in movimento, che *“una radiazione monocromatica (di densità sufficientemente piccola) si comporta, riguardo alla dipendenza della sua entropia dal volume, come se fosse un mezzo discontinuo consistente in quanti di energia di grandezza $R\beta f/N$ ”*. Poi conclude dicendo: *“...allora appare sensato chiedersi se anche le leggi che governano l'emissione e la trasformazione della luce sia costruite come se la luce consistesse in quanti di energia di questo tipo”*.

È facile mostrare che la costante $R\beta/N$ corrisponde alla costante di Planck h , e così d'ora in avanti la indicheremo per comodità.

La proposta di Einstein ingloba quella di Planck, ma è stata ottenuta per una via indipendente. Solo nel 1906 egli si rese conto che *“la teoria di Planck fa uso implicitamente della (...) ipotesi di quanto di luce”*.

Nel seguito del lavoro Einstein applica questa conclusione rivoluzionaria alla spiegazione della fotoluminescenza, dell'effetto fotoelettrico e della ionizzazione dei gas. Noi, qui, ora, ci occuperemo solo del secondo.

Possiamo spiegare facilmente l'effetto fotoelettrico ammettendo che si abbia sempre e solo l'interazione tra un singolo fotone ed un solo elettrone. Questi assorbe energia dal fotone incidente, che, se è maggiore del lavoro di estrazione, permette l'espulsione dell'elettrone dal metallo.

Ciò comporta che la radiazione incidente debba avere frequenza minima pari a:

$$f_{\min} = \frac{W_e}{h}$$

Inoltre, ovviamente, l'energia cinetica massima con la quale escono gli elettroni dipende solo dall'energia (e quindi dalla frequenza) dei singoli fotoni e non dal loro numero. Essa vale:

$$K_{\max} = h \cdot f - W_e$$

Infine ci si può spiegare l'assenza del ritardo previsto da Maxwell, in quanto gli elettroni non acquistano gradualmente l'energia d'oscillazione, ma le interazioni avvengono in modo immediato.

Come abbiamo visto Einstein non trattò il problema del corpo nero basandosi su una descrizione dell'emissione e della propagazione della radiazione, ma scelse un approccio

fenomenologico al problema. La sua bravura consistette nel saper scegliere i dati sperimentali giusti e gli appropriati ingredienti teorici.

Dobbiamo precisare, che, in realtà, non fu subito chiara l'idea di fotone come lo conosciamo oggi, solo altri studi avrebbero potuto portare ad una identificazione più chiara del quanto di campo elettromagnetico.

Le riflessioni più importanti che Einstein mosse in questa direzione furono quelle che lo portarono alla conclusione che questi “pacchetti di energia” possedessero anche quantità di moto. Giunse a questa conclusione tramite l'analisi delle fluttuazioni statistiche della radiazione del corpo nero. Egli determinò la probabilità di transizione tra due stati stazionari di una molecola in tre casi: nel caso di emissione spontanea (una molecola passa da uno stato stazionario di energia ad un altro con energia minore); nel caso di assorbimento indotto (una molecola, avendo assorbito una radiazione di una certa frequenza, passa ad uno stato stazionario di energia maggiore); nel caso di emissione stimolata (la molecola avendo assorbito una radiazione di una certa frequenza passa da uno stato stazionario di energia ad uno con energia minore).

In questo lavoro, e siamo nel 1916, giunse alla conclusione che i quanti di luce possedessero una quantità di moto di modulo pari a $p = h \cdot \frac{f}{c}$, pertanto essi avevano proprietà direzionali come le altre particelle.

Tuttavia non erano ancora possibili verifiche sperimentali, in quanto i fotoni alle frequenze della luce visibile trasferivano quantità di moto troppo piccole, e a quel tempo non erano possibili verifiche sperimentali tramite osservazioni spettroscopiche.

Il dibattito sull'ipotesi di Einstein

Negli anni successivi alla pubblicazione delle idee di Einstein, tra i fisici si accese un fervente dibattito sulle implicazioni dell'ipotesi dei quanti.

Sebbene i fisici interessati non assunsero posizioni ben definite se ne possono individuare tre:

- La posizione di chi, come ad esempio Lorentz, rigettava totalmente questa idea;
- Quella di chi, come Planck, accettava l'ipotesi dei quanti, ma non credeva che ciò comportasse necessariamente una rottura con la teoria classica;
- La posizione di chi, come Einstein, pensava che il concetto di quanto fosse una importante novità in fisica, della quale era necessario investigare le implicazioni.

L'eccezionale resistenza ebbe le proprie radici nel paradosso onda-particella. Tra l'altro queste idee sovvertivano la parte della teoria di Maxwell che si riteneva meglio compresa,

cioè quella del campo libero. Inoltre il sostegno degli esperimenti tardava a venire e le basi sperimentali dei primi anni non erano considerate prove univoche. C'è da aggiungere che lo stesso Einstein sottolineava che il concetto di quanto di luce potesse avere carattere provvisorio, ma la sua cautela fu scambiata per esitazione e ciò rafforzò ulteriormente le riserve degli altri fisici.

L'accettazione della terza posizione si concretizzò principalmente durante il I congresso di Solvay a Bruxelles dove i più autorevoli fisici del tempo discussero sul tema *La Teoria della Radiazione e i Quanti*.

Conferme sperimentali dell'ipotesi di Einstein

Negli anni successivi il 1905 diversi furono gli studi che portarono conferme alla teoria dei quanti di luce. Qui presentiamo i due più importanti, quello di Millikan e quello di Compton, che contribuirono in maggior misura a convincere la comunità dei fisici della validità di questa teoria.

Le misurazioni di Millikan

Tra il 1914 ed il 1916 **Robert Millikan** portò a termine delle precise misurazioni atte a verificare l'equazione fotoelettrica di Einstein, cioè:

$$e \cdot V_A = h \cdot f - W_e \quad \text{ossia} \quad V_A = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{W_e}{e} .$$

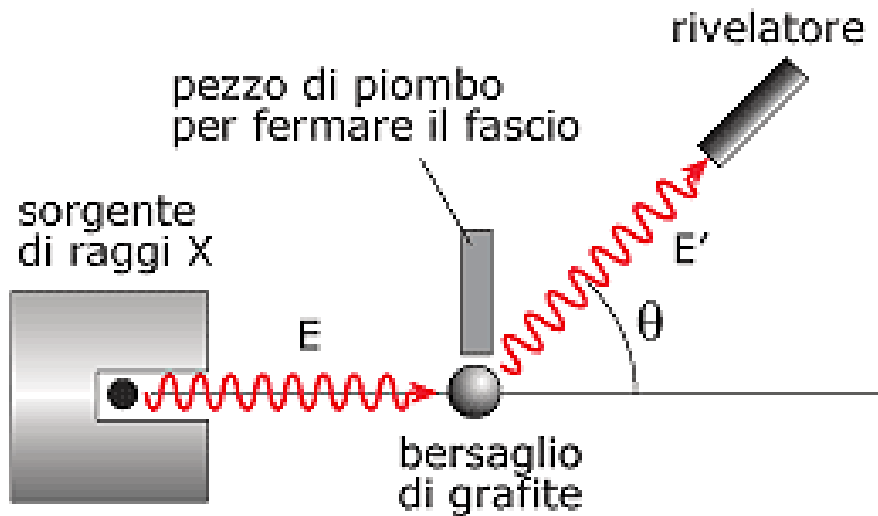
Egli rappresentò graficamente il potenziale d'arresto in funzione della frequenza della radiazione, verificando che il grafico era una retta, la cui pendenza h/e portava ad un valore di $h=6,57 \cdot 10^{-34}$ J*s in linea con le previsioni.

Nonostante questo risultato persistette un atteggiamento di scetticismo, dovuto soprattutto all'incapacità della teoria di spiegare i fenomeni d'interferenza e diffrazione, infatti, Millikan, commentò così i suoi risultati: *"Passai dieci anni della mia vita a sottoporre a controlli quell'equazione di Einstein del 1905; contrariamente ad ogni mia aspettativa, fui costretto nel 1915 ad ammettere che era verificata con certezza, nonostante sembrasse assurda poiché contraddiceva tutto ciò che si sapeva sull'interferenza della luce."*

La scoperta dell'effetto Compton

Durante il periodo compreso tra il 1920 ed il 1923 **Arthur Holly Compton** condusse delle ricerche sull'interazione delle radiazioni con la materia, convinto della correttezza della teoria elettromagnetica di Maxwell. In seguito, però, ai risultati ottenuti nell'esperimento condotto nel 1922 sulla diffusione dei raggi X da parte degli elettroni, egli dovette cambiare idea.

L'apparato sperimentale utilizzato da Compton è il seguente:

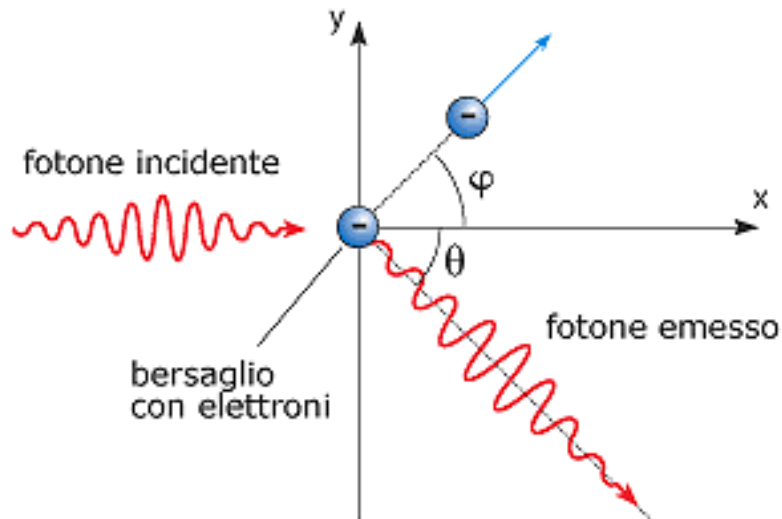


Osservò che la lunghezza d'onda λ_d della radiazione diffusa è in generale diversa da quella λ della radiazione incidente e la differenza dipende dall'angolo di diffusione e vale precisamente:

$$\lambda_d - \lambda = \frac{h}{m \cdot c} \cdot (1 - \cos \theta)$$

Questo risultato era inspiegabile con la teoria dell'elettromagnetismo classico, secondo cui gli elettroni liberi della grafite avrebbero dovuto riemettere l'onda in tutte le direzioni e con la stessa frequenza.

I risultati furono spiegati da Compton tramite uno schema tipo il seguente:



Secondo il principio di conservazione dell'energia (relativistica) la somma delle quantità di energia dell'elettrone e del fotone prima e dopo l'urto sono uguali, cioè

$$m \cdot c^2 + \frac{h \cdot c}{\lambda} = \gamma \cdot m \cdot c^2 + \frac{h \cdot c}{\lambda_d}$$

Dove m è la massa a riposo dell'elettrone e γ è il fattore di dilatazione.

Sappiamo, poi, che anche per il vettore quantità di moto vale la legge di conservazione. Imponiamo, allora, che sia la componente orizzontale, che la componente verticale della somma delle quantità di moto delle due particelle resta invariata dopo l'urto:

$$\frac{h}{\lambda} = \gamma \cdot m \cdot v \cdot \cos \varphi + \frac{h}{\lambda_d} \cdot \cos \theta \quad (\text{componente orizzontale})$$

$$0 = \frac{h}{\lambda_d} \cdot \sin \theta + \gamma \cdot m \cdot v \cdot \sin \varphi \quad (\text{componente verticale})$$

Combinando le tre equazioni che abbiamo scritto e risolvendo il sistema, Compton giunse alla relazione sperimentale.

