



SORGENTI LUMINOSE ARTIFICIALI

Sommario

Tipologie di sorgenti luminose artificiali	2
Efficienza luminosa.....	2
Emissione luminosa per incandescenza	5
Lampade ad incandescenza	6
Emissione luminosa per scarica elettrica in gas	19
Lampade fluorescenti	21
Lampade allo xenon.....	33
Lampeggiatore elettronico	38
Altre lampade a scarica elettrica	46
LED	52
Laser.....	67
Tipi di laser	84
Diodo laser (laser a semiconduttore).....	93

Tipologie di sorgenti luminose artificiali

I tipi di sorgenti luminose elettriche fondamentali per l'illuminazione sono classificabili in base alla modalità di generazione della luce:

- lampade ad incandescenza,
- lampade a scarica elettrica in gas (con o senza rivestimento fluorescente),
- lampade a ricombinazione di coppie elettrone-lacuna,
- lampade ad emissione luminosa stimolata.

Le lampade ad incandescenza sono radiatori per temperatura, come in natura il sole. Parte del calore prodotto dalla lampada è emesso sotto forma di luce.

Le lampade a scarica elettrica in gas sono radiatori per luminescenza, come in natura il fulmine. La luce emessa da queste lampade non è un sottoprodotto del calore, bensì è dovuta alla trasformazione diretta dell'energia elettrica in energia luminosa.

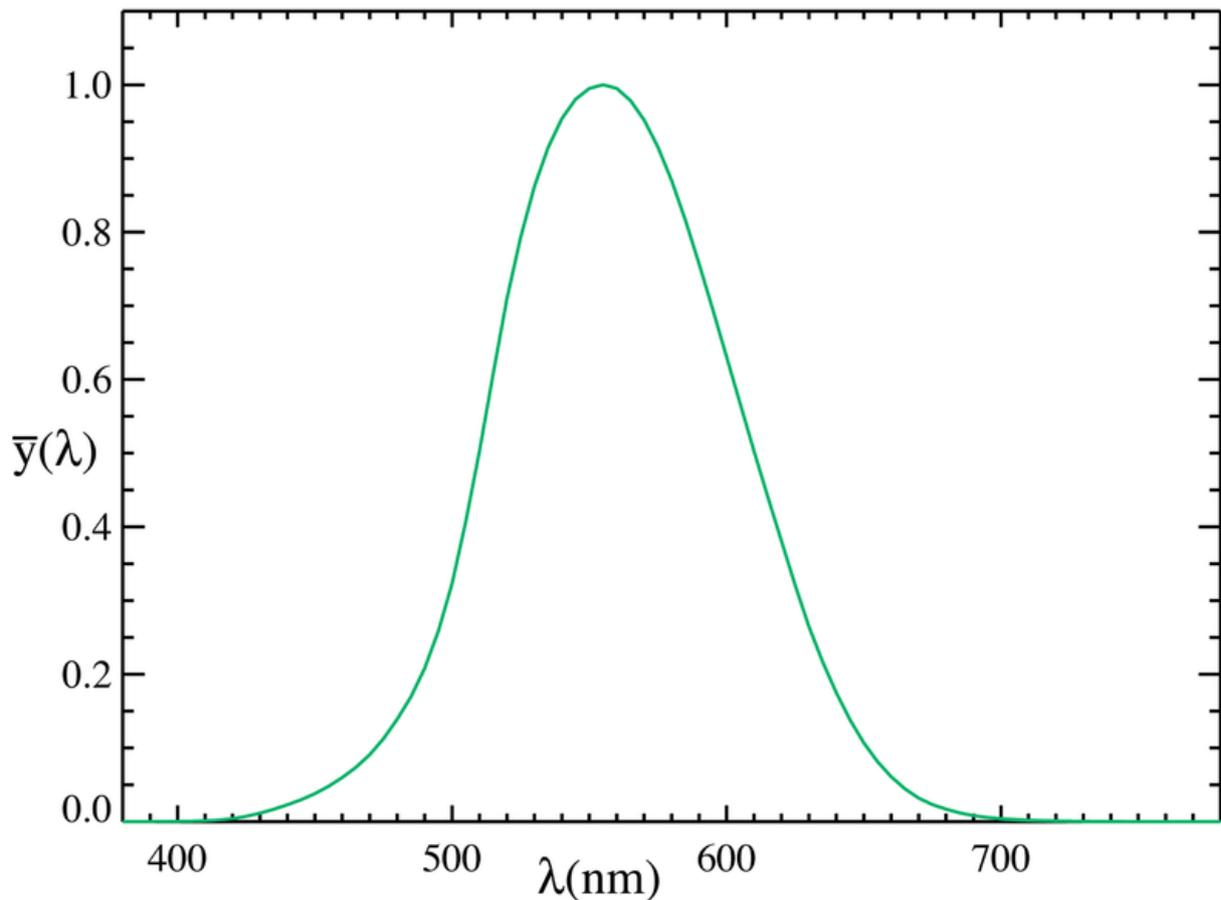
Le lampade a ricombinazione di coppie elettrone-lacuna sfruttano le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni di colore definito dalla differenza di energia tra i livelli di elettroni e lacune.

Le lampade ad emissione luminosa stimolata sono dispositivi in grado di emettere un fascio di luce coerente, monocromatico e (con alcune eccezioni) collimato.

Efficienza luminosa

L'efficienza luminosa di una sorgente di luce è il **rappporto tra flusso luminoso emesso e flusso totale di energia (potenza) emesso** da una sorgente.

Il flusso luminoso è definito in base alla percezione soggettiva dell'occhio umano medio e corrisponde alla sua curva di sensibilità nella banda elettromagnetica dello spettro visibile.



Poiché una lampada, indipendentemente dal suo principio di funzionamento, genera anche radiazioni esterne allo spettro visibile che non contribuiscono alla sensazione di luminosità (ad esempio, raggi UV e IR), la sua efficienza luminosa è tanto più alta quanto maggiore è la sua capacità di emettere uno spettro adatto alla percezione umana.

L'efficienza luminosa è espressa in **lumen/watt [lm/W]** ed il suo valore massimo teorico è di **683,002 lm/W**.

L'efficienza di una lampada ad incandescenza è di circa 14 lm/W, mentre quella di una lampada alogena può arrivare fino a 20 lm/W. L'efficienza luminosa aumenta significativamente nelle lampade a scarica elettrica, come dimostrato da quelle fluorescenti che sono in grado di giungere fino a 60 lm/W. Altre sorgenti luminose ad alta efficienza sono i LED, seppur ancora soggetti a limiti tecnologici.

Efficienza luminosa delle sorgenti di luce artificiali			
Categoria	Tipo	Efficienza luminosa [lm/W]	Efficienza luminosa [%]
Max teorico, $\lambda = 555 \text{ nm}$		683,002	100
Combustione	Candela	0,3	0,04
Incandescenza	Tungsteno, 5 W	5	0,7
	Tungsteno, 40 W	12,6	1,9
	Tungsteno, 100 W	17,5	2,6
	Tungsteno, alta temperatura	35	5,1
	Alogena, bulbo in vetro	16	2,3
	Alogena, bulbo in quarzo	24	3,5
Fluorescenza	Compatta, 5-24 W	45-60	6,6-8,8
	Tubo T12, 34 W	50	7
	Tubo T8, 32 W	60	9
	Tubo T8, 36 W	≤ 93	≤ 14
	Tubo T5, 28 W	104	15,2
	Sodio, alta pressione	150	22
	Sodio, bassa pressione	183-200	27
Arco	Xenon	30-50	4,4-7,3
	Mercurio-Xenon	50-55	7,3-8
LED	Bianco	26-70	3,8-10,2

Emissione luminosa per incandescenza

La lampadina ad incandescenza è stata inventata nel 1854 da Heinrich Goebel, un orologiaio tedesco emigrato in America. Nel 1878 Thomas Alva Edison riuscì a costruirne un modello sufficientemente durevole. Ma già nel 1860, Joseph Wilson Swan aveva costruito una lampadina simile, continuando a perfezionarla fino al 1878 e divenendo quindi socio di Edison. Poco prima della sua morte, Heinrich Goebel riuscì a far valere i propri diritti d'inventore, che successivamente Edison acquistò dalla vedova Goebel.

Le prime lampade di questo tipo, prodotte a partire dal 1880, sfruttavano un filamento di carbonio, ottenuto bruciando un sottilissimo filo di cotone. Il filamento, racchiuso in un'ampolla di vetro nella quale si faceva il vuoto, diventava incandescente senza consumarsi. Le prime lampade ad incandescenza così realizzate fornivano una luce rossastra con una potenza luminosa pari a circa 2,5 lm/W.



Nel 1903 l'americano William Coolidge introdusse l'uso del filamento di tungsteno, impiegato tuttora. Questo metallo presenta la caratteristica di incrementare la sua resistenza elettrica all'aumentare della temperatura. Un aumento della tensione elettrica di alimentazione provoca un aumento della potenza dissipata ed una temperatura superiore del filamento. Nella lampadina al tungsteno questo comporta un aumento della resistenza con conseguente diminuzione della potenza. Questo sistema è in grado, a differenza delle lampadine precedenti, di autocompensare parzialmente l'instabilità della tensione di alimentazione.

Il filamento di tungsteno consente un'ampia varietà nelle illuminazioni artificiali in generale ed in quella fotografica in particolare. Per usi fotografici, si hanno così lampade a filamento di tungsteno, lampade a filamento di tungsteno survoltate, lampade Nitraphot, lampade Photoflood, lampade con riflettore incorporato, lampade quarzo-alogene e lampade da proiezione.

Lampade ad incandescenza

Lampade a filamento di tungsteno

Sono sorgenti luminose in cui la luce è generata dal riscaldamento fino a circa 2800 K di un **filamento di tungsteno (W – punto di fusione: 3695 K)** attraversato da corrente elettrica.



Per incrementare l'efficienza della lampada, il filamento è costituito da un sottilissimo filo accolto a spirale. Ad esempio, una lampada da 60 W ha un filamento che, disteso, raggiunge una lunghezza di 600 mm ed ha un diametro di 0,050 mm.

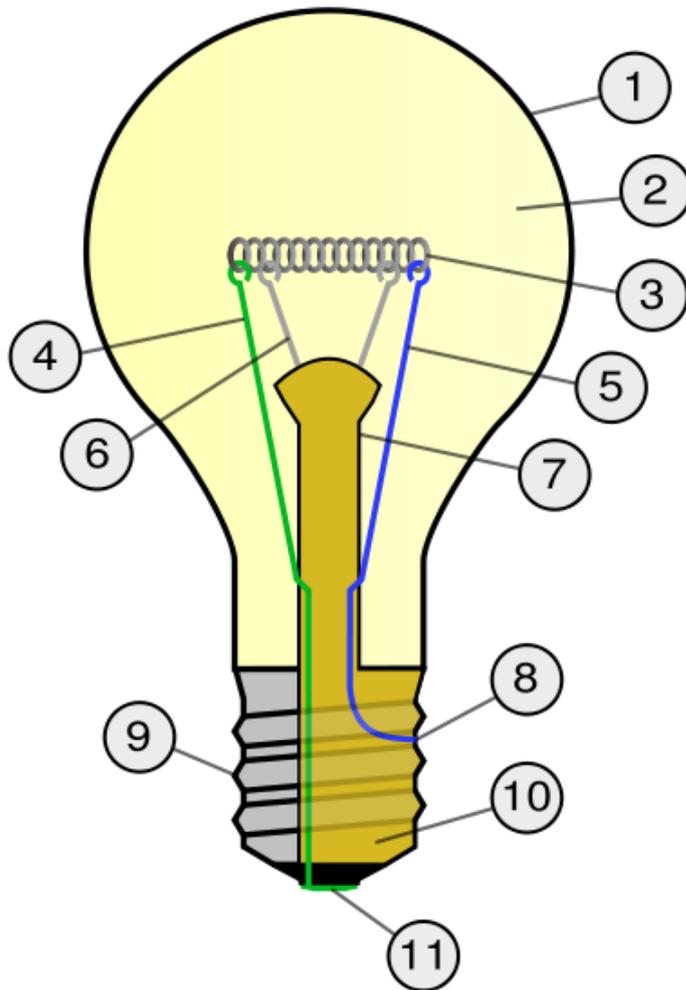
La resistenza del filamento è data dalla relazione seguente:

$$R = \rho \cdot (L/S)$$

dove: ρ = resistività del materiale costituente il filamento, $f(T)$;
L = lunghezza effettiva del filamento,
S = sezione trasversale del filamento.

Nelle lampadine moderne, il bulbo di vetro non è vuoto ma contiene un gas inerte a bassa pressione, di solito argon (Ar), più raramente kripton (Kr), che ha il compito di ridurre i rischi di implosione e di prolungare la vita del filamento. Inoltre la presenza del gas inerte limita l'annerimento del bulbo dovuto al deposito del tungsteno che evapora.

Il bulbo di vetro ha uno spessore ottimizzato per temperature di esercizio di 200-260 °C e può essere trasparente, smerigliato od opalizzato; in questi ultimi due casi, si ha una considerevole riduzione della luminanza.



Schema di una lampada ad incandescenza:

- 1) **Bulbo in vetro**
- 2) **Gas inerte**
- 3) **Filamento di tungsteno**
- 4) **Filo di andata**
- 5) **Filo di ritorno**
- 6) **Supporto del filamento**
- 7) **Supporto della lampada**
- 8) **Contatto con la base**
- 9) **Base a vite**
- 10) **Isolante**
- 11) **Contatto sulla base**

A causa della temperatura di colore limitata a circa 2800 K, le lampade a filamento di tungsteno presentano una predominanza di radiazioni rosse rispetto alla luce diurna. Il loro uso fotografico, dunque, è limitato all'abbinamento con emulsioni in bianco e nero. La facile reperibilità di queste lampade, acquistabili anche in normali negozi di materiale elettrico, e la loro lunga durata ne consente l'uso fotografico in sistemi e in condizioni in cui la scarsa temperatura di colore non sia un impedimento per la ripresa.

Al momento dell'accensione della lampada, poiché il filamento è freddo e la sua resistenza è bassa, si determina un picco della durata di pochi decimi di secondo e del valore di 10-12 volte la corrente a regime.

Uno dei principali problemi è rappresentato dalla sublimazione del filamento. Infatti, minime variazioni della resistività lungo il filamento causano la formazione di **punti caldi**, con resistività più alta. La sublimazione nei punti caldi è più rapida che nel resto del filamento, riducendo in questi siti il diametro della sezione ed aumentandone conseguentemente la resistenza elettrica; il processo degenerativo si

autoalimenta portando inevitabilmente alla rottura del filamento. Una variazione del diametro dell'1% riduce del 25% la vita utile della lampada. Inoltre, la rottura del filamento può causare la formazione di un arco elettrico, con conseguenti sovracorrenti di elevata intensità.

Il gas inerte presente nel bulbo ha proprio il compito di ridurre la sublimazione del tungsteno, sia migliorando il raffreddamento del filamento sia limitando la sublimazione.