Ormai le perplessità sulla teoria corpuscolare della luce erano dissipate.

Inoltre la teoria di Einstein era in grado di chiarire alcuni fenomeni prima inspiegati, come alcune eccezioni nella *regola di Dulong e Petit sui calori specifici dei solidi* o lo studio delle *fluttuazioni di energia della radiazione del corpo nero*.

È nella presentazione dei risultati di quest'ultima ricerca (1909), che Einstein sottolineò la necessità che si dovessero accettare entrambe le teorie, quella ondulatoria e quella corpuscolare. Egli presentò il problema dell'asimmetria tra emissione ed assorbimento nella teoria ondulatoria; infatti, se nell'emissione l'onda elettromagnetica si espandeva in tutte le direzioni, si sarebbe dovuta osservare una contrazione nell'assorbimento, fenomeno che le equazioni di Maxwell non escludevano, ma che non si era mai osservato.

Lewis conia il termine fotone

Nel 1926 *Lewis* propone per il quanto introdotto da Einstein il termine *fotone*.

Oggi il termine fotone è divenuto di uso generale poiché, con la sua desinenza “one”, è in consonanza con i termini “protone”, “neutrone”, “elettrone” e, quindi, dà un’informazione immediata sul fatto che negli urti il “pacchetto di energia elettromagnetica” si comporta come una particella di materia.

CONCLUSIONI

“La nostra immaginazione è tesa al massimo; non, come nelle storie fantastiche, per immaginare cose che in realtà non esistono, ma proprio per comprendere ciò che davvero esiste.”

Richard P. Feynman

La teoria quantistica ci informa che la luce assume il comportamento sia di un’onda, sia di un corpuscolo (dualismo onda-particella) a seconda delle condizioni sperimentali. Ma come si può spiegare questo apparente paradosso? I fotoni sono onde o particelle?

Non sono né l’uno, né l’altro, ma devono essere considerati come particelle aventi proprietà che non abbiamo mai incontrato nella nostra esperienza diretta. Per quanto ne sappiamo oggi, questa è una proprietà intrinseca dei fotoni e non una limitazione della nostra conoscenza teorica, anzi sappiamo che in realtà tutta la materia si comporta come i fotoni.

Il comportamento quantistico sembra in contrasto con il senso comune e con la nostra intuizione, ma dobbiamo tener presente che non possiamo affidarci ad essi, in quanto il senso comune deriva dalle nostre esperienze, che si svolgono in condizioni lontanissime da quelle del mondo microscopico e la nostra intuizione spesso non è che il limite della nostra fantasia. Tuttavia penso che si possa raggiungere una interpretazione più soddisfacente in futuro, del resto la Fisica ha ancora diversi problemi aperti, come quello di conciliare la Teoria della Relatività Generale (che descrive i fenomeni nel mondo macroscopico) e la Teoria Quantistica (che si occupa dei fenomeni nel campo microscopico), e per arrivare a ciò credo sia necessaria una nuova rivoluzione.

Così, dopo gli Anni Mirabiles di Newton (1664-1666) e l’Annus Mirabilis di Einstein (1905), aspettiamo un nuovo periodo di esplosiva fertilità intellettuale.

Le applicazioni tecnologiche della teoria quantistica della radiazione sono innumerevoli e continuamente sotto i nostri occhi.

Basta infatti entrare in un negozio di elettronica per accorgersene, ed intendo proprio “entrare”, visto che ci accoglie la fotocellula che fa aprire le porte al nostro passaggio.

TECNOLOGIE CHE SI BASANO SULLA TEORIA QUANTISTICA DELLA LUCE

In questa sezione della tesina illustreremo le applicazioni della teoria quantistica della radiazione (con particolare riferimento alla natura corpuscolare della luce) nel campo delle tecnologie dell’informazione.

Pertanto divideremo i diversi dispositivi in base al principale fenomeno fisico che essi sfruttano. Agli accoppiatori ottici sarà, però, dedicata una trattazione a parte, in quanto essi sono costituiti da dispositivi che sfruttano due fenomeni diversi e tra di loro “complementari”.

Sono date come conosciute le basi necessarie di Fisica, di Fisica dei Semiconduttori, tuttavia è sembrato opportuno inserire qualche breve accenno degli argomenti fondamentali, alcuni dei quali, di solito, sono noti solo agli addetti ai lavori. Alcuni saranno trattati qui di seguito, mentre altri nel paragrafo di interesse.

ELEMENTI DELLA FISICA DEI SEMICONDUTTORI

GIUNZIONE P-N

I semiconduttori

Il silicio è il materiale maggiormente utilizzato per la costruzione dei dispositivi elettronici, per questo è fondamentale conoscerne le caratteristiche. Di seguito, quindi, analizzeremo le caratteristiche fisiche dei semiconduttori con particolare riferimento a questo materiale.

I semiconduttori sono materiali che hanno una resistività intermedia tra i conduttori e gli isolanti.

Il silicio ha la stessa struttura cristallina del diamante, cubica a facce centrate, dove ciascun atomo forma quattro legami covalenti con gli altri quattro atomi vicini (appartenendo al gruppo IV-A nella tavola periodica).

Nelle vicinanze dello zero assoluto il cristallo perfetto di silicio è un isolante che ha un piccolo gap tra la più alta banda energetica completamente occupata e la successiva, che è completamente vuota; invece a temperatura ambiente alcuni elettroni posseggono energia sufficiente per passare dalla banda di valenza ai livelli inferiori della banda più alta (detta banda di conduzione).

Vi è quindi un equilibrio dinamico tra generazione (un elettrone sfugge dal legame lasciando una lacuna) e ricombinazione (un elettrone rioccupa la posizione nel legame) di coppie elettrone-lacuna, i due portatori di carica del cristallo, la cui concentrazione è, però, estremamente più bassa rispetto a quella nei conduttori. Da quanto affermato possiamo capire come il silicio abbia una conducibilità elettrica intermedia tra quella dei conduttori e quella degli isolanti, e che, al contrario di quanto avviene nei primi, questa aumenta al crescere della temperatura.

Il drogaggio dei semiconduttori

Se nella struttura cristallina introduciamo impurezze il semiconduttore si dice drogato e la sua resistività diminuisce.

Inserendo, per esempio, in un cristallo di silicio atomi pentavalenti, come quelli dell'arsenico, rimarranno elettroni in eccesso (uno per ogni atomo di As) che non partecipano al legame: alcuni di questi si combineranno con delle lacune presenti fino a raggiungere un nuovo stato di equilibrio dinamico, mentre altri rimarranno disponibili alla conduzione; si ha quindi un aumento della concentrazione di elettroni ed una diminuzione di concentrazione delle lacune. Questo tipo di drogaggio è detto tipo-N, gli atomi di arsenico sono detti donatori, gli elettroni sono detti portatori maggioritari (o di maggioranza), mentre le lacune sono dette portatori minoritari (o di minoranza).

Inserendo atomi di una sostanza trivalente, come il boro, rimarranno lacune in eccesso (una per ogni atomo di B): alcune di queste si combineranno con degli elettroni liberi presenti fino a raggiungere un nuovo stato di equilibrio dinamico, mentre altre rimarranno disponibili alla conduzione; si ha quindi un aumento della concentrazione di lacune ed una diminuzione di concentrazione di elettroni. Questo tipo di drogaggio è detto tipo-P, gli atomi di boro sono detti accettori, le lacune sono dette portatori maggioritari (o di maggioranza), mentre gli elettroni sono detti portatori minoritari (o di minoranza).

Prima di andare avanti è importante sottolineare che i portatori di carica sono due (elettroni e lacune), in quanto la lacuna si muove a causa dello spostamento di un elettrone da un legame all'altro senza che gli elettroni di conduzione intervengano in questo processo.

La giunzione P-N:

Drogando una parte di un cristallo di silicio di tipo-P e l'altra di tipo-N degli elettroni passano nella zona P e delle lacune nella zona N a causa dell'agitazione termica. Questa ricombinazione forma un sottile strato (detto zona di svuotamento), a cavallo della giunzione, dove sono presenti solo cariche fisse (gli ioni dell'accettore nella zona P e gli ioni del donatore nella zona N). Nasce così un campo elettrico che si oppone alla diffusione dei portatori maggioritari, il quale aumenta fino allo stabilirsi di un equilibrio dinamico tra la corrente di diffusione e la corrente di deriva dei portatori minoritari, causata dal campo stesso.

Aggiungo che un drogaggio maggiore genera una zona di svuotamento più sottile e viceversa. La spiegazione di ciò è bene cercarla attraverso in un'analisi quantitativa, che esula dagli scopi della presente descrizione.

Polarizzazione della giunzione P-N

La giunzione sopra descritta può essere polarizzata in due modi:

Polarizzazione diretta: ponendo la zona P a potenziale maggiore della zona N la giunzione si dice polarizzata direttamente e, in un ipotetico circuito, se la tensione supera un certo valore (tensione di soglia) tale da vincere il campo elettrico della giunzione, scorre corrente.

Polarizzazione inversa: ponendo la zona P a potenziale minore della zona N non si fa altro che intensificare il campo elettrico della giunzione, infatti è presente una debole corrente inversa poiché vengono estratte ulteriori lacune dalla zona P ed ulteriori elettroni dalla zona N, allargando così la zona di svuotamento. Se la differenza di potenziale supera un certo valore (detto tensione di breakdown) la corrente inversa aumenta enormemente a causa di due fenomeni: o l'effetto Zener o l'effetto valanga o entrambi.

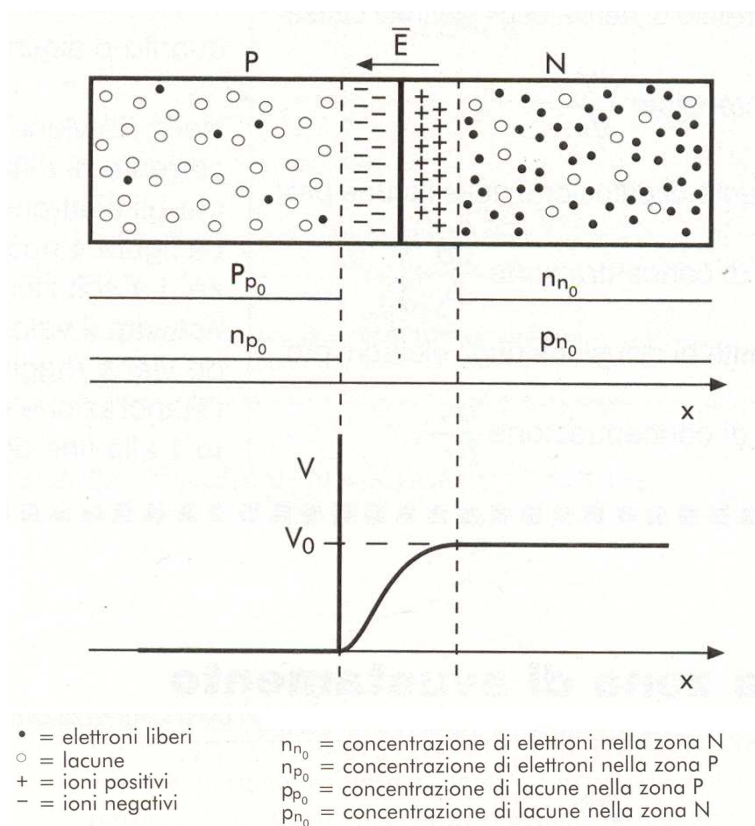
L'effetto Zener si ha quando il forte campo elettrico strappa elettroni dai loro legami covalenti, che proseguono di moto accelerato (non uniformemente accelerato, poiché durante il cammino è facile che si scontrino con gli atomi presenti nel cristallino).

Si ha, invece, l'effetto valanga quando lo scontro di un elettrone con un atomo ne libera un altro; e a loro volta, questi due elettroni, ne libereranno altri due e così via. Si innesca così un processo che incrementa "a valanga" il numero di portatori.

Più il drogaggio è debole, ovvero la zona di svuotamento è larga (gli elettroni hanno sufficiente spazio per raggiungere alti valori di energia cinetica), più è probabile che prevalga l'effetto valanga; altrimenti avviene principalmente l'effetto Zener.

I due effetti sono influenzati in modo diverso dalla temperatura: l'effetto Zener è favorito da un aumento di temperatura poiché diventa più facile che gli elettroni sfuggano dal legame; mentre l'effetto valanga diminuisce con l'aumentare della temperatura, in quanto ad una maggiore agitazione termica corrisponde un aumento delle collisioni, quindi gli elettroni hanno un percorso minore per raggiungere l'energia necessaria.

Il breakdown della giunzione non è un fenomeno distruttivo, purché l'aumento di temperatura non sia troppo elevato.



Schema di una giunzione P-N

DISPOSITIVI FOTOSENSIBILI

I dispositivi fotosensibili sono sostanzialmente dispositivi che producono fenomeni di natura elettrica se investiti da una radiazione luminosa.

Dispositivi che sfruttano l'effetto fotoemittente

L'*effetto fotoemittente* (o emissione fotoelettrica) è il fenomeno di cui ci siamo occupati nella prima sezione dell'elaborato, ovvero l'emissione di elettroni da una superficie che è stata investita da una radiazione luminosa.

Abbiamo visto come questo fenomeno sia tipico dei metalli. Ciò perché essi possiedono un gran numero di elettroni liberi, per cui il lavoro di estrazione è minimo; ma in linea di principio potrebbe avvenire per tutti i materiali, se l'energia fornita è sufficiente. Ricordiamo che il lavoro di estrazione si può esprimere come somma dell'energy gap, dell'affinità elettronica e dell'energia persa dall'elettrone a causa degli urti nel fuoriuscire dal materiale.

I principali dispositivi che sfruttano l'effetto fotoemittente sono: le *fotocellule*, i *fotomoltiplicatori* e i *tubi intensificatori di immagine*.

Fotocellule

Le fotocellule sono dispositivi che servono a convertire la radiazione luminosa in corrente elettrica. Esse sono costituite da un dispositivo analogo a quello usato nell'esperimento di Lenard.

Si dividono in due tipi: le *fotocellule a vuoto* e le *fotocellule a gas*.

Le prime sono caratterizzate dal fatto che nell'ampolla di vetro vi è una condizione di vuoto spinto. In esse l'intensità di corrente di saturazione non dipende dalla tensione applicata, ma solo dall'intensità luminosa secondo una relazione lineare (come si è visto nell'esperimento di Lenard). Esse hanno il vantaggio di avere una transcaratteristica lineare e transitori ridotti (possono rilevare segnali anche a frequenze maggiori di 10 kHz).

Le seconde contengono, invece, un gas inerte (per esempio l'argon).

Per far sì che scorra corrente è necessario applicare una tensione minima, detta tensione di ionizzazione, di modo che gli elettroni acquistino un'energia cinetica sufficiente a innescare una generazione a valanga di cariche per mezzo della ionizzazione degli atomi di gas. Evidentemente la corrente dipende dalla d.d.p. applicata, pertanto è possibile modificare la sensibilità del dispositivo. Per contro esse sono più lente rispetto alle cellule a vuoto, a causa del ritardo necessario alla ionizzazione, e quindi non possono trovare applicazione nei casi in cui la radiazione da rilevare varia con frequenza elevata.

A seconda del materiale con cui viene realizzato il fotocatodo, si possono rilevare radiazioni in diverse bande di frequenza.

Fotomoltiplicatori

I fotomoltiplicatori sono tubi a vuoto nei quali un fotocatodo emette elettroni quando viene colpito da una radiazione luminosa; questi a loro volta colpiscono degli anodi (dinodi) disposti sequenzialmente. Ciò provoca delle emissioni secondarie con il risultato di moltiplicare il numero di elettroni e quindi il valore della corrente. I fotomoltiplicatori si comportano, quindi, come fotocellule, nelle quali vi è un'amplificazione di corrente, ma rispetto a queste hanno un rapporto segnale-rumore decisamente migliore.

I fotomoltiplicatori trovano applicazione nei casi in cui occorre rilevare intensità luminose molto deboli, nella rilevazione di radiazioni nucleari, in fotometria, in astrometria ed in vari processi industriali.

Intensificatori di immagine

I tubi intensificatori di immagine sono dispositivi che rendono possibile la visione anche in condizioni di scarsa illuminazione, sfruttando la pochissima luce presente e moltiplicandone l'effetto fino a centomila volte in modo analogo ai fotomoltiplicatori.

Trovano applicazione in campo militare, nei microscopi elettronici, nella navigazione subacquea e in generale in tutte le situazioni di illuminazione insufficiente.

Dispositivi che sfruttano l'effetto fotoconduttivo

Quando un semiconduttore viene investito da una radiazione luminosa ogni fotone può rompere un legame covalente generando una coppia elettrone-lacuna e quindi aumentando i portatori di cariche e di conseguenza la conducibilità elettrica. Quest'effetto è detto *effetto fotoconduttivo*. Perché ciò avvenga il fotone deve trasmettere un'energia sufficiente per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione, cioè deve avere un'energia almeno pari all'energy gap.

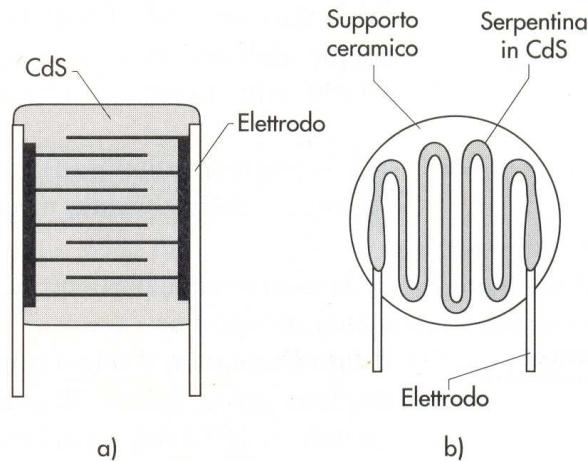
Tuttavia, se il semiconduttore non è perfettamente puro, all'interno della banda proibita vi sono dei livelli energetici intermedi (trapping level) che consentono agli elettroni di passare alla banda di conduzione tramite più salti di energia minore.

Da quanto detto le lunghezze d'onda alle quali sono sensibili i diversi materiali cambiano a seconda del valore del salto energetico (E_g), in particolare è possibile calcolare la lunghezza d'onda che sortisce il massimo effetto fotoconduttivo (lunghezza d'onda critica λ_c) mediante

la seguente relazione: $\lambda_c = \frac{h \cdot c}{E_g}$.

Il silicio e il germanio sono sensibili ai raggi infrarossi, mentre per rilevare le radiazioni dello spettro visibile si utilizza il solfuro di cadmio, in quanto la sua risposta in frequenza simile a quella dell'occhio umano.

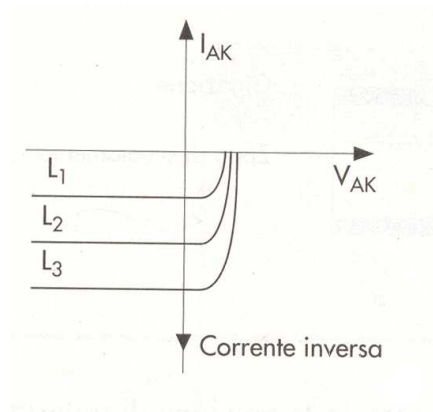
Il dispositivo più usato che sfrutta l'effetto fotoconduttivo è il fotoresistore. I *fotoresistori* al solfuro di cadmio sono ottenuti mediante la sinterizzazione della polvere di CdS. Per ottenere valori di resistenza bassi si ricorre a strutture interdigitate, mentre per ottenere valori elevati di resistenza la pasticca viene sagomata a forma di serpentina.



Il principale vantaggio dei fotoresistori è la relazione lineare tra resistenza e intensità luminosa; esse sono, quindi, particolarmente valide come trasduttori di intensità luminosa. Purtroppo, però, hanno un tempo di risposta piuttosto lungo (oltre $100\mu\text{s}$) e ciò non permette di rilevare veloci variazioni.

Dispositivi che sfruttano l'effetto fotoelettrico di giunzione.

Quando una radiazione colpisce una giunzione P-N si ha un cambiamento della sua caratteristica inversa. Infatti la radiazione produce un certo numero di coppie elettrone-lacuna. Questo numero incide, relativamente, molto di più sui portatori minoritari che sui portatori maggioritari, in quanto questi sono in numero fortemente minore. Il risultato è un cambiamento della corrente inversa.



I principali dispositivi che sfruttano quest'effetto sono i fotodiodi e i fototransistor. Di seguito verranno illustrati il principio di funzionamento e le diverse tipologie.

Fotodiodi e celle fotovoltaiche

Il *fotodiodo* è costituito da una giunzione P-N tale da consentire alla luce di colpire la zona di svuotamento (*zona attiva*).

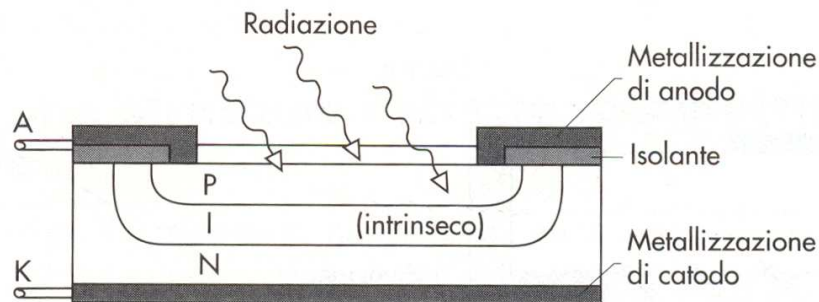
Quando un fotone interagisce con la regione di svuotamento genera una coppia elettrone-lacuna. I portatori così generati vengono allontanati rapidamente dal campo elettrico di giunzione (gli elettroni verso la zona N e le lacune verso la zona P), quindi se il diodo è inserito in un circuito chiuso scorre una corrente elettrica. Se, invece, la coppia elettrone-lacuna nasce al di fuori della zona attiva il portatore maggioritario (l'elettrone se siamo nella zona N, la lacuna se siamo nella zona P) è libero di contribuire a tale corrente, mentre il portatore minoritario deve prima diffondere fino alla zona di svuotamento. Si evince come sia più efficace la generazione di portatori se ottenuta nella zona di svuotamento.

La corrente prodotta è pressoché indipendente dalla tensione inversa applicata, che ha solo l'effetto di intensificare il campo elettrico di giunzione, pertanto può anche essere nulla. Nella pratica, però, la giunzione viene sempre polarizzata inversamente, in quanto ciò consente di mantenere la concentrazione dei portatori generati modesta e quindi di massimizzare il tasso di assorbimento del materiale.

In fase di progetto bisogna comunque tener conto della debole corrente inversa, detta *corrente di buio*.