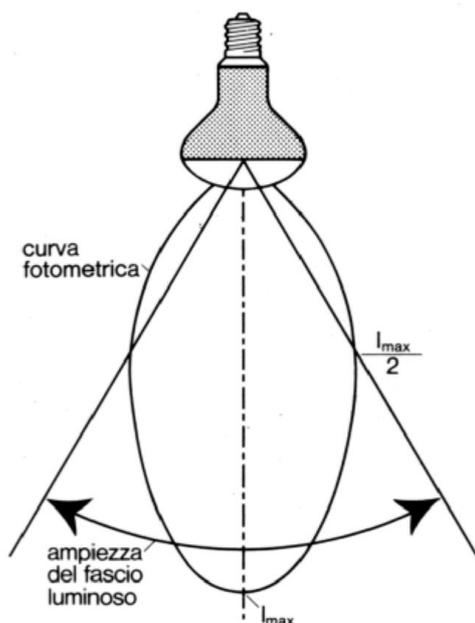
Nel corso del normale impiego, il tungsteno sublima ad una velocità tanto più rapida quanto più alta è la temperatura del filamento e quindi quanto maggiore è l'efficienza luminosa di questo. La vita utile della lampada è quindi un compromesso tra efficienza e durata. Di norma, le lampade sono progettate per una vita utile compresa tra 500 e 2000 ore, con un valore medio di 1000 ore. Le lampade per usi teatrali, fotografici e proiezionistici possono durare anche solo poche ore a causa della combinazione di elevate potenze luminose e dimensioni compatte.

In una lampada convenzionale, il tungsteno sublimato condensa sulla superficie interna del bulbo, che si trova ad una temperatura notevolmente più bassa del filamento, e lo annerisce. Nei vecchi tipi di lampade sotto vuoto, l'interno del bulbo veniva annerimento in modo uniforme. Negli attuali tipi di lampade con gas inerte all'interno, il tungsteno sublimato è soggetto a moti convettivi che lo depositano preferenzialmente sulla parte interna superiore del bulbo.

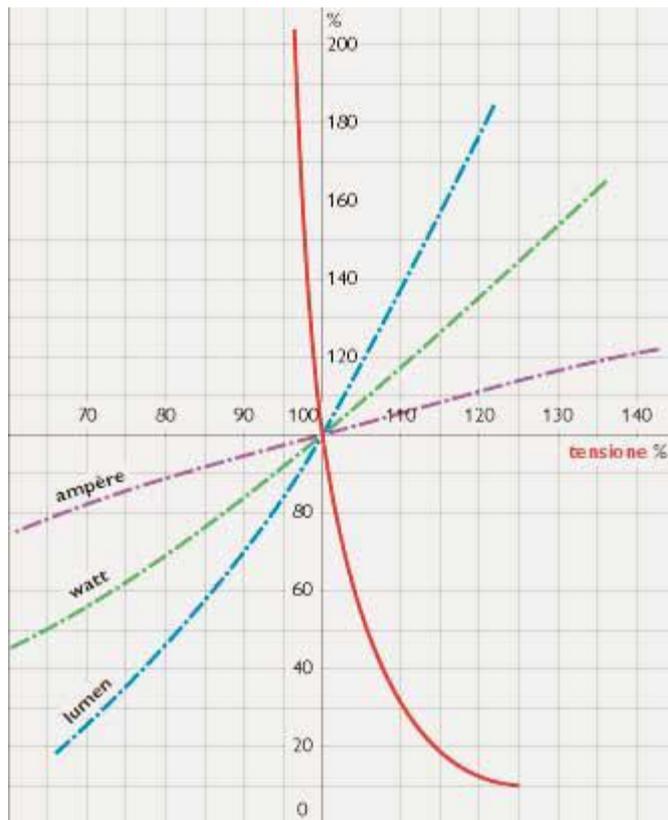
L'energia elettrica assorbita è convertita essenzialmente in calore e per il 5-10% in radiazione dello spettro visibile.

Lampade a filamento di tungsteno					
Potenza nominale [W]	Tensione nominale [V]	Flusso luminoso [lm]		Efficienza luminosa [lm/W]	
		125 V	220 V	125 V	220 V
25		220	220	8,8	8,8
40		430	350	10,8	8,8
60		750	630	12,5	10,5
100	220/230	1400	1250	14,0	12,5
150	230/240	2300	2090	15,4	14,0
200	250/260	3200	2920	16,0	14,6
300		4950	4610	16,5	15,3
500		8800	8300	17,6	16,6
1000		19100	18600	19,1	18,6

L'efficienza luminosa aumenta con la potenza della lampada. Le lampade a bassa tensione hanno un'efficienza luminosa superiore poiché i loro filamenti, di maggior diametro, possono sopportare un carico più elevato. La durata dipende strettamente dalla tensione di esercizio.



L'ampiezza del fascio luminoso, per definizione, è determinata dalle direzioni d'intensità luminosa pari a metà del massimo.



Il colore della luce è bianco caldo; la resa dei colori è buona, con accentuazione delle tonalità rosse e gialle e con indebolimento delle tonalità verdi e azzurre.



Le lampade ad incandescenza a riflettore incorporato sono caratterizzate da un bulbo specchiato internamente (mediante argentatura o alluminatura) dal quale la luce viene convogliata in un fascio luminoso più o meno concentrato. Con un'appropriata esecuzione dello strato riflettente, la radiazione termica nel fascio luminoso può essere ridotta di circa il 75% (lo strato riflettente è trasparente alla radiazione termica). Con queste lampade a specchio freddo è quindi possibile illuminare intensamente anche oggetti sensibili al calore. Le lampade a riflettore incorporato in vetro pressato resistono agli sbalzi di temperatura e possono pertanto essere utilizzate senza protezione anche all'aperto.

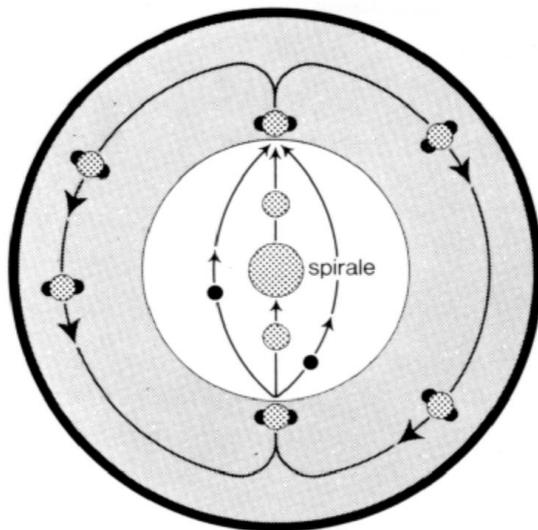
Lampade alogene

Un'esigenza molto sentita in fotografia è di avere lampade di ingombro contenuto, con flusso luminoso e temperatura di colore elevati. Queste esigenze vengono soddisfatte dalle **lampade quarzo-alogene o, più semplicemente, lampade alogene**.

Al gas contenuto nel bulbo viene aggiunto iodio (I_2), kripton (Kr) ed eventualmente xenon (Xe) per permettere un maggiore riscaldamento del filamento rispetto alle lampade tradizionali, in modo da aumentare

l'efficienza luminosa ed innalzare la temperatura di colore a valori tipicamente di 3200 K e 3400 K.

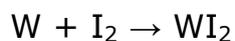
Nelle lampade quarzo-alogene, l'alogeno presente all'interno del bulbo contrasta i fenomeni degenerativi propri delle lampade con filamento al tungsteno, così dannosi alla ripresa fotografica.



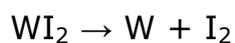
zona chiara: temperatura oltre 1400 °C
 zona scura: temperatura sotto 1400 °C

● spirale ● tungsteno ● alogeno
 ● alogenuro
 (composto di alogeno e tungsteno)

Quando la lampada quarzo-alogena è accesa, il tungsteno sublima allontanandosi dal filamento. In vicinanza della parete interna del bulbo in quarzo, dove la temperatura del gas scende sotto 1400 °C, si combina con l'alogeno:



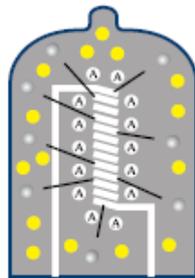
Successivamente, i moti convettivi portano lo ioduro di tungsteno formatosi in prossimità del filamento, dove la temperatura è superiore a 1400 K:



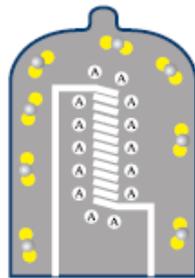
la molecola si decompone liberando il tungsteno, che si deposita sul filamento, e lo iodio, che ritorna in circolo. In questo modo, la durata di una lampada alogena può essere almeno doppia di una lampada tradizionale, sebbene il filamento sia decisamente più caldo.

La sostituzione dell'argon con lo xenon permette di ridurre ulteriormente la sublimazione del tungsteno dal filamento, con conseguente allungamento della vita utile della lampada.

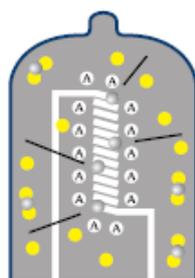
CICLO ALOGENO - TUNGSTENO



Le tradizionali lampade ad incandescenza hanno una durata di vita non elevata perdendo luminosità in quanto il tungsteno - data l'elevata temperatura di esercizio (2700°C) del filamento - tende ad evaporare dal filamento per depositarsi sulla parete interna del bulbo.



Nel cosiddetto ciclo degli alogeni, gli alogeni aggiunti al gas di riempimento del bulbo si legano al tungsteno evaporato che, trovandosi in prossimità del filamento caldo (3200°C), si dissocia nuovamente depositandosi sul filamento stesso ricostituendolo.

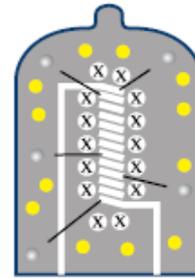


Il fenomeno viene favorito dalla presenza di un gas - di solito argon - il quale avvolgendo la superficie del filamento limita la possibilità che gli atomi di tungsteno possano allontanarsi dallo stesso, estendendo la durata di vita rispetto ad una normale lampada ad incandescenza.



- Iodio (alogeno)
- Tungsteno
- ⊗ Argon

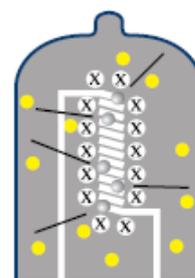
CICLO ALOGENO/XENON - TUNGSTENO



Per esaltare l'efficacia del ciclo degli alogeni, viene impiegato in aggiunta un gas - lo XENON - con peso atomico molto più elevato.



Il peso atomico più alto comporta un maggior "ingombro" della struttura atomica per cui la maglia che avvolge il filamento diventa ancora più fitta ed è più difficile per il tungsteno vaporizzato evitare la collisione con il gas che ne accelera e ne incrementa il processo di riposizionamento sul filamento.



Effetto: estensione della durata di vita rispetto alla normale lampada ad alogeni, grazie ad una forte **riduzione del processo di sublimazione** (passaggio dallo stato solido a quello gassoso) del filamento di tungsteno e quindi dell'assottigliamento dello stesso.



- Iodio (alogeno)
- Tungsteno
- ⊗ Xenon

*Constant Light e DR111, 8.000 ore

Affinché il ciclo termochimico, noto come **ciclo alogeno**, sia operativo e la lampada sia compatta, si deve ridurre la distanza tra bulbo e filamento. Poiché il bulbo in queste condizioni deve avere una temperatura non inferiore a 250°C, si utilizza silice (quarzo) o vetro speciale ad alto punto di fusione (tipo alluminosilicato). Entrambi i materiali presentano un'elevata resistenza meccanica che, come vantaggio secondario non trascurabile, consente di aumentare la pressione interna del gas, riducendo ulteriormente la sublimazione del filamento.



I limiti di questi dispositivi sono riconducibili all'emissione di raggi ultravioletti, dannosi per l'occhio umano e causa di sbiadimento degli oggetti illuminati. Il fenomeno è in parte dovuto all'uso del quarzo al posto del vetro per la costruzione del bulbo: se il quarzo è più resistente alle alte temperature, è però trasparente ai raggi ultravioletti. Per schermare queste radiazioni, è sufficiente porre una lastra di vetro davanti alla lampada. Per ridurre il flusso di raggi infrarossi verso oggetti danneggiabili da un eccessivo riscaldamento, si possono utilizzare le **lampade alogene dicromatiche**, dotate di uno schermo posteriore che riflette solamente la luce visibile lasciando disperdere i raggi infrarossi.



Nelle lampade ad alta potenza a sviluppo lineare, il filamento è supportato ad intervalli regolari per mantenerlo in posizione lungo l'asse del bulbo e proteggerlo da cedimenti meccanici indotti da urti e dall'elevata temperatura di esercizio.



Il rendimento luminoso di una lampada alogena, grazie alla luce più bianca rispetto ad una lampadina tradizionale, è del 50-100% superiore rispetto a questa, mentre la vita utile varia da 2000 a 6000 ore.

Recentemente sono state introdotte lampade alogene con filamenti migliorati e/o alimentazione a controllo elettronico (integrato nel bulbo stesso), che hanno consentito un incremento di resa del 40% circa rispetto alle alogene convenzionali. Inoltre sono disponibili anche con le stesse forme delle lampadine ad incandescenza e presentano temperature di esercizio paragonabili. Risulta evidente il vantaggio in termini di risparmio energetico, senza rinuncie in fatto di qualità o design.

Inoltre, sono disponibili lampade alogene alimentate direttamente dalla rete elettrica a 230 V, in genere di potenza elevata, fino a 1000 W. Altri modelli, molto piccoli e adatti ad illuminazioni localizzate e di arredo, sono alimentate ad 12 V (bassissima tensione) per mezzo di un trasformatore. In questo caso la lunghezza della linea a 12 V deve essere limitata a pochi metri per contenere la caduta di tensione entro valori accettabili.



Il bulbo delle lampadine alogene non deve essere toccato con le dita, poiché i depositi di grasso lasciati sul medesimo carbonizzerebbero alla prima accensione a causa della temperatura elevata, annerendo il cristallo e provocandone al limite anche la rottura. Il deterioramento del vetro di quarzo è causato dall'azione catalitica dei residui organici, che innescano un processo di devetrificazione. Il vetro di quarzo è infatti meno stabile dei vetri ordinari. In caso di contatto con la pelle, è consigliabile pulire la superficie con alcool.

A causa delle temperature di esercizio molto elevate, è necessario lasciare raffreddare le lampade quarzo-alogene per almeno dieci minuti prima di poterle maneggiare. Allo spegnimento, il vapore di iodio produce un bagliore rosato: la lampada non deve assolutamente essere toccata fino a quando non scompare questa colorazione.

Emissione luminosa per scarica elettrica in gas

Il fenomeno dell'emissione di luce da parte di una scarica elettrica è stato studiato a partire dalla seconda metà del XIX secolo da scienziati quali Charles Wheatstone e Jean Foucault.