Si osservi che per quanto riguarda il fenomeno dell'assorbimento non ha particolare rilevanza la caratteristica di gap diretto o indiretto, che, come vedremo, è invece, molto importante per la realizzazione di buoni dispositivi emettitori a semiconduttore. Infatti, anche se il semiconduttore è a gap indiretto, si può avere facilmente una transizione diretta, perché esistono nella banda di conduzione stati disponibili con la stessa quantità di moto dello stato di partenza nella banda di valenza.

Per ottenere prestazioni migliori sono realizzati fotodiodi planari a struttura PIN.



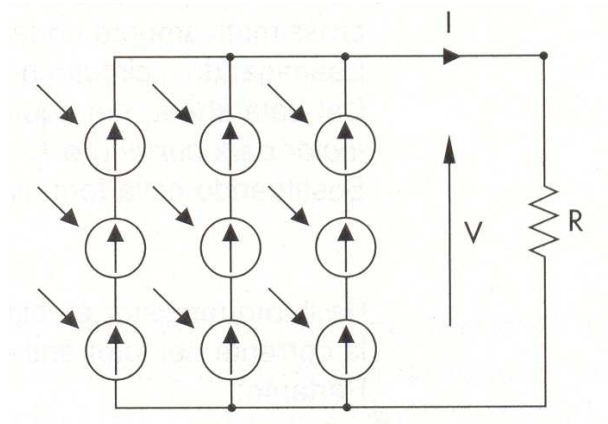
Oltre a tutti i consueti vantaggi la tecnica planare permette di costruire diodi in cui la radiazione investe superfici maggiori, poiché essa incide perpendicolarmente al piano di giunzione, di contro c'è lo svantaggio che la luce deve attraversare lo strato drogato di tipo P prima di raggiungere la zona attiva. Perciò per avere una buona efficienza è opportuno che la zona P sia molto stretta e la regione di svuotamento sia abbastanza larga.

Per allargare la zona di svuotamento si può aumentare la tensione di polarizzazione inversa, effettuare un basso livello di drogaggio, oppure utilizzare una struttura PIN nella quale le zone P ed N sono separate da uno strato di semiconduttore intrinseco (I) come rappresentato in figura.

Da quanto abbiamo visto i fotodiodi in modo analogo ai fotoresistori possono essere utilizzati come trasduttori di luminosità. I vantaggi rispetto a questi ultimi sono i brevissimi tempi di risposta, una migliore linearità della relazione tra intensità luminosa e corrente generata e un minore rumore; mentre gli svantaggi sono la superficie attiva molto minore (alla quale si ovvia mediante una lente) e soprattutto la corrente di buio che, tra l'altro è fortemente dipendente dalla temperatura.

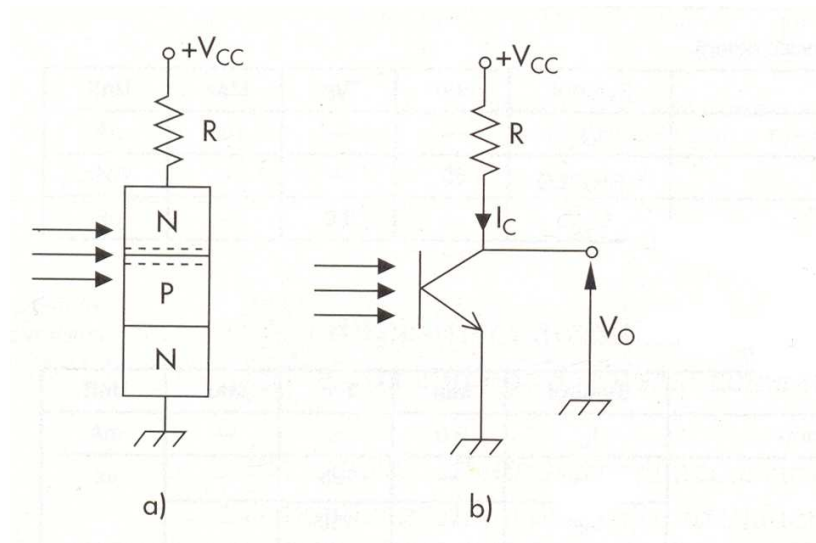
Producendo una corrente, sfruttando l'energia luminosa, il fotodiode può essere assimilato ad un generatore; in tale caso è detto *dispositivo fotovoltaico*.

E' proprio grazie a ciò che funzionano i pannelli solari: essi sono una matrice di celle solari costituite fondamentalmente da fotodiodi ottimizzati per essere sensibili allo spettro solare (ciò si ottiene mediante materiali con un energy gap opportuno). La struttura a matrice consente di ottenere i valori desiderati, di tensione (collegando in serie più celle solari) e di corrente (collegando più rami in parallelo).



Fototransistor

I fototransistor sono transistori BJT nei quali viene utilizzata la giunzione base-collettore polarizzata inversamente, come giunzione attiva. La luce incide, quindi, nella zona normalmente occupata dal terminale di base (vedi figura).



A differenza dei fotodiodi ha una sensibilità, definita come rapporto tra corrente di collettore e potenza incidente, decisamente superiore. Non si rivelano però, buoni trasduttori a causa della scarsa linearità della transcaratteristica; funzionano, invece bene come fotointerruttori.

Per ottenere una sensibilità ancora maggiore si può sfruttare la connessione Darlington.

DISPOSITIVI FOTOEMITTENTI

In questo paragrafo verranno trattati i dispositivi fotoemittenti, con particolare riferimento ai dispositivi fotoelettrici usati nell'ingegneria dell'informazione, cioè i diodi LASER e LED. Prima di occuparci di tali dispositivi rivediamo alcuni fenomeni fisici fondamentali.

Interazione radiazione-materia

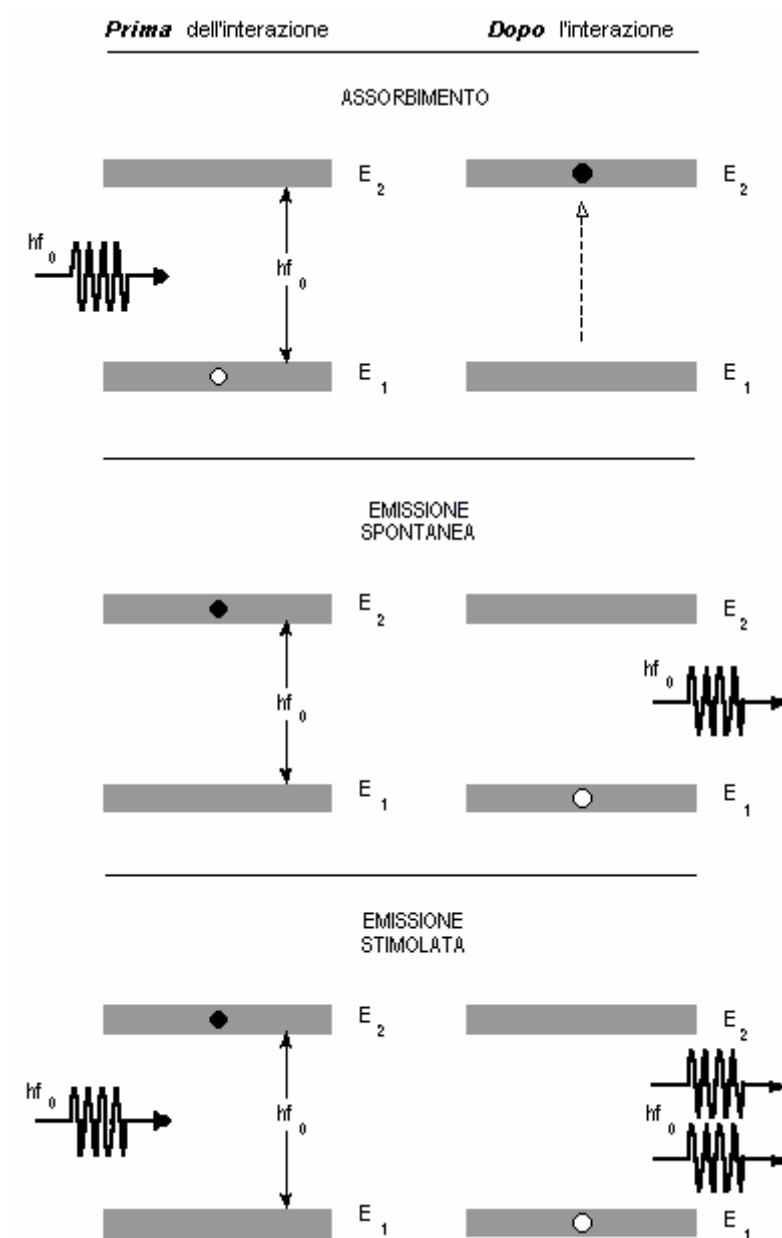
I LED e i LASER si basano su fenomeni di emissione ed assorbimento della radiazione elettromagnetica che possiamo descrivere con il solo modello corpuscolare della luce.

Consideriamo un reticolo cristallino nel quale gli elettroni possono trovarsi a livelli di energia diversi. Di questi livelli di energia ne considereremo, per semplicità, solo due, appartenenti a due bande di energia diverse e con energia E_1 ed E_2 , con $E_2 > E_1$.

Se un elettrone passa dal livello E_2 al livello E_1 esso emette un fotone di energia pari al salto energetico (fenomeno dell'*emissione*).

Se si fa interagire un fotone, avente energia pari all'energia di gap, con questo sistema possono verificarsi tre fenomeni:

- *Assorbimento*. Se un elettrone si trova al livello energetico inferiore esso può assorbire il fotone e transitare al livello energetico superiore.
- *Emissione stimolata*. Se un elettrone si trova a livello superiore può accadere che questo passi da tale livello al livello inferiore e di conseguenza emetta un fotone uguale al precedente e con esso in fase.



A temperatura ambiente, a causa delle fluttuazioni statistiche dell'energia degli elettroni, questi possono passare da una banda inferiore a una banda superiore. Esso ritorna, poi, al livello precedente, in quanto può permanere in quello stato solo per un tempo dell'ordine di 10^{-8} s (stato instabile). Esistono, però, casi in cui la durata di tale intervallo può allungarsi fino a 10^{-3} s (stato metastabile). Questo tempo appare molto breve, ma è importante notare che è 100 000 volte maggiore della permanenza tipica.

I diodi LED

I *LED* (Light Emitting Diode) sono dispositivi a semiconduttore impiegati come emettitori di luce di lunghezza d'onda opportuna, che solitamente è nell'infrarosso vicino (IRED) o nello spettro visibile (VLED).

Questi utilizzano il fenomeno dell'emissione spontanea nella transizione tra due livelli, cioè quello di conduzione E_c e quello di valenza E_v . Il fotone prodotto avrà, come visto

precedentemente, frequenza pari a $f = \frac{E_g}{h}$.

A temperatura ambiente il numero di ricombinazioni elettrone-lacuna è troppo piccolo, anche se il semiconduttore è fortemente drogato, pertanto per ottenere un'emissione significativa si realizza una giunzione PN che viene polarizzata direttamente. In tal modo un gran numero di portatori vengono iniettati nella zona di svuotamento e lì possono ricombinarsi.