Il principio di funzionamento si basa sull'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un **plasma di gas ionizzato mediante una scarica elettrica** che lo attraversa. I gas o i vapori metallici vengono eccitati dal passaggio della corrente elettrica e indotti ad emettere energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, con lunghezze d'onda che dipendono anche dalle condizioni di pressione presenti nella lampada e che possono estendersi dal campo dell'ultravioletto a quello dell'infrarosso.

La struttura di questo tipo di lampade è fondamentalmente costituita da un'ampolla o un tubo di vetro o quarzo contenente il gas, almeno due elettrodi tra cui avviene la scarica ed eventuali elettrodi supplementari per l'innesco. Solitamente le lampade a bassa pressione sono a forma di tubo diritto o curvato ad U, mentre le lampade ad alta pressione sono costituite da una piccola ampolla in quarzo (più adatto del vetro a resistere a temperature elevate). La lampada può essere contenuta in un involucro in vetro, con la funzione di schermare i raggi ultravioletti, ospitare eventuali elementi accessori e proteggere il tubo emettitore.

L'emissione luminosa è monocromatica o limitata alle righe di emissione spettrale del gas contenuto, se questo è a bassa pressione.

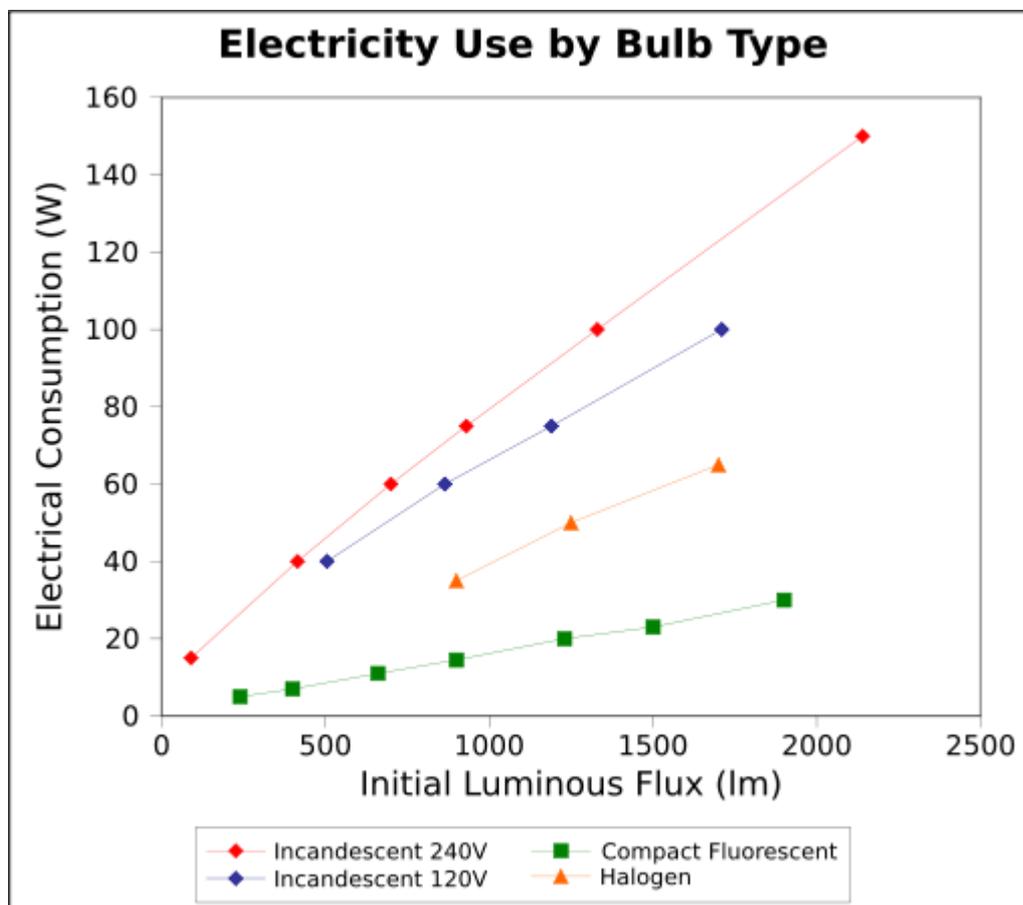
Il gas può anche essere il vapore di un elemento solido o liquido, ad esempio mercurio (Hg) o sodio (Na). In questo caso, l'accensione della lampada comporta un livellamento progressivo, invece che immediato, del flusso luminoso al valore a regime, in quanto è necessario che il materiale evapori o sublimi per effetto del calore prodotto dalla scarica nel gas e quindi possono trascorrere diversi minuti prima che la generazione di luce raggiunga il livello ottimale, e in alcuni casi questo è un grave limite.

Poiché la tensione di rete non è sufficiente ad innescare la scarica, cioè la ionizzazione del gas, occorre provocare un momentaneo aumento della tensione di alimentazione per mezzo di trasformatori e starter o applicare un impulso di alta tensione (migliaia di volt) ad un elettrodo posto sulla superficie esterna del tubo. In altri tubi è presente un elettrodo di innesco a brevissima distanza da uno dei due elettrodi ordinari. Questo elettrodo viene brevemente alimentato con la normale tensione di rete, sufficiente ad innescare un piccolo arco, con conseguente riscaldamento ed emissione di ioni e radiazioni che causano l'innesco del restante gas.

Un modo ulteriore per accendere la lampada è di sottoporla ad un campo elettromagnetico ad alta frequenza, da decine di kilohertz a molti megahertz. Nelle lampade ad induzione non esistono connessioni elettriche tra interno ed esterno del tubo ed il gas è ionizzato mediante radiazione elettromagnetica indotta dall'esterno. Se si avvicina una lampada fluorescente all'antenna di un potente trasmettitore radio si può osservare un'emissione luminosa.

Una volta innescata la scarica, questa si propaga a valanga a tutto il gas ionizzandolo. A regime, la tensione ai capi del tubo si mantiene a valori più bassi della tensione di rete, e non è più necessario l'intervento dei circuiti accenditori.

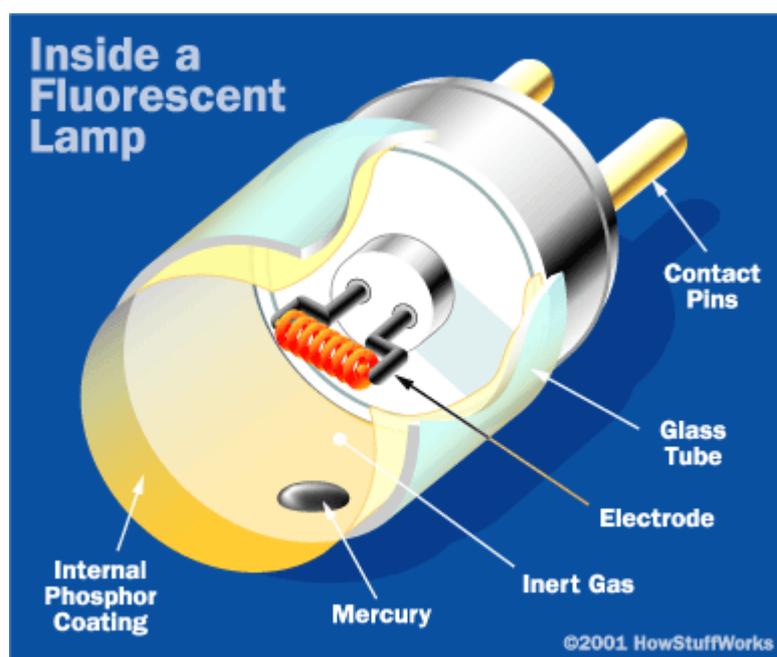
Le lampade a scarica hanno una durata ed un'efficienza luminosa notevolmente superiori a quelle delle lampade a incandescenza.



Lampade fluorescenti

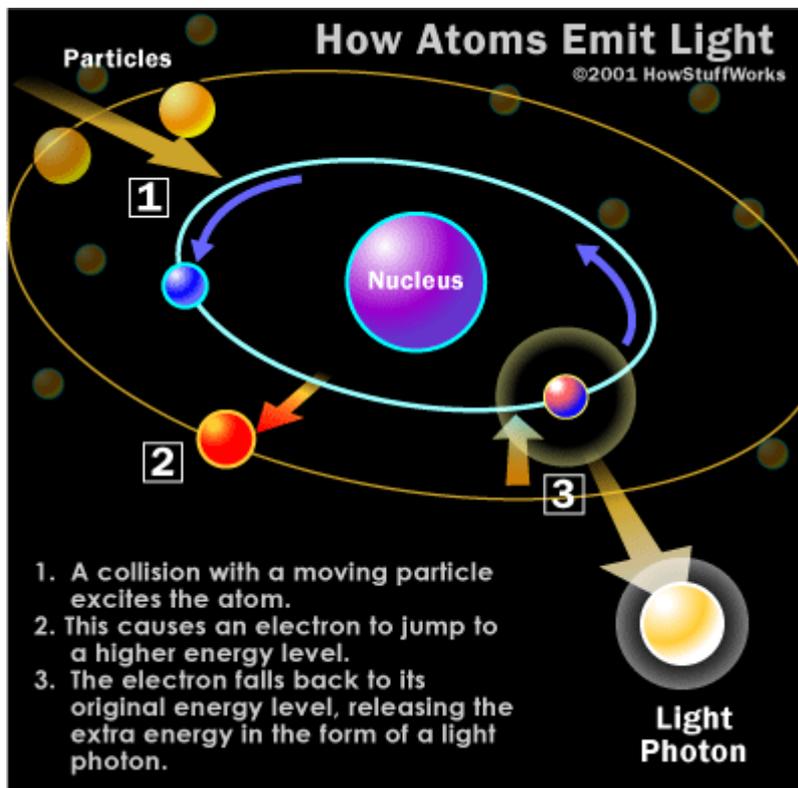
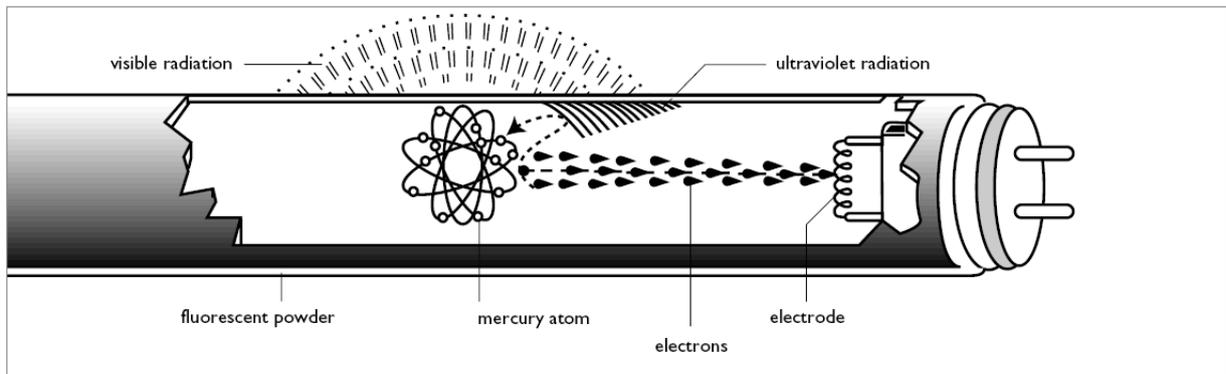
Queste lampade a scarica generano un'**emissione luminosa visibile indiretta**, poiché la radiazione elettromagnetica prodotta dal gas ionizzato è convertita in luce visibile da un **materiale fluorescente**.

Sono costituite da un tubo di vetro, lineare, circolare o variamente sagomato, al cui interno è dapprima praticato il vuoto e successivamente introdotto un gas a bassa pressione costituito da mercurio allo stato vapore ed argon (Ar) o xenon (Xe) o, più raramente, da argon-neon (Ar, Ne) o anche kripton (Kr). La superficie interna del tubo è rivestita da un sottile strato fluorescente (talvolta anche debolmente fosforescente) composto da miscele di varia composizione, a base di sali fosforati di metalli di transizione o terre rare, i cosiddetti **fosfori**, dall'aspetto di polvere bianca. Gli elettrodi del tubo sono costituiti da filamenti di tungsteno (W), avvolti a spirale e rivestiti da una miscela di ossidi di bario, stronzio e calcio (rispettivamente BaO, SrO e CaO), scelti per la loro relativamente bassa temperatura di emissione termoionica.



All'accensione, la corrente elettrica riscalda il catodo ad una temperatura sufficiente perché emetta elettroni. Questi elettroni impattano contro gli atomi del gas nobile circostante il catodo, formando un **plasma per ionizzazione da urto anelastico**. La ionizzazione a valanga incrementa rapidamente la conducibilità del gas, permettendo il passaggio nella lampada di correnti elettriche di maggiore intensità. Il mercurio, presente all'interno del tubo con un rapporto di equilibrio tra fase liquida e fase

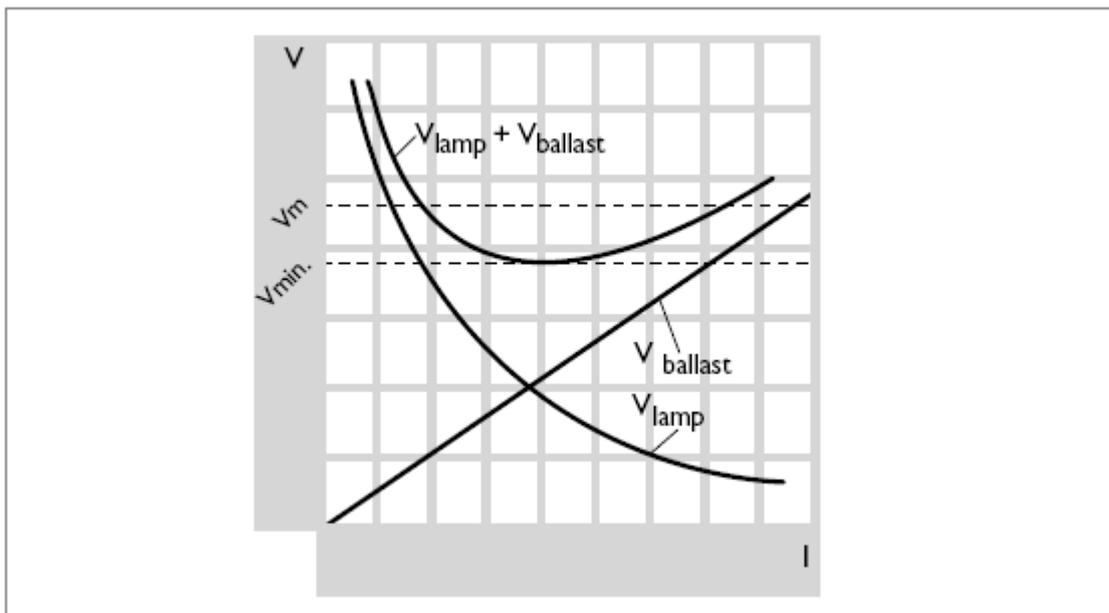
vapore di circa 1:10.000 (con il gas nobile ad una pressione pari a circa lo 0,3% della pressione atmosferica standard), viene ionizzato a sua volta ed emette radiazioni ultraviolette, prevalentemente alle lunghezze d'onda di 253,7 nm e 185 nm.



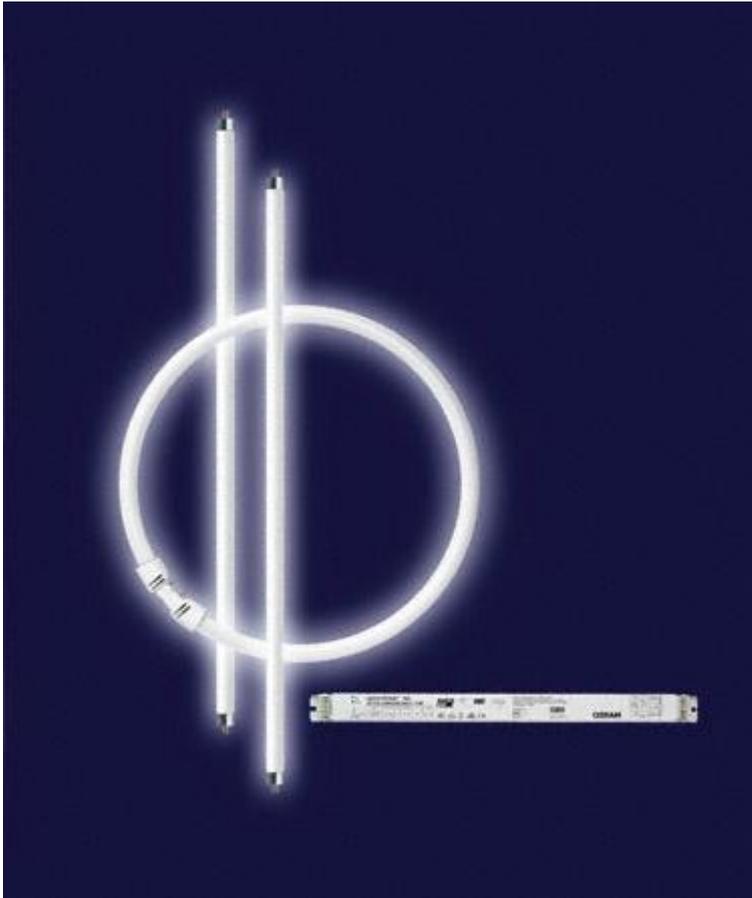
L'elevata efficienza del processo fluorescente dipende in larga misura dal fatto che il mercurio a bassa pressione emette per circa il 65% a 253,7 nm e per circa il 10-20% a 185 nm. I fosfori del rivestimento interno assorbono l'energia della radiazione UV e la riemettono a frequenze inferiori, tipiche dello spettro visibile (ad esempio, i tubi fluorescenti per illuminazione generale presentano due picchi di emissione a 440 nm e 546 nm). La differenza di energia tra il fotone UV assorbito ed il fotone visibile emesso viene degradata in calore, che va a riscaldare lo strato di fosfori. La miscela

di fosfori determina, in base alla sua composizione, la tonalità della luce emessa e, in combinazione con il vetro della lampada, impedisce la fuoriuscita dei pericolosi raggi UV.

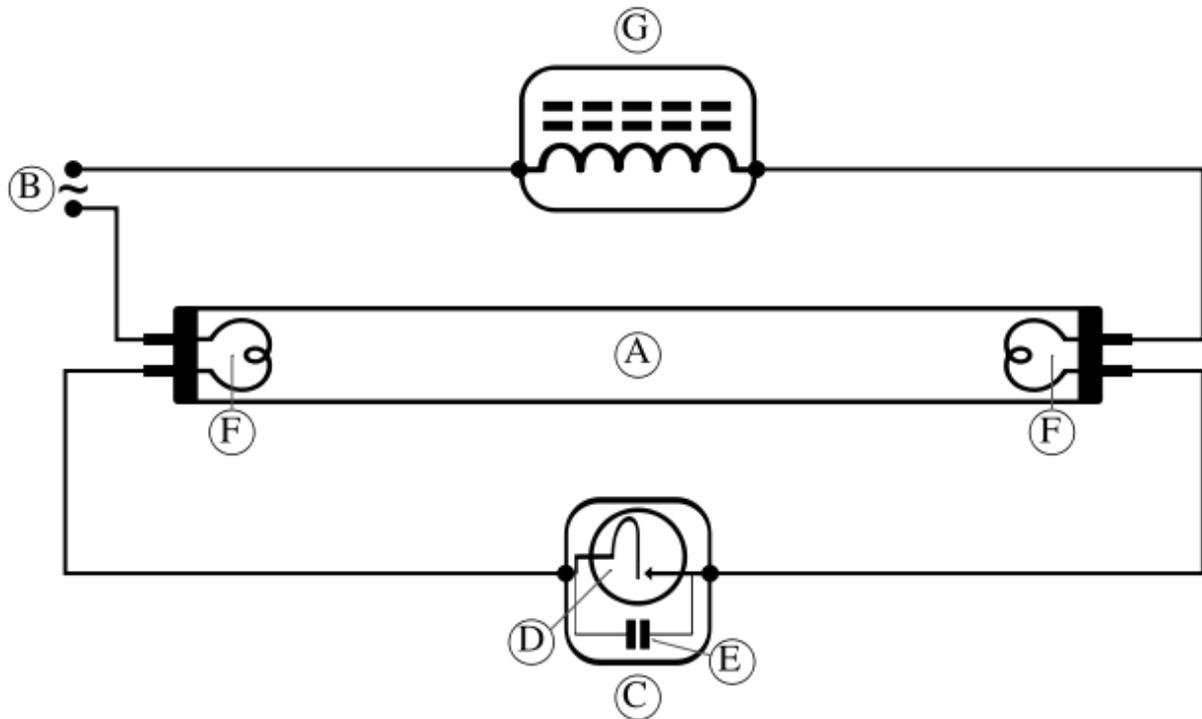
La lampada fluorescente è un **dispositivo a resistenza differenziale negativa**: all'aumentare della corrente elettrica trasportata (più gas ionizzato), la resistenza elettrica nel tubo diminuisce, consentendo il passaggio di una corrente ancora più intensa. Se collegata direttamente alla rete elettrica, la lampada fluorescente verrebbe rapidamente ed irreparabilmente danneggiata dall'intensità fuori controllo della corrente elettrica nel tubo. Per evitare questo, si deve porre in serie alla lampada un dispositivo in grado di limitare la corrente, chiamato comunemente **alimentatore o reattore**, che presenta l'ulteriore vantaggio di generare una sovratensione in grado di agevolare l'innesco; in rarissimi casi si usa una resistenza. L'alimentatore può essere di tipo elettromagnetico (responsabile del caratteristico ronzio delle lampade fluorescenti), elettronico auto-oscillante, elettronico a componenti integrati.



Le **lampade fluorescenti lineari o circolari** sono costituite da tubi in vetro a sviluppo classico lineare o circolare e con diametro di qualche centimetro:



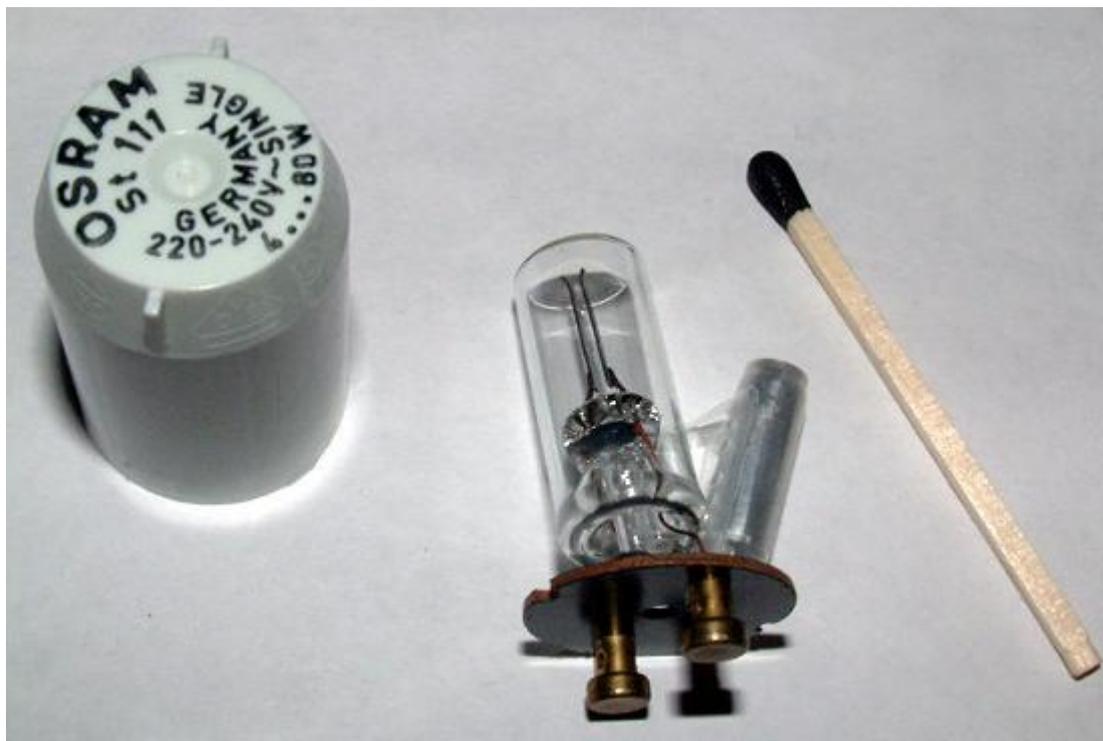
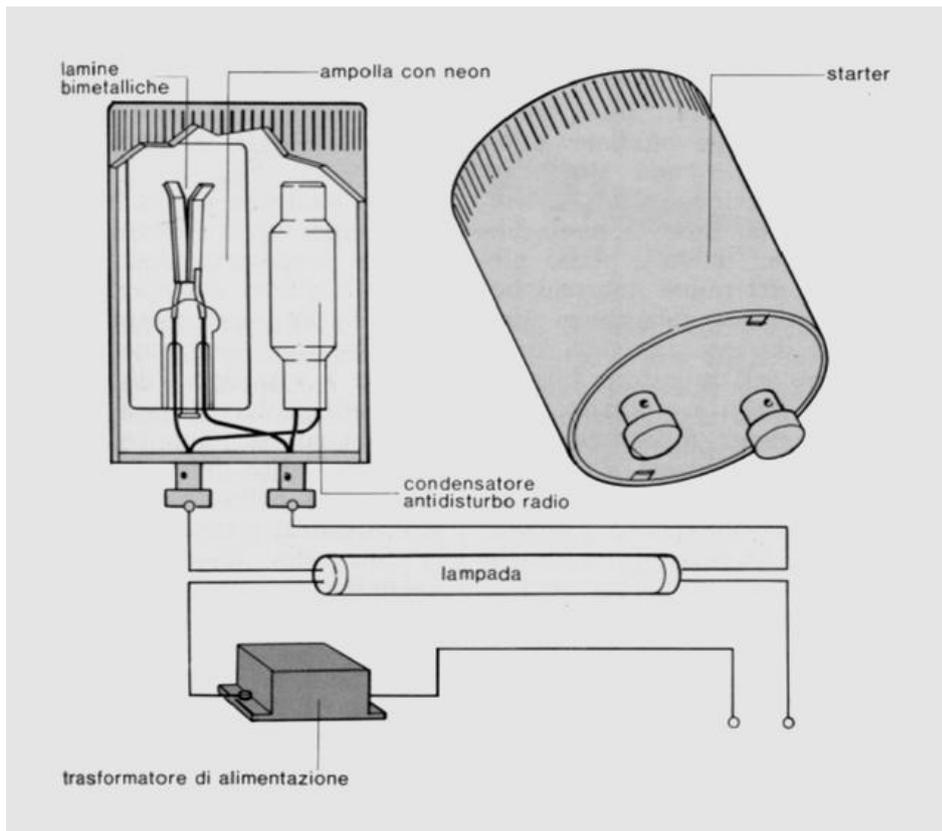
Il loro tipico schema di inserzione in rete è il seguente:



Circuito tipico delle lampade fluorescenti a preriscaldamento:

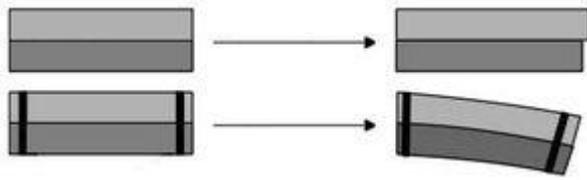
- A. lampada fluorescente**
- B. alimentazione, 230 V**
- C. starter**
- D. interruttore (termostato bimetallico)**
- E. condensatore-filtro**
- F. elettrodi a filamento**
- G. reattore**

Per accendere la lampada, è generalmente necessario preriscaldare gli elettrodi e fornire un colpo di tensione per mezzo di uno starter inserito in parallelo alla lampada.