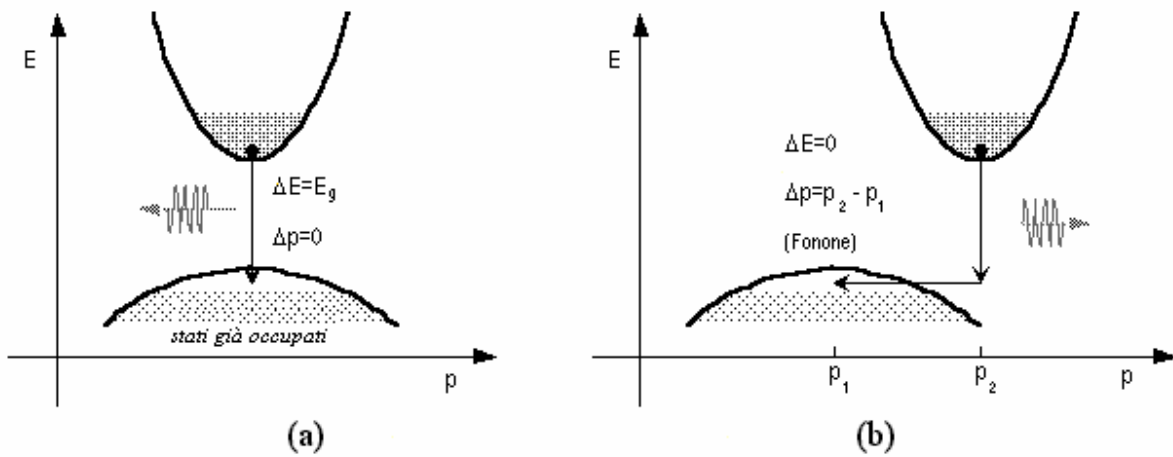
Non tutte le ricombinazioni sono però utili. Possono verificarsi:

- *Ricombinazione radiativa*, che dà luogo all'emissione di un fotone;
- *Ricombinazione non radiativa*. In questo caso l'energia di gap non viene ceduta sottoforma di un fotone, ma, o viene trasferita ad altri portatori come energia cinetica, o viene dissipata in fononi di vibrazione del reticolo, oppure, infine, viene assorbita da impurità del materiale.

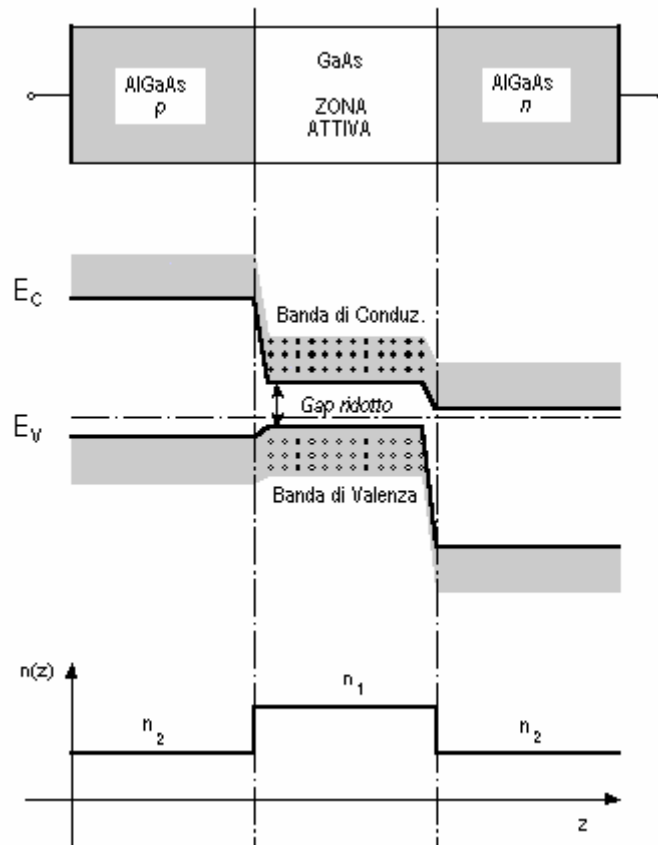
E' evidente che l'efficienza quantica del dispositivo, intesa come rapporto tra il numero di fotoni emessi e la quantità di elettroni che attraversano la giunzione, dipende dalla probabilità che si verifichino ricombinazioni radiative. Questa probabilità nell'arsenuro di gallio (GaAs) è molto alta e perciò è il composto più usato nella costruzione dei dispositivi optoelettronici.

L'attitudine di un semiconduttore a privilegiare ricombinazioni radiative è determinata dalle caratteristiche del salto energetico. Nei semiconduttori a gap diretto i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto sono facilmente rispettati durante la transizione, perché nel diagramma quantità di moto - energia la banda di conduzione e la banda di valenza sono direttamente affacciate (si noti che l'emissione di un fotone causa un cambiamento trascurabile della quantità di moto dell'elettrone). Invece, nei semiconduttori a gap indiretto, perché avvenga la transizione è necessario che vi sia una variazione della quantità di moto, in quanto le due bande non sono affacciate. Questa variazione avviene grazie all'intervento di un fonone (particella con piccola energia, ma con grande quantità di moto) e ciò determina la bassa probabilità che avvenga la ricombinazione radiativa.

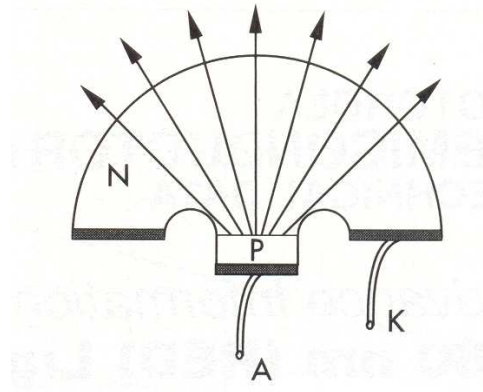
La figura seguente illustra quanto appena esposto.



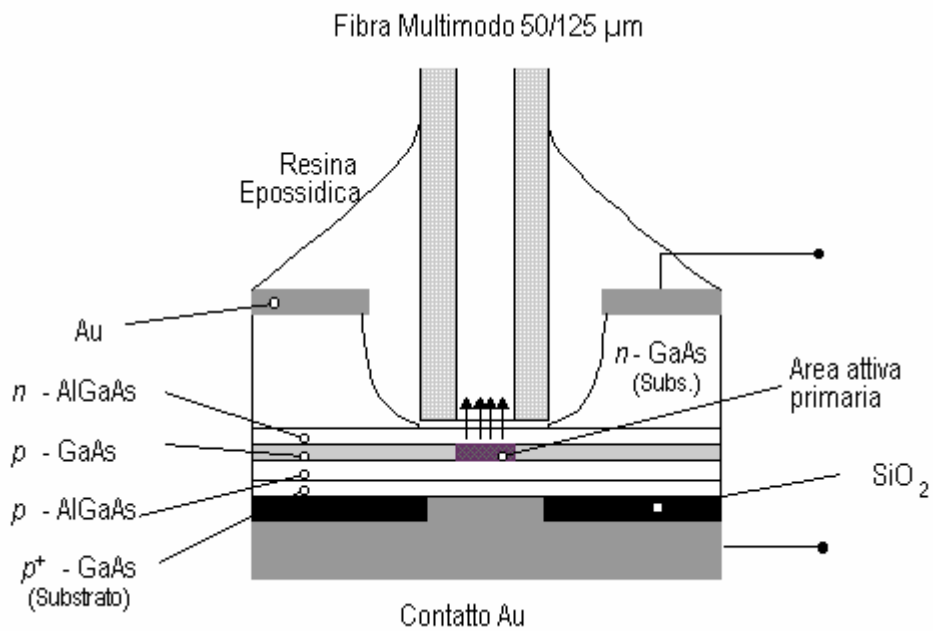
Solitamente per confinare più portatori in una piccola zona, e quindi aumentare il flusso ottico tra il semiconduttore P e il semiconduttore N si pone uno strato intrinseco, con indice di rifrazione maggiore delle altre due zone, in modo tale da limitare la larghezza della regione di svuotamento e confinare la luce emessa.



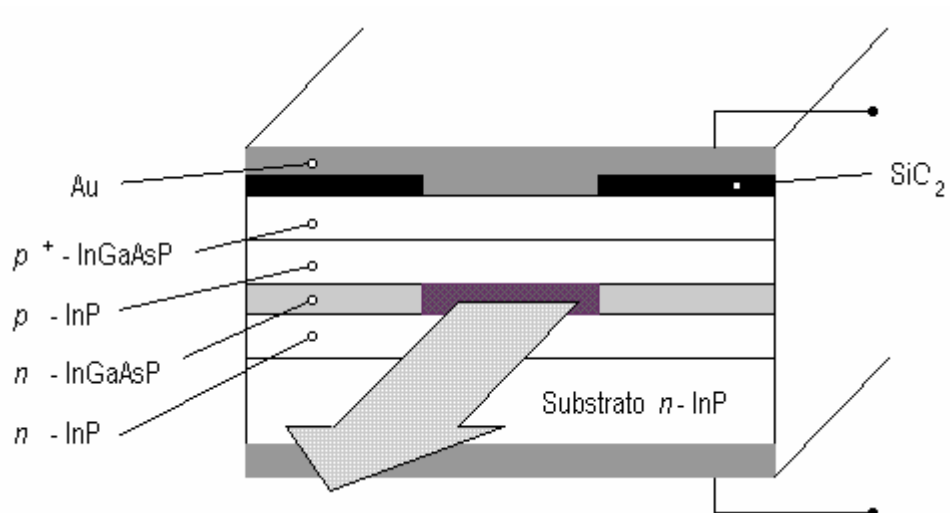
Nella costruzione dei LED, a seconda dell'impiego a cui verranno destinati si possono mettere in pratica diversi accorgimenti, per esempio:
strutture a cupola per migliorare l'efficienza



Emissione superficiale per facilitare l'accoppiamento con fibre ottiche



Emissione laterale per evitare dispersioni attraverso la faccia opposta a quella emittente.



Disponendo in maniera opportuna diversi LED è possibile costruire dei display come i display a segmenti oppure display a matrice di punti.

Dispositivi LASER

I *LASER* (Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation) sono dispositivi che permettono di ottenere un fascio luminoso con le seguenti caratteristiche:

- *estrema monocromaticità*: i fotoni che compongono il raggio hanno tutti la stessa lunghezza d'onda, con un errore relativo massimo di 10^{-10} ;
- *estrema coerenza*: le onde associate ad ogni singolo fotone sono quasi perfettamente in fase (la fase iniziale può essere costante su una lunghezza del raggio di centinaia di chilometri);
- *estrema direzionalità*: il fascio ha un'apertura angolare inferiore a 0,001 rad, tuttavia il foro di uscita del LASER determina un allargamento del fascio per diffrazione;
- *luminanza elevata*: proprio perché il raggio LASER non è altro che luce concentrata, la potenza emessa per unità di superficie ha valori estremamente elevati.

Per ottenere luce con queste caratteristiche si sfrutta il fenomeno dell'emissione stimolata, perché come abbiamo visto produce fotoni uguali e in fase .