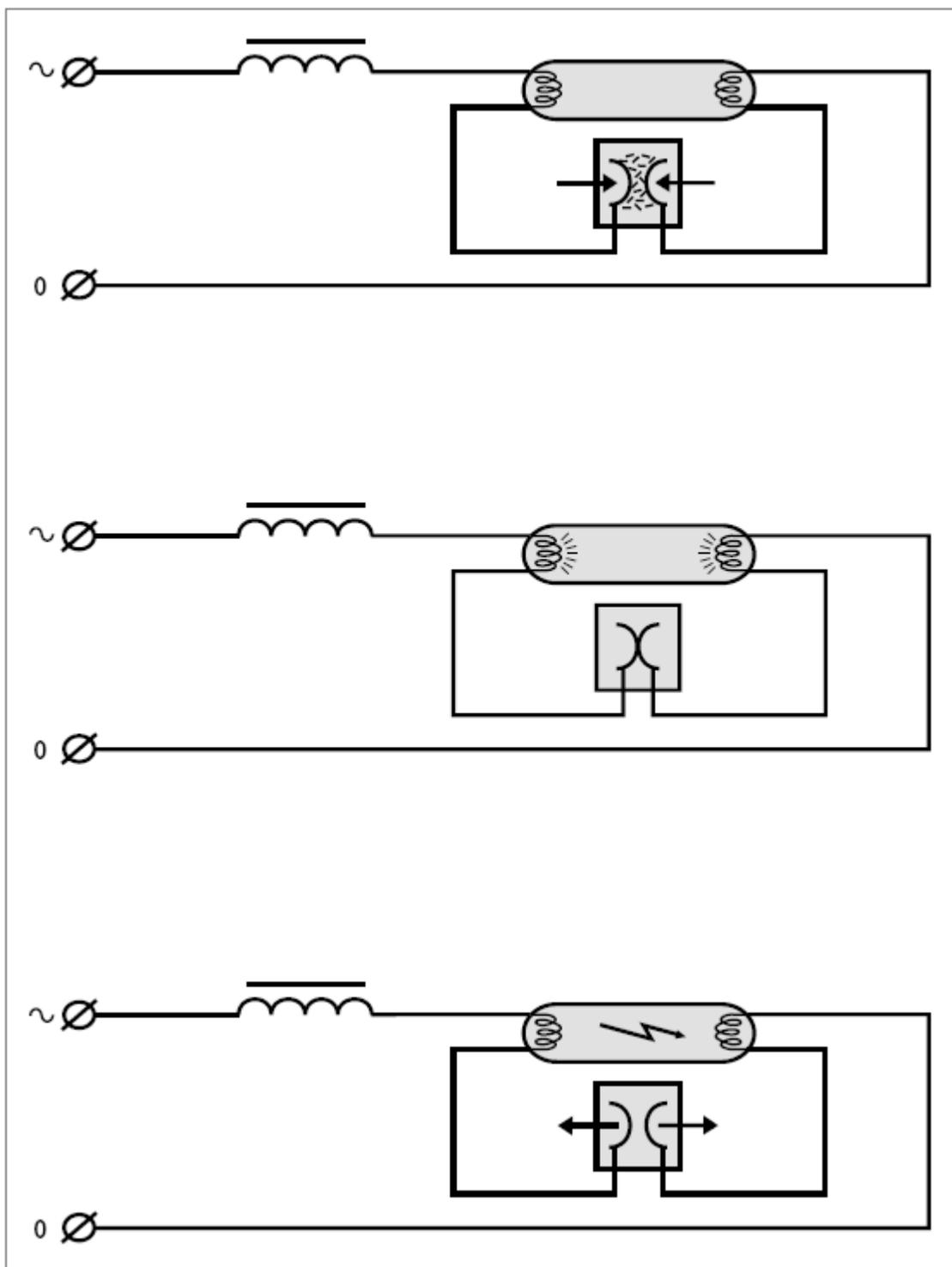
Lo starter è fondamentalmente un interruttore automatico il cui elemento sensibile è una lamina bimetallica, costituita da due lamine di differenti materiali unite insieme, ad esempio acciaio e rame. Poiché i due materiali

hanno coefficienti di dilatazione diversi una variazione di temperatura comporta un'incurvatura della lamina bimetallica che può quindi agire direttamente da interruttore.



La sequenza di accensione è la seguente:

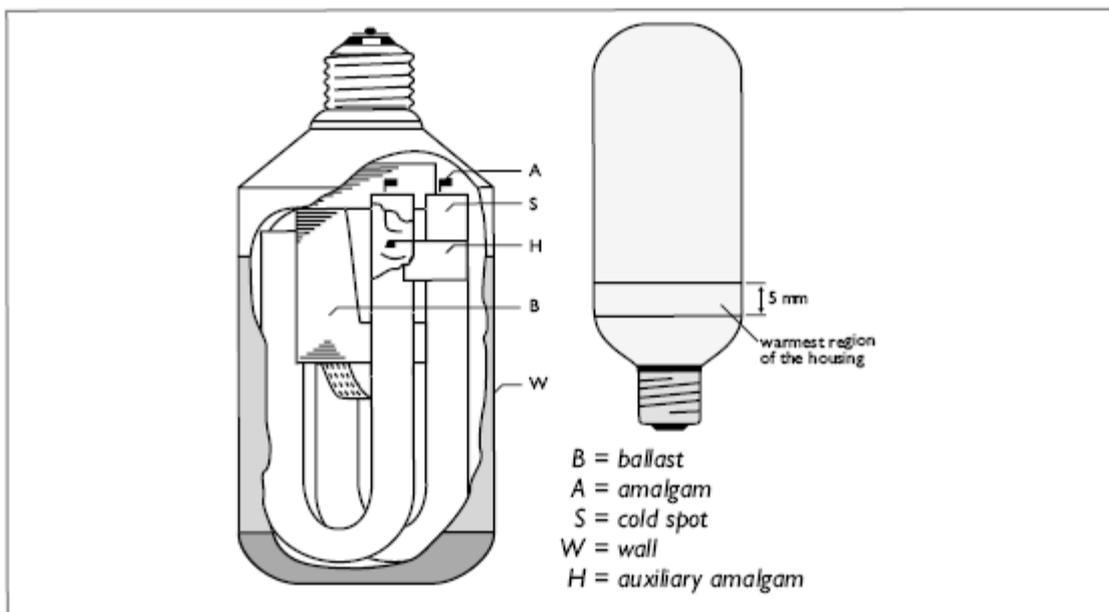
1. si applica la tensione di 220 V;
2. ne consegue una scarica luminescente nello starter;
3. il contatto bimetallico dello starter si chiude a causa del calore generato;
4. la corrente che fluisce nello starter preriscalda gli elettrodi della lampada;
5. la scarica luminescente si spegne alla chiusura del contatto e il bimetallo si raffredda, aprendo il circuito elettrico;
6. ne consegue un colpo di tensione induttivo all'alimentatore, che accende la lampada;
7. la tensione di funzionamento della lampada è applicata anche allo starter, ma è troppo bassa per generare una nuova scarica luminescente e lo starter non è più in grado di intervenire.



L'alimentatore preleva dalla rete potenza reattiva, cosicché il fattore di potenza risulta circa 0,5. Questo fattore può essere migliorato con un condensatore di rifasamento inserito in parallelo al complesso reattore-lampada (circuito rifasato).

Le **lampade elettroniche o a risparmio energetico** sono solo apparentemente diverse dalle lampade fluorescenti classiche. In realtà,

sono costituite da un tubo fluorescente di piccolo diametro ripiegato più volte per compattarlo ed inserirlo in una base con attacco a vite compatibile con quelli delle lampade ad incandescenza.



Nella base è alloggiata la scheda con l'elettronica integrata per l'accensione e l'alimentazione del tubo fluorescente.



Il flusso luminoso delle lampade fluorescenti dipende strettamente dalla temperatura ambiente; il valore ottimale si ottiene a 20-25 °C. Per temperature inferiori o superiori, il flusso e l'efficienza luminosi diminuiscono.

L'**indice di resa cromatica (CRI, Color Rendering Index)** è una misura del bilanciamento delle componenti cromatiche della luce bianca. Per definizione, una lampada ad incandescenza ha un CRI pari a 100, mentre le lampade fluorescenti raggiungono un CRI compreso tra 50% e 99%. Ad esempio, una lampada fluorescente con CRI basso ha fosfori che emettono luce rossa in misura insufficiente, alterando il colore degli oggetti.

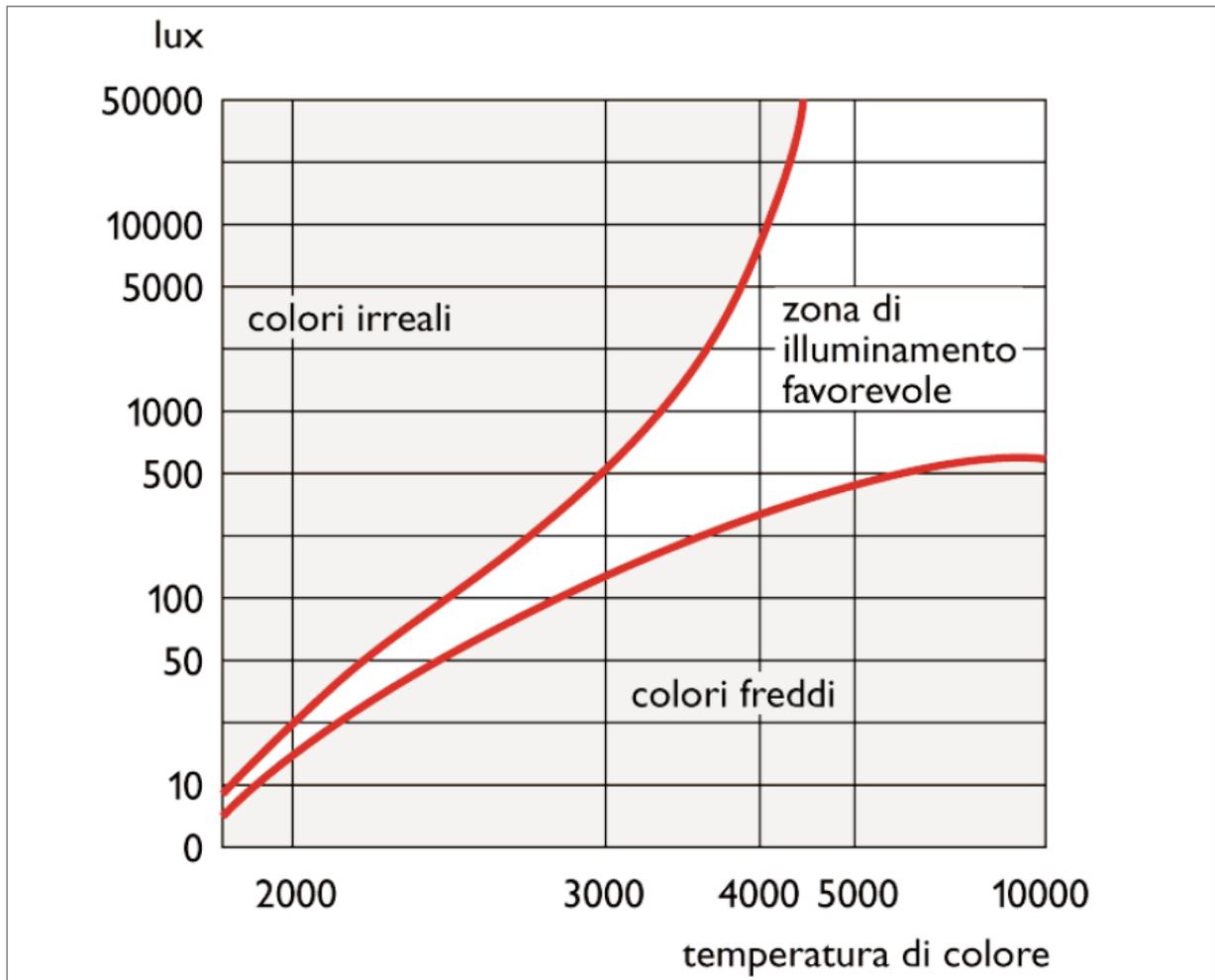
La **temperatura di colore correlata (CCT, Correlated Color Temperature)** è una misura del bianco della luce. La temperatura di colore tipica delle lampade a filamento è di 2700 K, corrispondente ad una luce bianco-giallastra, e quella delle lampade alogene è di 3200 K.

Per modificare la temperatura di colore correlata nelle lampade fluorescenti, si interviene sulla composizione della miscela di fosfori all'interno del tubo. Le lampade fluorescenti sono classificate in base al tipo di luce emessa:

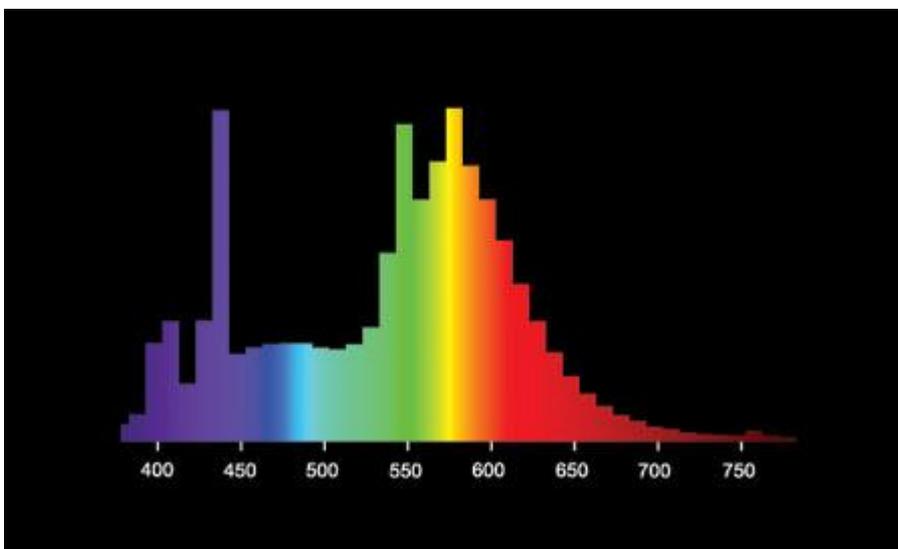
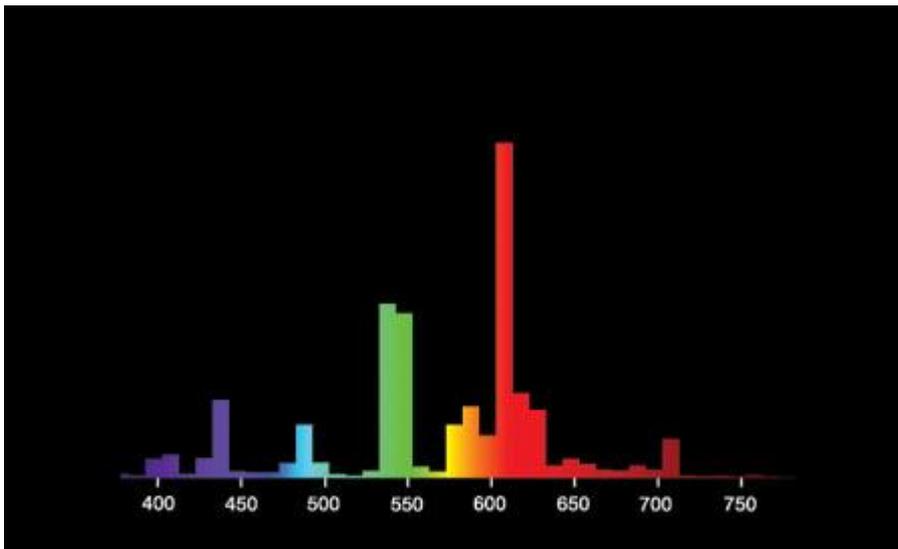
- lampade fluorescenti a luce bianca calda – hanno una CCT di 2700 K e trovano largo impiego nell'illuminazione domestica;
- lampade fluorescenti a luce bianca neutra – hanno una CCT di 3000-3500 K;
- lampade fluorescenti a luce bianca fredda – hanno una CCT di 4100 K e sono molto utilizzate per l'illuminazione di ambienti lavorativi;
- lampade fluorescenti a luce diurna – hanno una CCT di 5000-6500 K ed emettono una luce bianco-bluastro.

L'illuminazione con alti valori di temperatura di colore correlata richiede generalmente illuminamenti elevati. Al diminuire del livello di

illuminamento, l'occhio umano percepisce come più naturali le temperature di colore più basse. Ad esempio, mentre una poco luminosa lampada ad incandescenza a 2700 K ed una molto luminosa a 5000 K appaiono entrambe naturali, una poco luminosa lampada fluorescente a 5000 K appare eccessivamente fioca. Le lampade fluorescenti a luce diurna appaiono naturali solo se sono molto brillanti.



Le luci meno confortevoli sono quelle emesse dai tubi rivestiti con i dati fosfori a base di alofosfati ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl}):\text{Sb}^{3+},\text{Mn}^{2+}$). L'insoddisfacente resa cromatica è dovuta al fatto che questi fosfori emettono prevalentemente nel giallo e nel blu e relativamente poco nel verde e nel rosso. All'occhio questa miscela appare bianca, ma la luce è costituita solo da alcune bande del visibile ed il CRI di queste lampade è pari solo a 60. A partire dal 1990, le lampade fluorescenti di qualità utilizzano alofosfati con CRI più alto o miscele trifosforiche con ioni di europio (Eu) e terbio (Tb), che hanno bande di emissione distribuite più uniformemente nello spettro visibile. Con un CRI pari a 82-100, questi tubi offrono una resa cromatica più naturale.

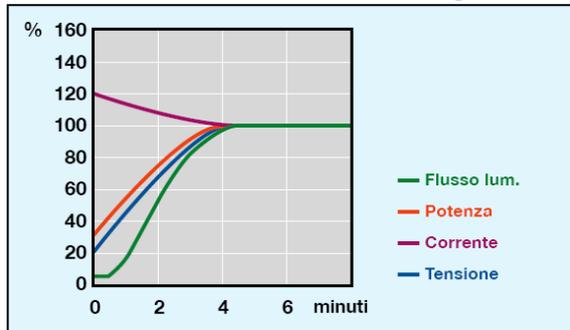


Le lampade fluorescenti hanno una vita utile media molto superiore a quella delle lampade ad a incandescenza. Ma la loro durata è influenzata dal numero di accensioni e spegnimenti, a meno che non si usi un pilotaggio elettronico: ognuna di queste operazioni, infatti, riduce la vita utile a causa dell'usura subita dagli elettrodi. Il valore che viene fornito dalle aziende produttrici è generalmente calcolato con cicli di accensione di 8 ore e va dalle 12.000-15.000 ore delle lampade tubolari alle 5.000-6.000 ore delle lampade elettroniche compatte.

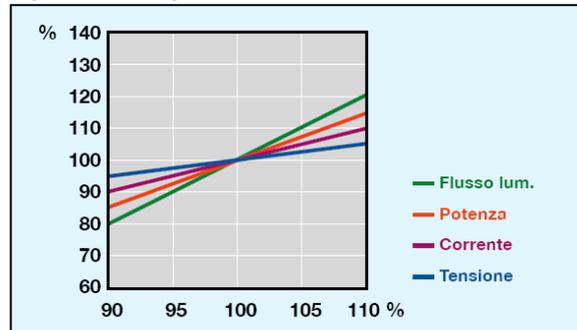
Il pilotaggio elettronico, invece, grazie al preriscaldamento degli elettrodi che ne evita il danneggiamento, consente un numero di accensioni praticamente infinito (oltre 60.000) e la precisione del controllo ne estende la vita ad almeno 10.000 ore. A differenza delle lampade alogene, il flusso luminoso delle lampade compatte tende a diminuire leggermente nel corso

del tempo; inoltre, i modelli meno recenti (generalmente privi di preriscaldamento) possono impiegare generalmente qualche minuto per arrivare al valore a regime del flusso luminoso dopo l'accensione.

Caratteristiche di andata a regime



Dipendenza dei parametri dalla tensione di alimentazione



Le lampade fluorescenti contengono mercurio che è estremamente inquinante. Dopo l'uso devono essere smaltite in maniera differenziata tra i materiali RAEE e non con il vetro.

Lampade allo xenon

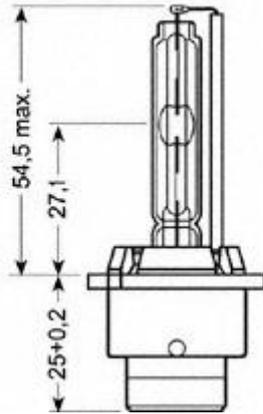
Sono lampade a scarica elettrica che utilizzano gas xenon (Xe) per produrre una luce molto intensa e bianca simile alla luce solare.

Sono costituite da un tubo in vetro o quarzo con due elettrodi di tungsteno alle estremità e riempito di gas xenon dopo avervi praticato il vuoto e possono essere suddivise in tre categorie:

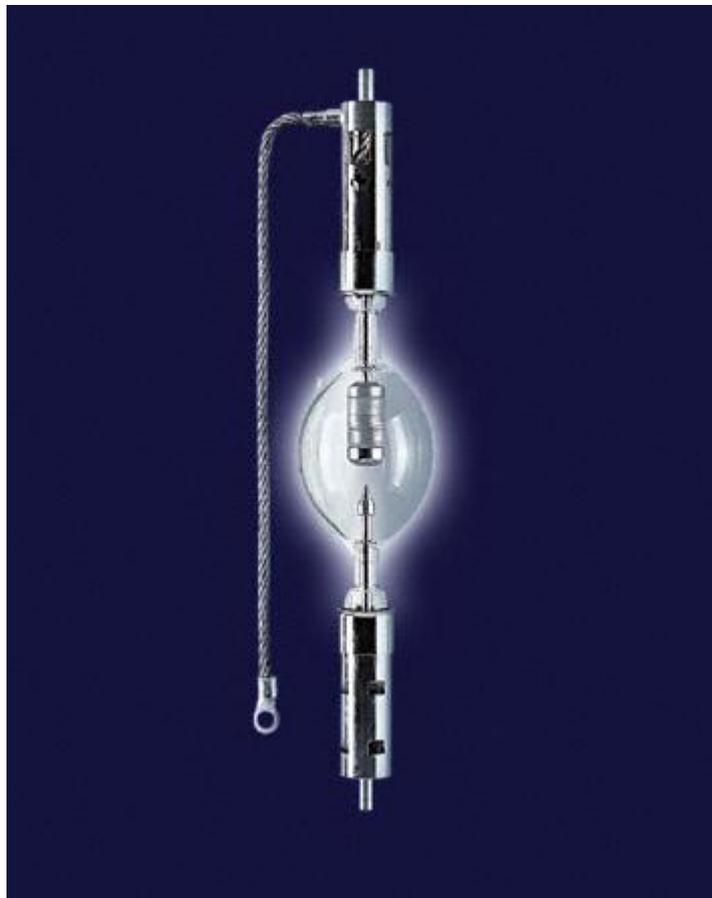
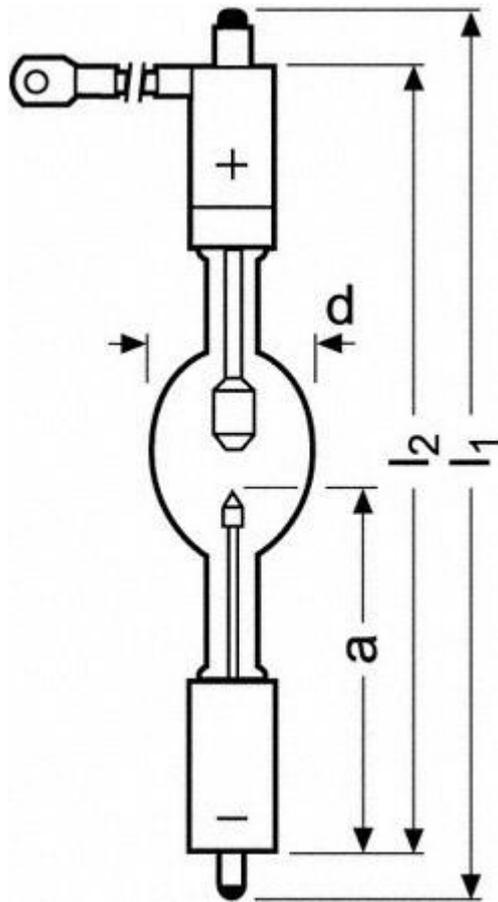
- lampade ad arco corto ad emissione continua,
- lampade ad arco lungo ad emissione continua,
- lampade flash (trattate separatamente nella successiva sezione).

Arco corto

Questa lampada è divenuta comune solo a partire dal 1990 con l'uso nei fari delle automobili, dove è indispensabile un circuito elevatore di tensione al fine di alimentare la lampada a partire dai 12 V della batteria. L'aggiunta di mercurio e sali di sodio (Na) e scandio (Sc) aumenta significativamente l'emissione luminosa, mentre lo xenon si limita a generare luce già all'accensione della lampada.



Inoltre, è la sorgente luminosa universalmente adottata nei **proiettori cinematografici**.



Il bulbo di vetro è piccolo e l'arco è lungo pochi millimetri, in modo da potere focalizzare con precisione la luce. La potenza di queste lampade spazia da poche decine di watt a molti kilowatt.

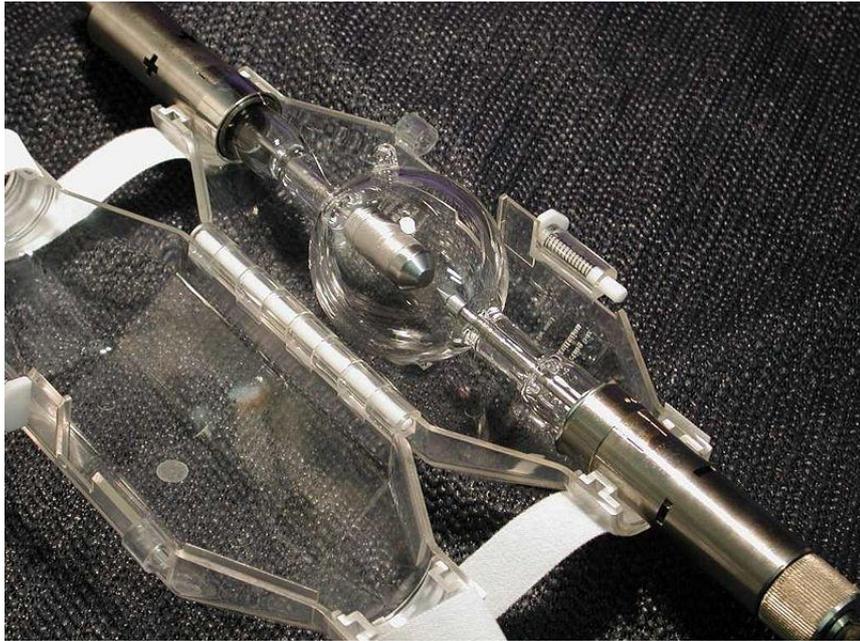
Tutte le attuali lampade ad arco corto sono dotate di bulbo in quarzo con elettrodi in tungsteno (W) drogato con torio (Th). Al contrario del vetro, il quarzo è in grado di resistere agli elevati valori di pressione (25 atm nei bulbi IMAX) e temperatura a regime mantenendosi otticamente trasparente.

Il drogaggio degli elettrodi con torio migliora sensibilmente le caratteristiche di emissione. Poiché il tungsteno ed il quarzo hanno coefficienti di dilatazione termica differenti, gli elettrodi sono saldati a lamine di molibdeno (Mo) o di invar (lega metallica composta da ferro (64%) e nichel (36%), con tracce di carbonio e cromo), a loro volta fuse nel quarzo a sigillare il bulbo. In alternativa, si può utilizzare un corpo ceramico con riflettore integrato.

Il gas di riempimento delle lampade ad arco corto può essere costituito da xenon puro o da una miscela di xenon e mercurio in piccola quantità.

Nelle lampade allo xenon puro, la maggior parte della luce è generata all'interno di una ristrettissima area di plasma sovrastante la superficie del catodo, dove ha origine il flusso di elettroni della scarica. La zona di plasma che genera la luce è di forma conica e l'intensità luminosa diminuisce esponenzialmente spostandosi dal catodo all'anodo. Gli elettroni che attraversano il plasma colpiscono l'anodo surriscaldandolo. Di conseguenza, per dissipare il calore, l'anodo delle lampade ad arco corto deve avere dimensioni maggiori rispetto al catodo o essere raffreddato ad acqua. Lo spettro di emissione è simile alla luce solare, con un andamento relativamente piatto per tutte le lunghezze d'onda del visibile. Anche se il gas è ad alta pressione, emette alcune linee molto intense nella banda del vicino infrarosso di 850-900 nm, equivalenti a circa il 10% della radiazione totale generata.

Nelle lampade allo xenon-mercurio, la maggior parte della luce è generata all'interno di una ristrettissima area di plasma sovrastante ciascun elettrodo. La zona di plasma che genera la luce ha la forma di due coni che si intersecano e l'intensità luminosa diminuisce esponenzialmente spostandosi verso il centro della lampada. La luce emessa è bianco-azzurra, con un'elevata percentuale di radiazioni ultraviolette, rendendo queste lampade adatte a terapie a base di UV, alla sterilizzazione di oggetti ed alla produzione di ozono. Le lampade allo xenon ad arco corto sono dispositivi operanti a bassa tensione ed in corrente continua ad alta intensità, con coefficiente termico negativo. La loro accensione richiede un impulso di tensione a 50 kV ed il loro funzionamento a regime una regolazione estremamente precisa dell'alimentazione in corrente continua. Inoltre, sono inerentemente instabili, soggette ad oscillazioni del plasma e cadute di tensione. Si preferisce quindi regolare la corrente che fluisce nella lampada piuttosto che la tensione applicata (ad esempio, 18 V e 25 A per una potenza di 450 W). Per ottenere la massima efficienza, la pressione interna delle lampade ad arco corto è molto elevata e pone quindi problemi di sicurezza. Se la lampada cade o si rompe in servizio, i frammenti del bulbo vengono proiettati via ad alta velocità. A scopo preventivo, le lampade di dimensioni maggiori sono spedite in involucri protettivi, che trattengono i frammenti in caso di rottura e che vengono rimossi in fase di installazione.



Lampada allo xenon ad arco corto da 3 kW con involucro di sicurezza in plastica per la spedizione

Poiché la probabilità di rotture aumenta con il numero di ore in servizio, le lampade esaurite presentano il massimo rischio esplosione. Al termine della sua vita utile, la lampada viene ricollocata nell'involucro protettivo e smaltita. I produttori raccomandano l'uso di occhiali di sicurezza o, per le lampade di dimensioni maggiori, protezioni integrali del corpo durante le fasi di installazione e disinstallazione.

Arco lungo

Questa lampada è strutturalmente simile alla lampada ad arco corto tranne per il fatto che la porzione contenente l'arco è più lunga. Montata con un riflettore ellittico, è usata per simulare l'illuminazione solare e trova quindi impegno nei test di pannelli solari e di invecchiamento alla luce dei materiali e nell'ispezione di materiali.