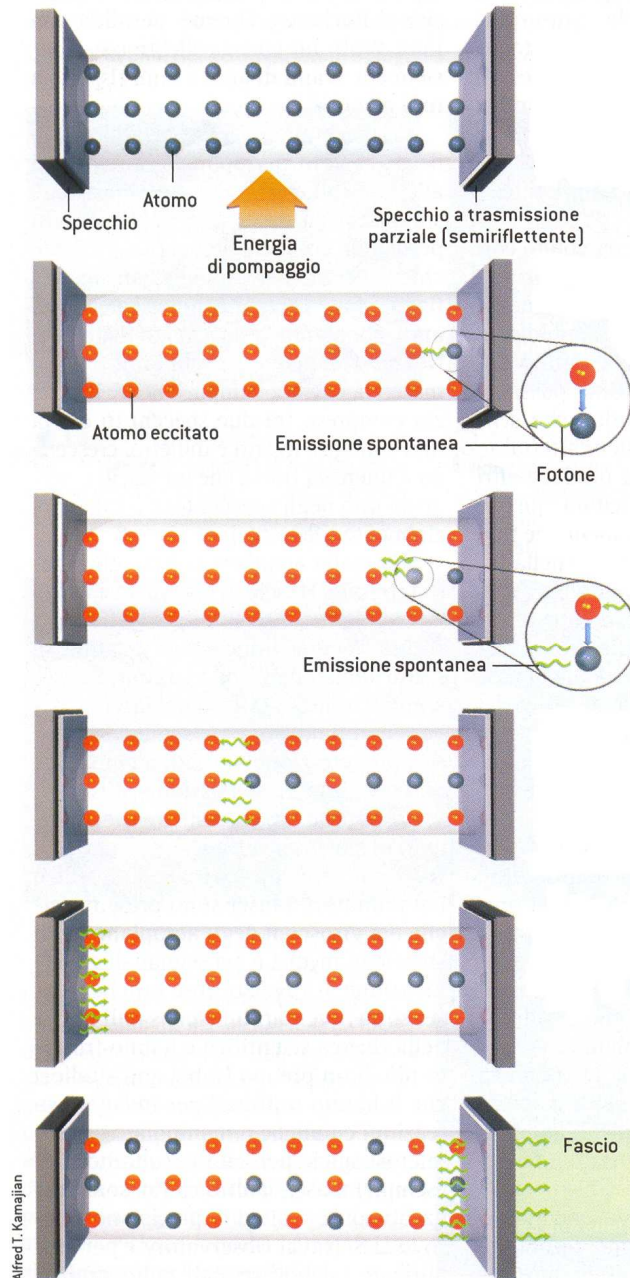
È necessario, quindi, che un gran numero di elettroni si trovi a livello energetico superiore.

All'equilibrio termico, però, la maggior parte degli elettroni si trova nella banda di valenza e, pertanto, è necessario fornire energia a questi in modo da aumentare il numero di atomi eccitati, e di conseguenza diminuire il numero di atomi non eccitati.

La somministrazione di energia prende il nome di *pompaggio*, mentre il risultato che si ottiene è chiamato *inversione di popolazione*.

Per ottenere il raggio laser si utilizza una cavità risonante contenente gli atomi della parte attiva del dispositivo. Questa cavità è costituita da due specchi, uno dei quali è semiriflettente. L'emissione di fotoni nella cavità risonante è ottenuta nel seguente modo:

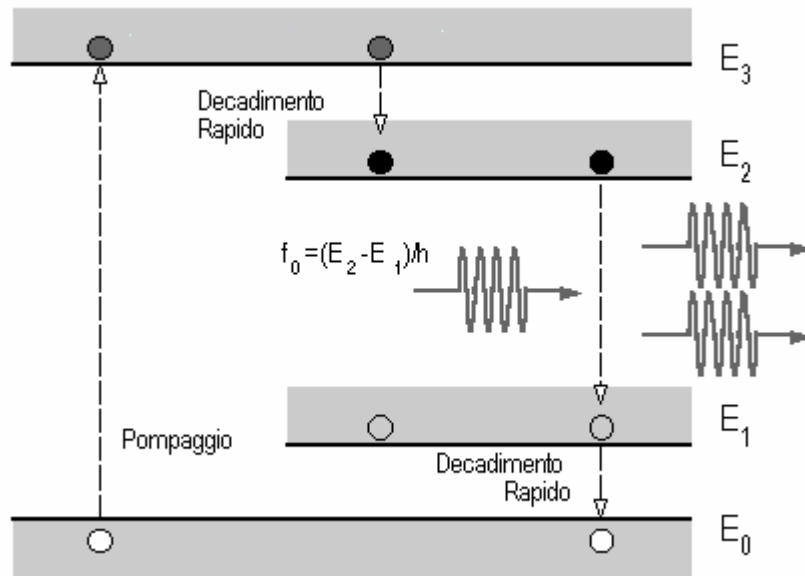
1. l'energia di pompaggio eccita gli atomi contenuti nella cavità,
2. un atomo emette spontaneamente un fotone,
3. questo fotone interagisce con un atomo eccitato e provoca l'emissione stimolata di un altro fotone identico,
4. si innesca così una reazione a catena che genera un gran numero di fotoni. Questi sono riflessi da uno specchio della cavità e la ripercorrono sino a raggiungere la superficie semiriflettente che lascia passare alcuni fotoni, mentre altri vengono riflessi e continuano il processo.



Vi sono diversi tipi di LASER, come i LASER a gas, a liquidi, allo stato solido, a semiconduttore. Ciascuno di questi si differenzia per il materiale e per la tecnica di pompaggio utilizzata.

Nelle tecnologie per l'ingegneria dell'informazione rivestono particolare importanza i laser a semiconduttore.

Nei LASER a semiconduttore si utilizza solitamente un sistema a quattro livelli come mostrato in figura.



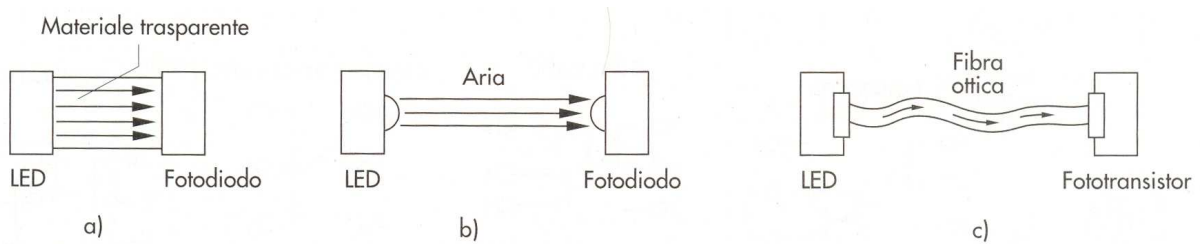
Gli elettroni acquistano energia e passano dallo stato E_0 (stabile) allo stato E_3 (instabile), poi vi è un decadimento rapido (non radiativo) allo stato E_2 . Lo stato E_2 deve essere metastabile, in modo tale che vi sia il tempo sufficiente per l'accumulo di un numero congruo di elettroni. Successivamente un fotone provoca l'emissione stimolata di un altro fotone e la transizione dell'elettrone a livello E_1 . Questo, poi, torna al livello E_0 con una transizione non radiativa.

Da quanto detto si può notare che sarebbe sufficiente un sistema a tre livelli (LASER a cristallo di rubino), difatti il livello E_1 non è prettamente necessario; tuttavia nei sistemi a quattro livelli l'inversione di popolazione si può ottenere più facilmente.

I laser a semiconduttore sono costituiti fondamentalmente da una giunzione P-N e l'energia di pompaggio è fornita polarizzando direttamente la giunzione, in modo tale che la banda di conduzione venga parzialmente riempita di elettroni e la banda di valenza parzialmente svuotata (si riempie di lacune).

ACCOPIATORI OTTICI

In diversi sistemi elettronici vi sono dispositivi fotoemittenti e dispositivi fotosensibili che interagiscono tra loro; si dice che i dispositivi sono accoppiati. Il mezzo attraverso il quale si propaga la luce può essere: un materiale trasparente, l'aria, o una fibra ottica.

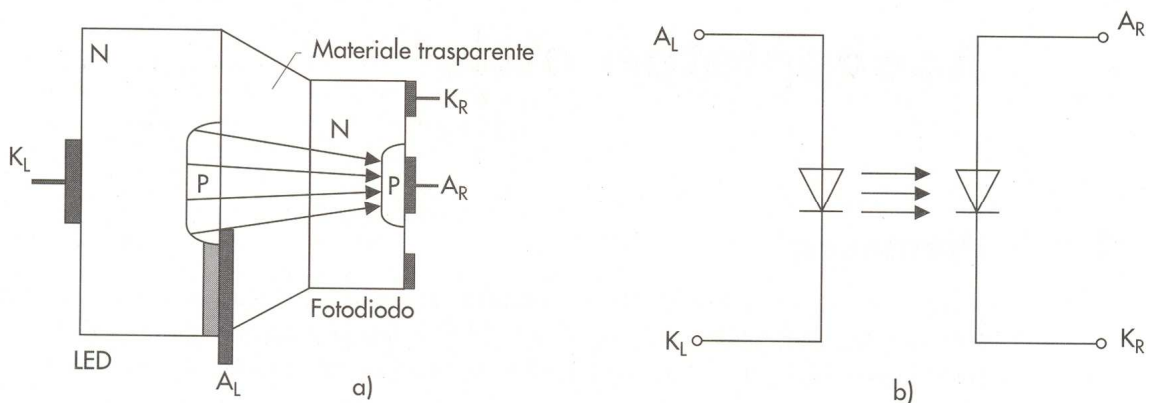


Nel seguito descriveremo brevemente alcuni accoppiatori ottici. Sottolineiamo, però, fin da ora, che per avere un corretto funzionamento dell'apparato è necessario che l'elemento fotoemittente e l'elemento fotosensibile abbiano la stessa risposta spettrale.

Optoisolatori

La principale funzione degli *optoisolatori* è interfacciare un sistema con un isolamento galvanico che lo protegga.

Questi sono dispositivi integrati che contengono al loro interno un dispositivo fotoemittente come un LED, che, se attraversato da corrente, emette una radiazione che attiva un dispositivo fotosensibile come un fotodiolo, un fototransistor o altro, il quale a sua volta, eroga una corrente proporzionale alla corrente d'ingresso.



I parametri più importanti per gli optoisolatori sono:

- il *CTR* (Current Transfer Ratio), cioè il rapporto percentuale tra la corrente di uscita e la corrente di ingresso;
- la *tensione di isolamento*, cioè la massima differenza di potenziale applicabile fra un terminale dell'elemento emettitore e un terminale dell'elemento rilevatore.

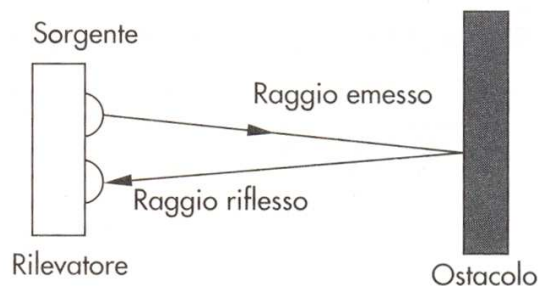
Accoppiamento ottico in aria

Nell'accoppiamento ottico in aria, tra la sorgente di luce e il rivelatore ottico vi è interposta l'aria, che permette la trasmissione libera della radiazione.

I due dispositivi possono rilevare un ostacolo poiché questo non permette alla luce di raggiungere il sensore. Ovviamente, a seconda delle caratteristiche del raggio di comunicazione cambiano gli ostacoli che possono essere rilevati.



Ci sono accoppiatori che funzionano tramite riflessione: quando la radiazione incontra un ostacolo riflettente, il raggio emesso ritorna verso il dispositivo colpendo il sensore. Questi accoppiatori hanno il vantaggio di essere costituiti da un'unica superficie, ma hanno lo svantaggio di poter lavorare solo in certe condizioni poiché è necessario che il raggio riflesso non venga assorbito dall'ostacolo o dal mezzo interposto.



APPLICAZIONI DEI DISPOSITIVI DI OPTOELETTRONICA

Quest'ultima parte dell'elaborato è dedicata alle ricadute in ambito tecnico-scientifico del modello quantistico della radiazione.

Gli ambiti di applicazione delle tecnologie che si fondano su questo modello sono i più disparati, si va dall'elettronica alla medicina, dall'automazione alla metrologia. Noi ci occuperemo, in particolare, delle applicazioni nelle scienze dell'informazione.

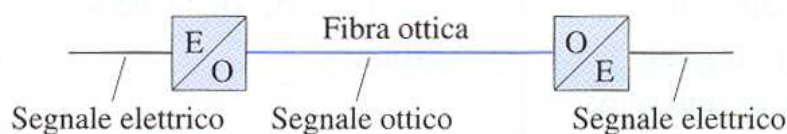
Le due applicazioni che appaiono, ad oggi, più significative sono la trasmissione in fibra ottica e le memorie ottiche (CD e DVD).

FIBRE OTTICHE

Illustreremo brevemente il funzionamento delle fibre ottiche.

Le fibre ottiche sono mezzi di trasmissione che trasportano l'informazione sotto forma di impulsi luminosi. Le parti fondamentali che costituiscono un collegamento in fibra ottica sono:

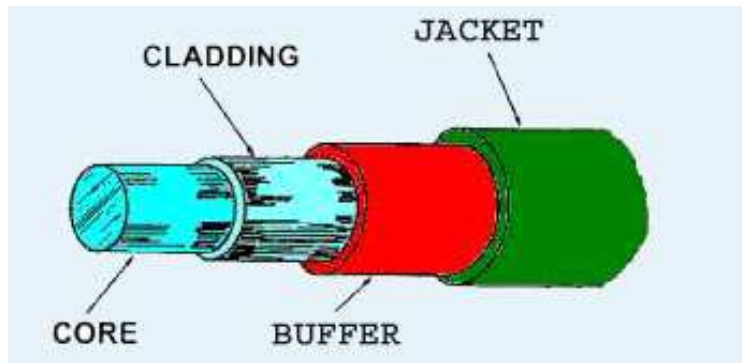
- il convertitore elettro-ottico (un dispositivo fotoemittente);
- la fibra ottica;
- il convertitore ottico-elettrico (un dispositivo fotosensibile).



Questo mezzo trasmissivo è costituito da:

- *CORE* e *CLADDING*, due strati vetrosi drogati al germanio per ottenere precisi valori di indice di rifrazione. L'indice di rifrazione n_1 del core è maggiore dell'indice di rifrazione n_2 del cladding (diametro core: 8 μm o 50-80 μm , diametro cladding: 125 μm);
- *BUFFER*. E' un rivestimento che ha la funzione di proteggere la fibra e irrobustirla meccanicamente (diametro: 250 μm);
- *JACKET*. E' un rivestimento che evita fenomeni di microbedding (microcurvatura).

I rivestimenti sono solitamente costituiti da materiale plastico.

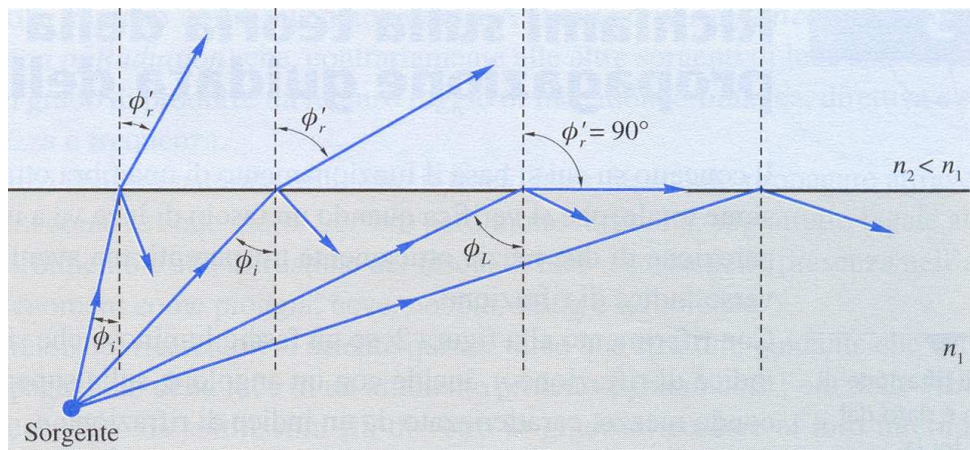


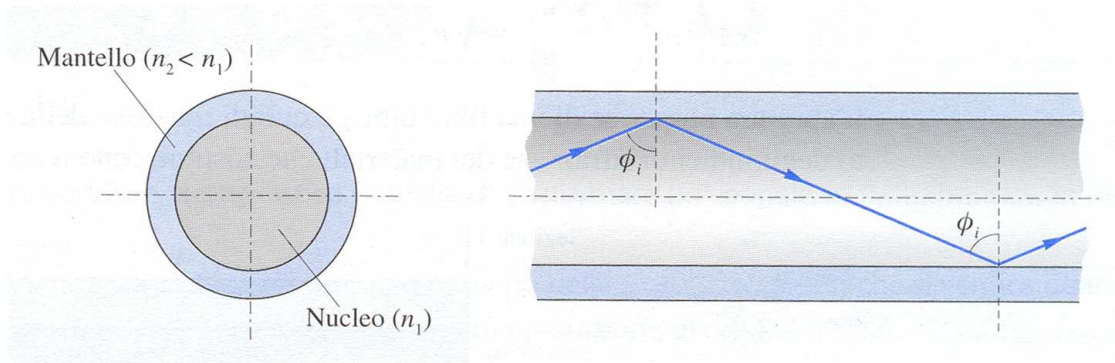
Propagazione della luce nelle fibre ottiche

Il principio su cui si basa la propagazione dei raggi luminosi attraverso la fibra ottica è la *riflessione totale*. Dalla legge di Snell, infatti, sappiamo che se un raggio che attraversa il core incide sul cladding con un angolo rispetto alla normale maggiore dell'angolo limite, esso verrà totalmente riflesso. L'*angolo limite* vale:

$$\Phi_L = \arcsen \frac{n_2}{n_1}$$

La riflessione totale è possibile grazie al fatto che $n_1 > n_2$.





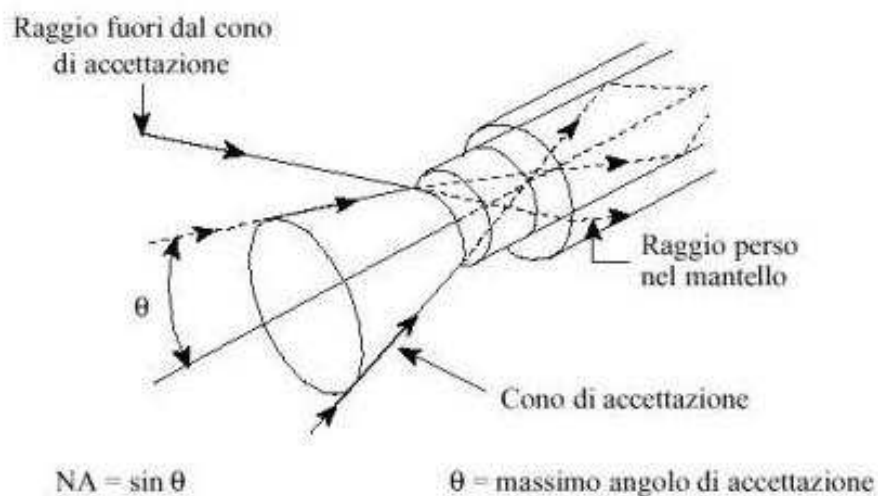
I raggi che incidono con angoli inferiori all'angolo limite saranno irradiati, e quindi, ad ogni successiva incidenza il raggio sarà attenuato fino a esaurirsi completamente.

E', però, necessario precisare che non tutti i raggi incidenti sulla superficie core-cladding con un angolo maggiore o uguale all'angolo limite sono di tipo guidato: questi devono anche rispettare la distribuzione dei campi elettromagnetici e quindi essere soluzioni dell'equazioni di Maxwell. Le soluzioni permesse, assegnate le condizioni di contorno, sono dette *modi di propagazione*. I modi di propagazione sono, quindi, funzioni della lunghezza d'onda della luce utilizzata; il loro numero è dato da

$$M = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot (NA)^2}{2 \cdot \lambda^2}$$

dove d è il diametro del core, NA è l'apertura numerica della fibra (di cui parleremo più avanti) e λ è la lunghezza d'onda del raggio incidente.

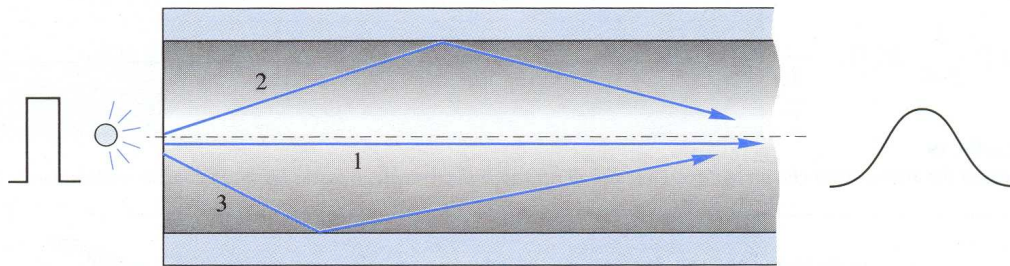
Abbiamo detto che non tutti i raggi che entrano nella fibra sono utili alla trasmissione dell'informazione, si definisce, infatti, un parametro che individua l'angolo di accettazione θ , cioè il massimo angolo entro il quale i raggi incidenti in ingresso devono essere compresi per poter essere di tipo guidato; questo parametro è l'*apertura numerica* $NA = \sin \theta$. Non è difficile ricavare che $NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$.



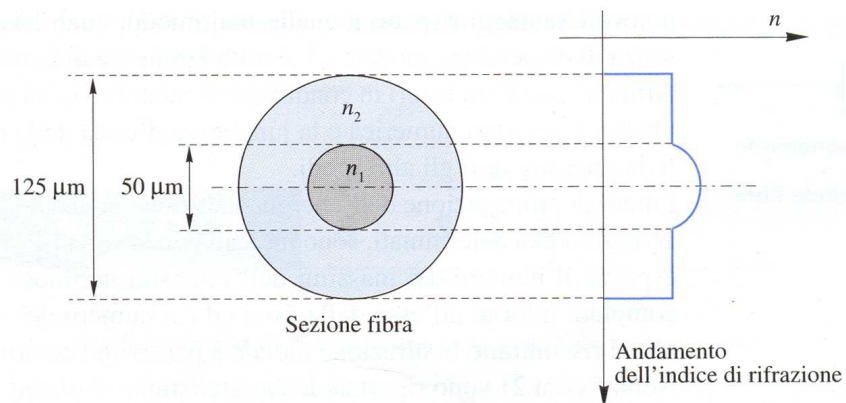
Dispersione nelle fibre ottiche

I due principali fenomeni di dispersione sono la dispersione modale e la dispersione cromatica.

- *Dispersione modale.* I diversi raggi di luce che attraversano la fibra seguono percorsi diversi, e, quindi, impiegano tempi diversi per raggiungere il ricevitore. Questo fa sì che gli impulsi inviati risultino distorti, perché appiattiti e allungati.



Per ridurre questo problema si possono usare fibre multimodo graded index, in cui l'indice di rifrazione del core non è costante, ma diminuisce gradualmente dal centro verso la superficie del cladding. In questo modo i raggi relativi ai percorsi più lunghi (quelli in prossimità del cladding) viaggiano più velocemente, perché percorrono un mezzo a indice di rifrazione minore.



Per eliminare totalmente questo problema si possono utilizzare fibre ottiche monomodo (consentono un solo modo di propagazione).

- *Dispersione cromatica.* E' dovuta alla variazione dell'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda delle componenti che costituiscono il segnale.

Questa dispersione è presente anche se vi è un solo modo di propagazione, ma si può quasi eliminare utilizzando sorgenti LASER, che, come sappiamo, emettono raggi di ridottissima larghezza spettrale.