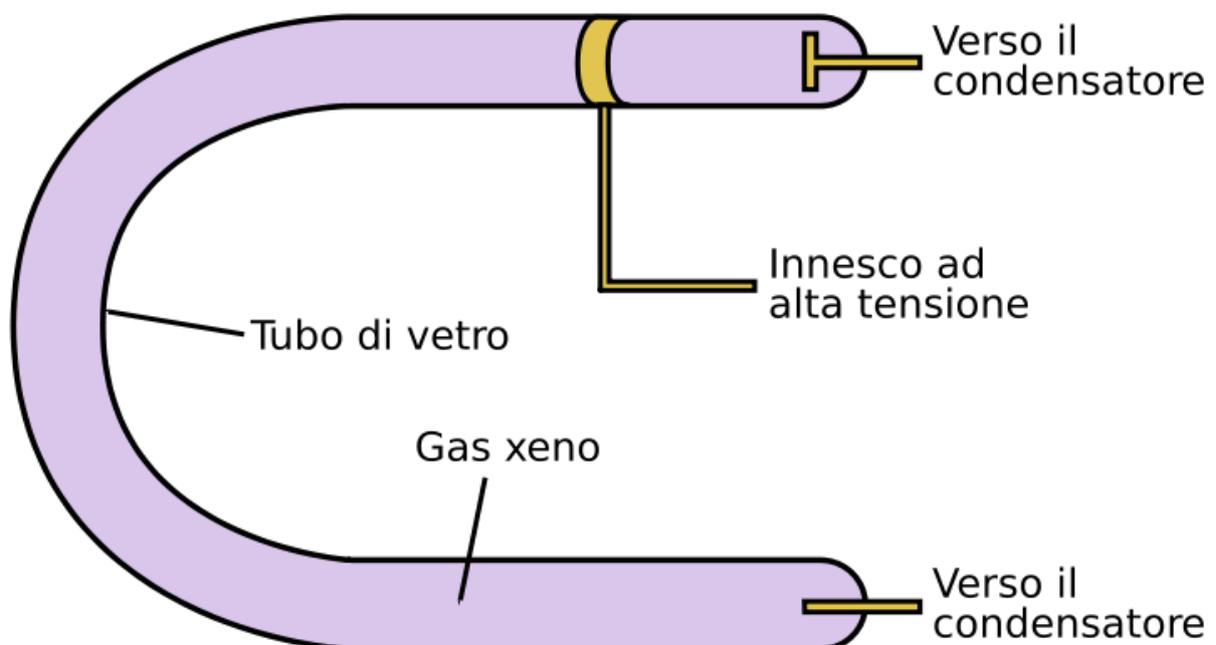
Lampeggiatore elettronico

L'idea di utilizzare una scarica elettrica per produrre un lampo di intensità sufficiente per le esigenze della ripresa fotografica risale al periodo tra le due guerre mondiali; ma lo sviluppo dell'elettronica necessaria ha reso

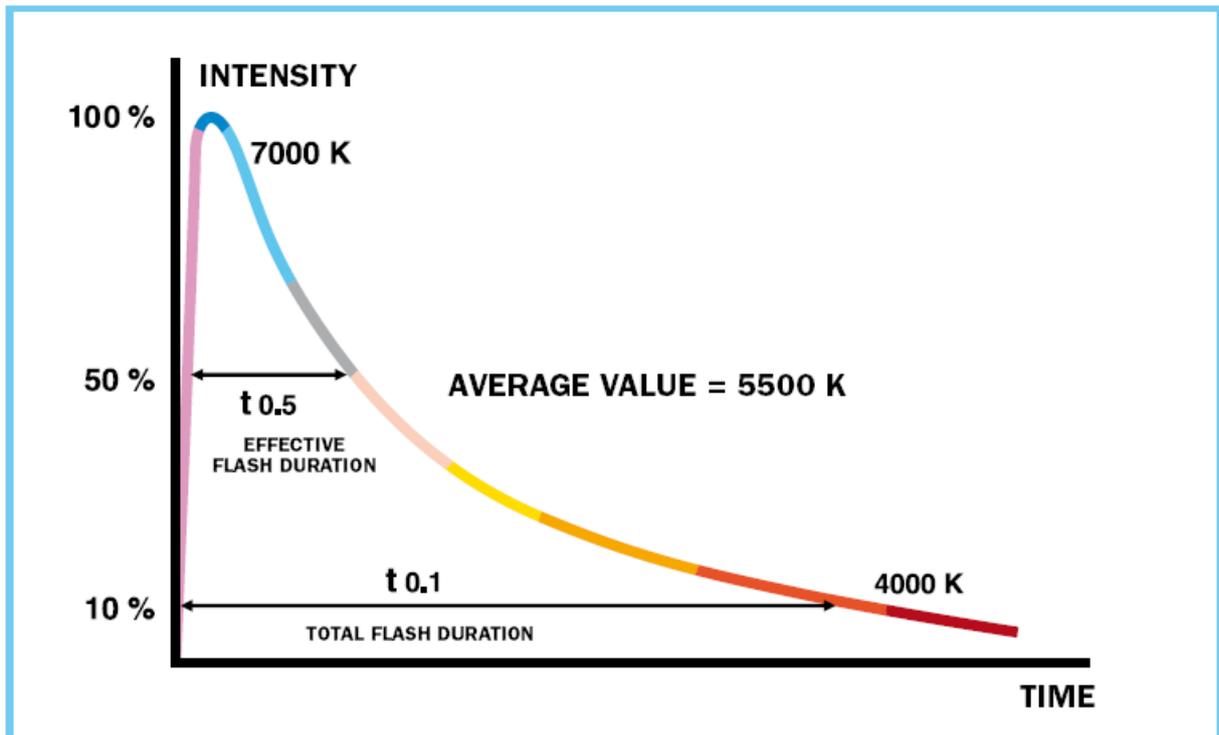
possibile l'avvio della produzione industriale dei primi lampeggiatori elettronici solo nella seconda metà del XX secolo. L'impulso decisivo allo sviluppo tecnologico e all'affermazione dei lampeggiatori elettronici è stato dato dai circuiti elettronici a stato solido.

Queste lampade, usate nei lampeggiatori per fotografia, sono piuttosto differenti dalle precedenti sia nella costruzione sia nel funzionamento. Sono studiate per produrre un lampo estremamente intenso per un periodo brevissimo. Il gas contenuto è una miscela di xenon (Xe) ed altri gas in quantità minori. La pressione del gas può andare da pochi kilopascal a decine di kilopascal (0,01-0,1 atm). A causa della bassa temperatura del gas, lo spettro luminoso presenta molte linee spettrali che danno il caratteristico colore bianco alla luce del flash. La forma del vetro può essere a tubo lineare, elicoidale, circolare o a U.

Oltre ai due elettrodi di alimentazione, è presente un terzo elettrodo di innesco, che può essere interno al tubo o sotto forma di anello all'esterno del vetro, a cui viene applicato un impulso di alta tensione per innescare l'arco. L'impulso elettrico provoca la ionizzazione del gas, che riduce repentinamente la sua resistenza elettrica e si lascia attraversare da una corrente molto intensa, di centinaia di ampere. L'energia necessaria è accumulata in un condensatore caricato con tensioni di centinaia o migliaia di volt, in funzione del tipo di tubo.



La durata di ogni scarica spazia dai microsecondi ai millisecondi e la frequenza di ripetizione dei lampi può arrivare a centinaia di hertz.



Il bulbo di scarica in vetro è posto nel fuoco di una parabola che ha il compito di riflettere in un campo limitato, concentrandola, la luce emessa. Nei flash professionali non portatili, è possibile sostituire la parabola per modificare l'emissione luminosa. Tutti i lampeggiatori elettronici sono dotati di schermo trasparente protettivo in vetro temprato o in plastica, eventualmente conformato per concentrare ulteriormente la luce, che chiude anteriormente l'insieme bulbo-parabola (unità flash). Lo schermo non serve solo a proteggere l'unità flash da sollecitazioni e da agenti esterni, ma anche a evitare che l'improbabile esplosione del bulbo provochi lesioni personali, come previsto dalle norme di sicurezza.



L'uso comune è in fotografia, per illuminare intensamente la scena nel preciso momento dello scatto, ma anche per effettuare riprese stroboscopiche.

Componenti elettrici ed elettronici

L'alimentazione elettrica dipende dal tipo di lampeggiatore elettronico. I grossi flash professionali vanno collegati direttamente alla rete elettrica; nei flash portatili si può avere un'alimentazione fornita da accumulatori ricaricabili; si può avere infine un'alimentazione fornita da batterie.

Il condensatore è in stretta dipendenza dall'alimentazione. Generalmente ha una forma cilindrica di dimensioni cospicue, proporzionate all'unità nella quale è montato. Il compito che svolge è di fondamentale importanza nell'ambito del funzionamento del lampeggiatore elettronico, in quanto funge da serbatoio di energia elettrica ad alta tensione da scaricare, al momento dello scatto, nel bulbo generando il lampo.

Naturalmente, dopo il lampo, occorre un certo intervallo per ricaricare nuovamente e completamente il condensatore; questo determina l'intervallo minimo tra un lampo e il successivo. Questo intervallo dipende non solo dalle caratteristiche tecniche dell'unità flash e dell'elettronica, ma anche dal tipo e dallo stato dell'alimentazione.

Nei lampeggiatori elettronici portatili, le batterie e gli accumulatori forniscono al condensatore una tensione di pochi volt, decisamente insufficiente perché il condensatore possa innescare la generazione del lampo. Per elevare la tensione a centinaia di volt, è quindi necessario inserire un trasformatore, operante ad impulsi o in corrente alternata, tra l'alimentatore e il condensatore, operanti invece in corrente continua.

Il circuito elettrico dei lampeggiatori elettronici è così composto da oscillatori elettronici che trasformano la corrente continua delle batterie o degli accumulatori in corrente alternata in modo tale che questa possa essere avviata al trasformatore, funzionante solo con corrente alternata. Quindi, un raddrizzatore modifica la corrente alternata in uscita dal trasformatore in corrente continua, che viene inviata al condensatore. La parte più delicata del circuito è rappresentata dagli oscillatori elettronici allo stato solido, che consentono di ridurre le dimensioni ed aumentare la potenza dei lampeggiatori elettronici portatili. Il funzionamento degli oscillatori è responsabile del tipico e caratteristico ronzio udibile durante la ricarica del lampeggiatore tra un lampo e quello successivo.

Nei modelli portatili, è inoltre presente un circuito limitatore che provvede a disinserire le batterie quando il condensatore è carico. Il suo intervento è di fondamentale importanza, in quanto impedisce di sprecare inutilmente energia elettrica, a vantaggio dell'autonomia del lampeggiatore elettronico. In pratica, il circuito stacca l'alimentazione nel momento in cui la tensione ai capi del condensatore ha raggiunto il valore richiesto. Quando il valore si

riabbassa al di sotto di una soglia minima (ogni condensatore presenta inevitabilmente lievi perdite) l'alimentazione viene nuovamente connessa. La presenza di questo circuito è rilevabile dal caratteristico ronzio intermittente degli oscillatori, che intervengono per ripristinare il livello di carica.

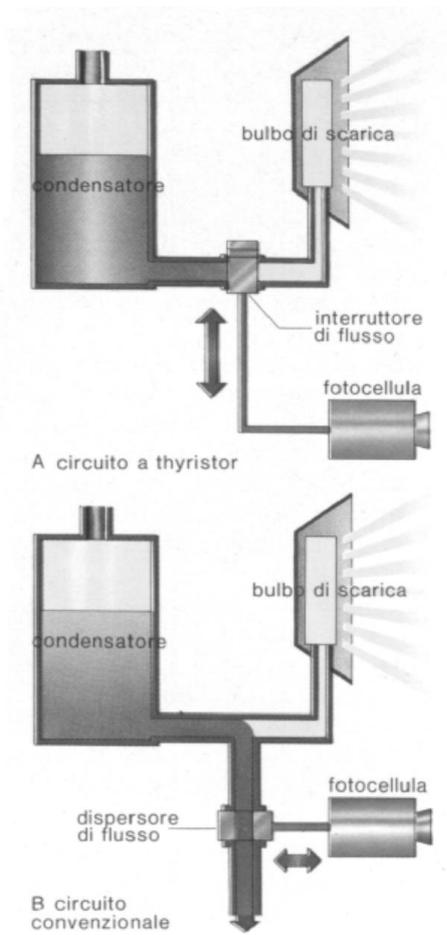
Computer ed economizzatore

In alcune situazioni di ripresa la potenza del lampeggiatore elettronico può risultare eccessiva anche con il diaframma all'apertura minima. Ad esempio, quando la distanza tra lampeggiatore e soggetto è molto breve o quando la sensibilità della pellicola utilizzata è troppo alta. Si rende quindi necessario ridurre l'emissione luminosa.

Sebbene sia possibile operare la riduzione mascherando l'unità flash con filtri grigi neutri (ND), è preferibile utilizzare un circuito di controllo, in grado di interrompere l'emissione del lampo quando la luce riflessa dal soggetto durante l'esposizione raggiunge il valore ottimale.

Questi lampeggiatori elettronici sono dotati di computer, collegato a una fotocellula per leggere la luce riflessa, che comanda un circuito di interruzione del lampo, previa taratura del sistema in funzione dell'apertura di diaframma in uso.

Nei lampeggiatori elettronici dotati di **circuito a thyristor (circuito economizzatore)**, l'utilizzo dell'energia elettrica presente nel condensatore è strettamente limitato alla quantità necessaria per il lampo. Così, per soggetti distanti, il lampo può richiedere quasi tutta l'energia del condensatore, con un tempo di ricarica normale; mentre, per soggetti vicini, la frazione di energia prelevata dal condensatore può essere piccola, con un breve intervallo tra un lampo e quello successivo. In questo secondo caso, l'alimentazione è meno sollecitata ed è in grado di fornire un numero maggiore di lampi.



I lampeggiatori elettronici dedicati possono essere pilotati in completo automatismo dal circuito esposimetrico della fotocamera mediante specifici contatti elettrici sulla slitta di innesto del flash.

Potenza del lampo

Nel considerare le prestazioni operative del lampeggiatore elettronico è fondamentale considerare la potenza del lampo. Un lampeggiatore di elevata potenza consente di riprendere soggetti posti anche a distanze molto lontane dal punto di ripresa oppure, a parità di distanza di ripresa, un lampo potente consente di chiudere il diaframma con evidente beneficio per l'estensione della profondità di campo.

La potenza dei lampeggiatori professionali è sempre espressa in watt/secondo, per un'immediata valutazione delle prestazioni fotografiche delle unità in sala di posa. Ad esempio, se si dispone di un generatore di corrente da 2000 W/s, si intuisce subito la possibilità di usare una sola torcia che ne sfrutti tutta la potenza, la possibilità di dividere la potenza su due punti luce da 1000 W/s ciascuno, oppure la possibilità di distribuire la potenza su quattro punti luce da 500 W/s ciascuno. L'indicazione elettrica

non tiene però conto di altri fattori, quali l'efficienza del bulbo, il tipo di parabola adottato e la durata del lampo.

Poiché i lampeggiatori elettronici portatili sono sempre usati in configurazione fissa (le torce dei lampeggiatori elettronici da studio possono invece utilizzare parabole riflettenti differenti, abbinata generalmente con superfici a riflessione diffusa), la potenza è indicata dal **numero guida**. Si tratta di un valore numerico che si ricava moltiplicando la distanza tra soggetto e lampeggiatore per il valore di diaframma che fornisce un'esposizione corretta:

$$NG = L \cdot N$$

dove: NG = numero guida,
L = distanza lampeggiatore-soggetto,
N = valore del diaframma.