Attenuazione nelle fibre ottiche

Nella tabella seguente riassumiamo le cause di attenuazione nelle fibre ottiche.

Perdite dovute alla realizzazione tecnologica	Perdite dovute all'interconnessione tra le fibre ottiche
<u>Perdite intrinseche</u> <ul style="list-style-type: none"> • Diffusione (Scattering Rayleigh) • Assorbimento 	<u>Perdite intrinseche</u> <ul style="list-style-type: none"> • Differenza tra indici di rifrazione • Differenza di N.A. • Differenza tra i diametri del core
<u>Perdite estrinseche</u> <ul style="list-style-type: none"> • Irradiazione (curvature) 	<u>Perdite estrinseche</u> <ul style="list-style-type: none"> • Errori di disassamento • Errori di separazione • Disallineamento angolare

Vantaggi e svantaggi delle fibre ottiche.

Per concludere elenchiamo i principali vantaggi e svantaggi connessi all'uso delle fibre ottiche.

A) Vantaggi

- 1) Bassa attenuazione (inferiore a quella dei cavi coassiali);
- 2) Attenuazione costante al variare della frequenza;
- 3) Alta velocità di trasmissione (fino a 140 Mb/s);
- 4) Costi più bassi, in relazione alla larghezza di banda;
- 5) Immunità alle interferenze elettromagnetiche;
- 6) Assenza di modulazione incrociata;
- 7) Peso e dimensioni inferiori ai cavi tradizionali;
- 8) Sicurezza, in quanto è più difficile l'intercettazione dell'informazione;

- 9) Isolamento completo tra trasmettitore e ricevitore;
- 10) Resistenza alla corrosione;
- 11) Immunità nei cortocircuiti;
- 12) Resistenza agli aumenti di temperatura;
- 13) Miglioramento delle qualità dei segnali e riduzione degli errori;
- 14) Possibilità di effettuare riparazioni senza disattivare trasmettitore e ricevitore.

B) Svantaggi

- 1) Difficoltà di messa in opera, date le dimensioni ridotte;
- 2) Difficoltà di riparare i guasti;
- 3) Sensibilità alle radiazioni nucleari;
- 4) Difficoltà costruttive, date le esigenze di grande purezza del materiale.

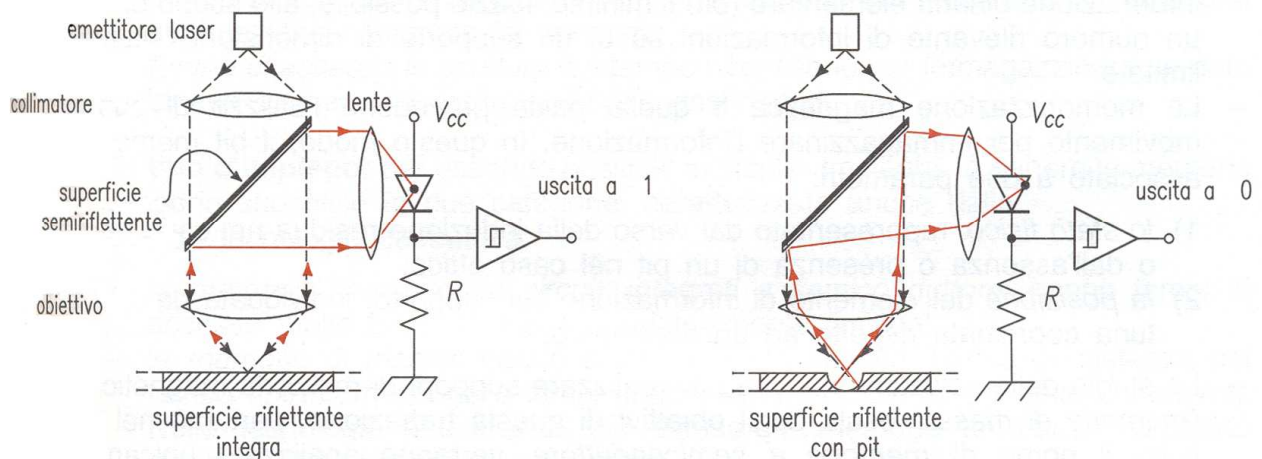
MEMORIZZAZIONE OTTICA

La memorizzazione ottica è basata sulla riflessione di un fascio di luce (tipicamente il LASER) su di una superficie, che costituisce il supporto per l'informazione da immagazzinare.

Per descrivere il principio di funzionamento di un sistema che sfrutta la memorizzazione ottica, per l'immagazzinamento e la lettura delle informazioni, analizzeremo i processi di lettura, scrittura e cancellazione dei supporti ottici.

Letture

La figura seguente mostra lo schema di principio del sistema in esame.



Il raggio LASER viene collimato, cioè reso un fascio parallelo, e attraversa una superficie semiriflettente sino a raggiungere un obiettivo che lo focalizza in corrispondenza della superficie riflettente.

Se la superficie è integra i raggi vengono riflessi in modo tale da eccitare un fotodiode, innalzando, così, il potenziale all'ingresso del buffer (attraverso il resistore passa corrente e quindi vi è una caduta di tensione).

Se sulla superficie riflettente è stato praticato un piccolo avvallamento (pit), i raggi riflessi non incidono perfettamente sulla zona attiva del fotodiode e, perciò, all'ingresso del buffer di uscita, si avrà un livello basso di tensione.

In definitiva si può associare all'assenza dell'avvallamento un livello logico alto, mentre alla presenza di esso un livello logico basso.

Come si può notare dalla figura il buffer è triggerato. Ciò per ridurre la probabilità di errore, allargando il campo di valori da superare per commutare di livello e quindi rendendo il segnale d'uscita più stabile.

Scrittura

E' evidente che il processo di scrittura consiste nel praticare un piccolo affossamento o meno sulla superficie del supporto. Il modo classico per generare l'affossamento è colpire la superficie con un fascio LASER di potenza sufficiente.

Cancellazione

I supporti sui quali è possibile la cancellazione (e la successiva riscrittura dei dati) sono formati da un particolare materiale sul quale i pit vengono realizzati riscaldando e

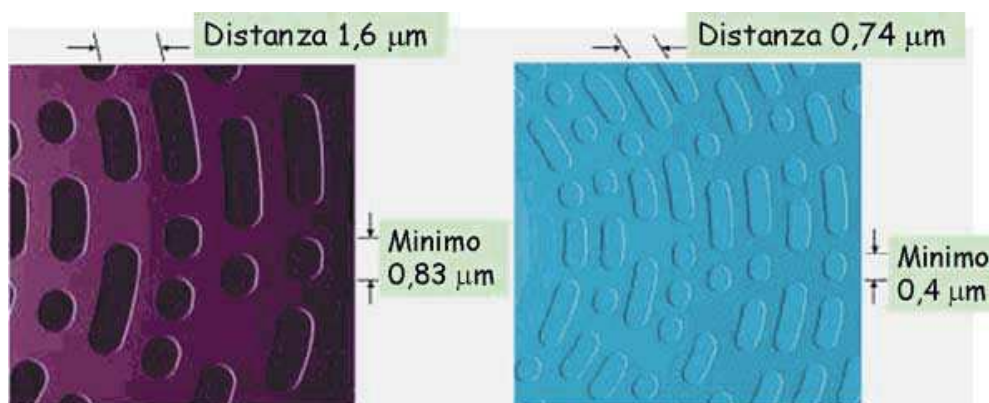
raffreddando opportunamente la superficie, in modo da rendere la struttura atomica amorfa e non riflettente allo stesso modo.

Nel processo di cancellazione il materiale viene riscaldato ad una temperatura leggermente superiore a quella di cristallizzazione e viene fatto raffreddare lentamente, in modo che gli atomi riassumano la struttura ordinaria.

Standard CD e DVD

I supporti di memorizzazione ottica più diffusi ad oggi sono i *CD* (Compact Disc) e i *DVD* (Digital Versatile Disc). Entrambi sono dischi di memorizzazione ottica, sui quali i dati sono immagazzinati sottoforma di pit.

I DVD hanno una capacità maggiore rispetto ai CD, in quanto i pit sono di dimensioni ridotte e più vicini fra loro. Di conseguenza il raggio LASER utilizzato dai DVD ha una lunghezza d'onda inferiore a quella dei CD, e l'apertura numerica per i supporti DVD è superiore a quella dei CD.



Un'ulteriore differenza tra CD e DVD è che questi ultimi hanno un substrato più sottile, che consente di limitare gli effetti della non corretta inclinazione tra il raggio di luce incidente e il substrato stesso, tuttavia per mantenere una buona robustezza lo spessore del disco è uguale a quello dei CD.

Utilizzando materiali, dispositivi e LASER opportuni, con le tecnologie usate per lo standard DVD è possibile ottenere dischi con due facce per la memorizzazione ed addirittura, eventualmente, due substrati per ogni faccia; moltiplicando la capacità del disco. Nella tabella seguente è riassunto un confronto completo tra i CD e i DVD:

Parametro	DVD	CD	
Lati (side)	1 o 2	1	Sono previsti DVD a doppia faccia e a doppio strato per un totale di 4 formati fisici
Strati (layer)	1 o 2	1	
Capacità [GB]	Da 4,7 a 17	0,68	1 GB è pari a 10^9 byte (parola da otto bit), in ambito informatico spesso si indica con 1 GB la capacità di $1024^3=2^{30}$ byte.
Diametro esterno [mm]	120	120	Sono previste anche versioni DVD con diametro 80 mm
Spessore del substrato [mm]	0,6	1,2	
Distanza fra le tracce [μm]	0,74	1,6	
Minima lunghezza dei pit [μm]	0,4	0,83	
Lunghezza d'onda [nm]	650	780	Del diodo laser di riproduzione
Apertura numerica	0,6	0,45	
Velocità lineare [m/s]	3,49	1,3	Velocità nominale 1x
Modulazione (codice di canale)	8 a 16	EFM (Eight to Fourteen Modulation)	EFM è un codice 8 a 14
Codice di protezione dagli errori	RSPC (Reed Solomon-Product Code)	ECC	
Tracce	No	Si	Il DVD usa una struttura a file, non a tracce

BIBLIOGRAFIA

- U. Amaldi**, *La Fisica*, Zanichelli
- D. Halliday/ R. Resnick**, *Fisica generale*, CEA
- E. Segrè**, *Personaggi e scoperte della fisica contemporanea*, Mondadori
- A. Pais**, *Sottile è il Signore...*, Boringhieri
- J. Stachel**, *L'anno memorabile di Einstein*, Dedalo
- A. Garuccio**, *L'effetto fotoelettrico* (dispensa universitaria)
- J. Schwinger**, *L'eredità di Einstein*, Zanichelli
- Le Scienze*, *L'eredità di Einstein* (n°435)
- G. Portaluri/ E. Bove**, *Tecnologie e disegno per la progettazione elettronica*, Tramontana
- A. Cavallini/ D. Del Col**, *Conversione fotovoltaica* (dispensa universitaria)
- F. Giorgis**, *LASER e LED* (dispense universitarie)
- L. Prencipe/ M. Russo/ R. Sergi**, *Reti fotoniche* (tesi di specializzazione)
- D. Tomassini**, *Corso di Telecomunicazioni*, Tecna
- M. Antonelli/ M. Salza**, *Corso di Telecomunicazioni*, Hoepli
- S. Mirandola**, *Corso di Elettronica*, Calderini
- M. Barbero/ N. Shpuza**, *Il disco ottico versatile (DVD)*, Elettronica e Telecomunicazioni (n°3 Dicembre 2002)