Il numero guida varia in funzione della sensibilità della pellicola in uso; pertanto, a livello internazionale, è obbligatorio esprimerlo facendo riferimento alla sensibilità di **100/21 °ISO**.

A parità di sensibilità della pellicola, al numero guida più alto corrisponde sempre il lampeggiatore elettronico più potente. In generale, le dimensioni del lampeggiatore sono direttamente proporzionali alla sua potenza. Il suo condensatore elettrolitico presenta, infatti, dimensioni strettamente legate alla sua capacità.

Angolo di illuminazione

L'emissione luminosa di un lampeggiatore elettronico, come del resto quella di tutte le sorgenti di illuminazione, si irradia con un angolo ben definito. L'angolo di illuminazione del lampeggiatore elettronico è sempre superiore all'angolo di campo di un obiettivo normale, in quanto il lampo deve illuminare uniformemente tutto il campo inquadrato.

Nel caso del formato 24 x 36 mm l'angolo di illuminazione copre l'angolo di ripresa degli obiettivi grandangolari con focale di 35 mm: ~64° sulla diagonale (~54° in orizzontale x ~38° in verticale).

Nonostante la perdita di luminosità che comportano, quantificabile in 1-2 stop, è possibile montare anteriormente all'unità flash schermi che diffondono il fascio uscente, per angoli di illuminazione compatibili con gli obiettivi grandangolari (il numero guida viene ridotto), o lo concentrano, per angoli di illuminazione compatibili con i teleobiettivi (il numero guida viene aumentato). I flash elettronici più sofisticati sono dotati di parabola

zoom, in grado di adattare l'angolo di illuminazione all'angolo di ripresa dell'ottica.

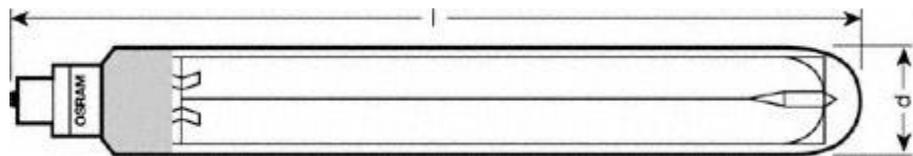
Altre lampade a scarica elettrica

Lampade al sodio

Bassa pressione

Nelle lampade a bassa pressione, l'emissione è in luce monocromatica gialla alla lunghezza d'onda caratteristica di emissione del sodio, corrispondente a 589 nm.

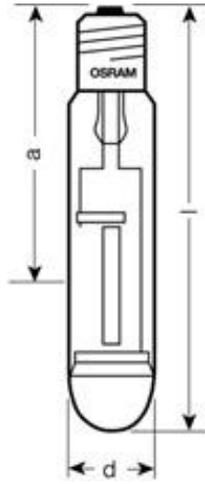
Queste lampade trovano impiego nell'illuminazione stradale di tratti soggetti a nebbia. A causa dell'emissione monocromatica ad una lunghezza d'onda ottimale per l'occhio umano, presentano un'efficienza luminosa molto elevata.

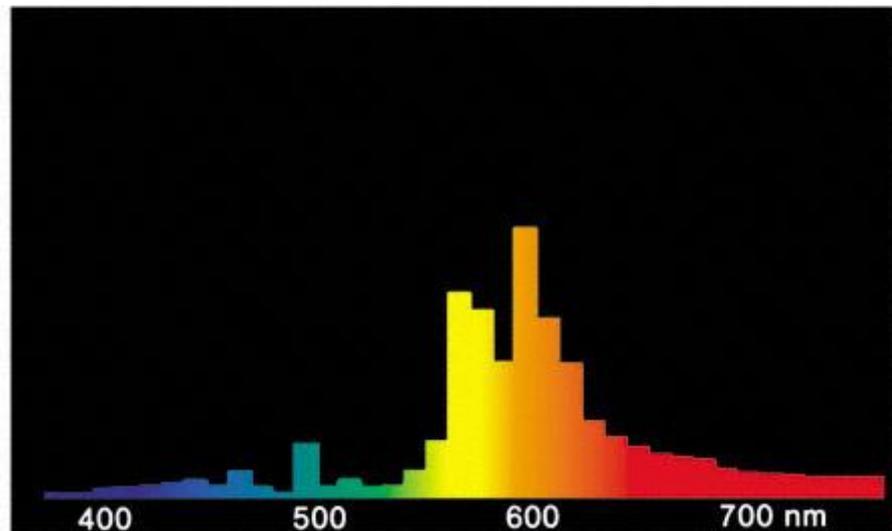




Alta pressione

Aumentando la pressione, il vapore di sodio si allontana dalla condizione di gas ideale ed il suo spettro di emissione si allarga rispetto alla riga spettrale monocromatica tipica. La luce prodotta dalle lampade ad alta pressione è di colore bianco tendente al giallo (2000-2500 K), caratteristica che le rende adatte solo per applicazioni in cui la resa dei colori non è importante. Il rendimento luminoso è elevato (fino a 115 lm/W), così come la vita utile (oltre 16.000 ore). Particolari accorgimenti costruttivi fanno fronte all'aggressività chimica del sodio.



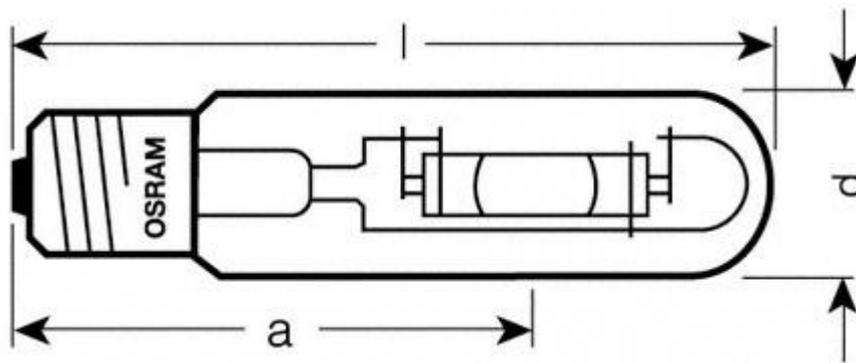


Lampade ad alogenuri metallici

L'introduzione nelle lampade a vapori di sodio ad alta pressione di ioduri metallici (NaI, TlI, InI₃, DyI₃, HoI₃, CsI, TmI₃) migliora la resa dei colori, con una temperatura di colore molto elevata (4000-5600 K).

La resa cromatica di queste lampade le rende particolarmente adatte all'illuminazione di impianti sportivi, dove la loro luce perfettamente bianca ha fatto passare in secondo piano il loro difetto iniziale di una bassa efficienza luminosa (40-80 lm/W) ed una bassa durata (6.000 ore). Attualmente, con un rendimento che raggiunge o supera 90 lm/W e con una durata 12.000 ore, vengono utilizzate anche nelle aree urbane per migliorare il confort visivo grazie all'indice di resa cromatica pari a 80-90.

Le lampade di questo tipo necessitano di appositi accenditori, in grado di produrre impulsi di tensione di innesco compresi tra 0,75 e 5 kV. Secondo il modello di lampada, il flusso luminoso a regime è raggiunto entro 2-10 minuti dall'accensione. In caso di spegnimento accidentale, occorre attendere il raffreddamento della lampada (2-15 minuti) prima di riaccenderla, a causa dell'elevata tensione di innesco per la riaccensione a caldo (25-60 kV). La corrente di spunto della lampada può superare il 190% del valore di regime. Inoltre, è necessario provvedere al rifasamento a causa del fattore di potenza basso (0,3-0,7).

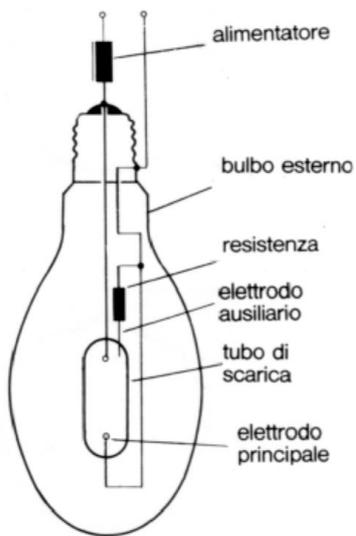


Lampade al mercurio

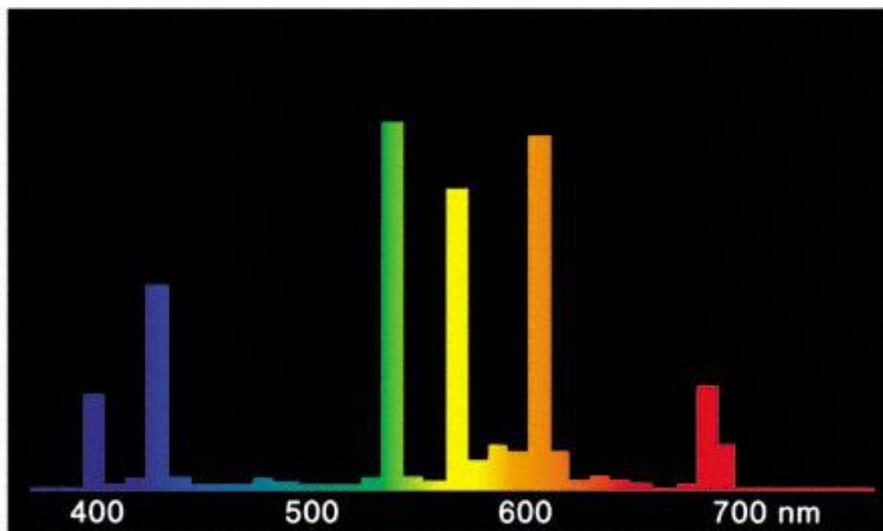
Emettono prevalentemente nello spettro ultravioletto mediante scarica elettrica in vapori di mercurio a bassa pressione all'interno di un piccolo tubo di quarzo protetto da un bulbo di vetro. Vengono usate per sterilizzare ambienti ed oggetti.

Se si riveste l'interno del tubo con materiale fluorescente in grado di convertire la radiazione UV in radiazione visibile, si ottiene una lampada fluorescente.

In serie alla lampada è montato l'alimentatore, mentre il dispositivo di accensione è interno alla lampada ed consiste in un elettrodo ausiliario.



Per stabilizzare la scarica occorre un alimentatore, perciò ne consegue un fattore di potenza di 0,5 circa. Per il rifasamento, si utilizzano condensatori inseriti in parallelo. Il flusso luminoso a regime è raggiunto dopo alcuni minuti dall'accensione.

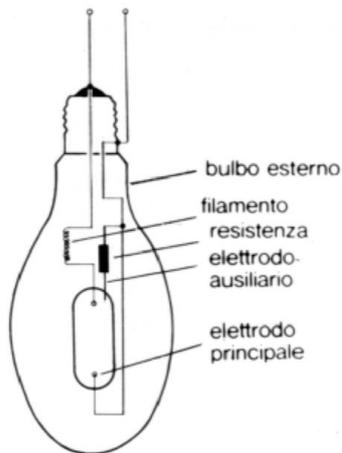


Lampade a luce miscelata

Sono la combinazione di una lampada a incandescenza e di una lampada a vapori di mercurio in un unico bulbo.

Oltre all'emissione di luce soprattutto nella banda del rosso, il filamento ad incandescenza serve da limitatore di corrente per la scarica. Pertanto, le lampade a luce miscelata non necessitano di alimentatori e sono direttamente intercambiabili con le lampade a incandescenza.

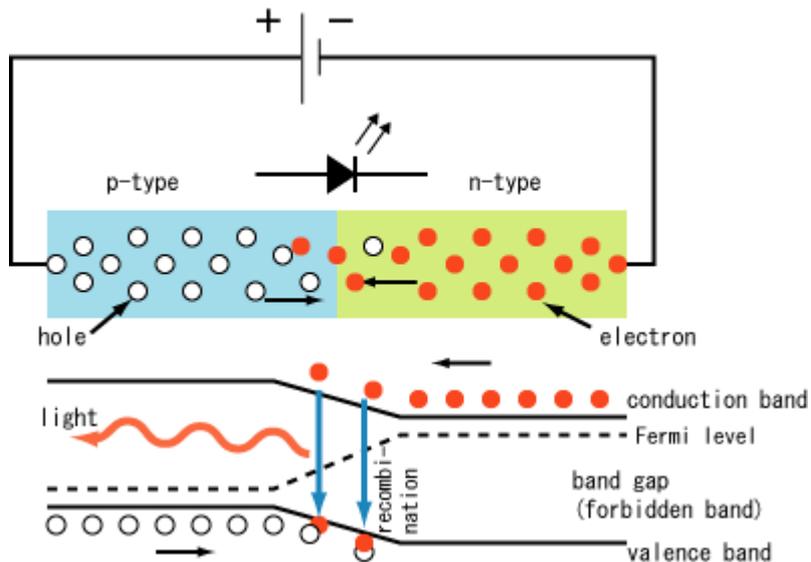
Durante il funzionamento, la luce generata dal filamento incandescente si miscela con quella prodotta dalla scarica elettrica assicurando così una tonalità più naturale. Per contro si ha un notevole abbassamento del rendimento energetico.



LED

La sigla indica il ***diode ad emissione luminosa (LED, Light Emitting Diode)***, sviluppato da Nick Holonyak Jr nel 1962.

Il dispositivo sfrutta le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni a partire dalla ricombinazione di coppie elettrone-lacuna. Gli elettroni e le lacune vengono iniettati in una zona di ricombinazione attraverso due regioni del diodo drogate con impurità di tipo diverso, e cioè di tipo "n" per gli elettroni e "p" per le lacune. Il colore della radiazione emessa è definito dalla differenza di energia tra i livelli energetici di elettroni e lacune e corrisponde tipicamente al valore della banda proibita del semiconduttore in questione.



I LED sono uno speciale tipo di **diodi a giunzione p-n**, formati da un sottile strato di materiale semiconduttore drogato. Quando sono sottoposti ad una tensione diretta per ridurre la barriera di potenziale della giunzione, gli elettroni della banda di conduzione del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente per generare fotoni. A causa dello spessore ridotto del chip, un ragionevole numero di questi fotoni può abbandonarlo ed essere emesso come luce. I LED sono formati da arseniuro di gallio (GaAs), fosfuro di gallio (GaP), fosfoarseniuro di gallio (GaAsP), carburo di silicio (SiC) e nitruro di gallio e indio (GaInN). La scelta dei semiconduttori determina la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni, l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

Anche se è cosa poco nota, i LED sono **macchine reversibili**: se la loro giunzione viene esposta direttamente ad una forte fonte luminosa o ai raggi solari, ai terminali appare una tensione, dipendente dall'intensità della radiazione e dal colore del led in esame (massima per il blu). Questa caratteristica viene abitualmente sfruttata nella realizzazione di sensori, per sistemi di puntamento (inseguitori solari) di piccoli impianti fotovoltaici o a concentratore.

Utilizzo

I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso. Venivano utilizzati come indicatori nei circuiti elettronici, nei display a sette segmenti e negli optoisolatori. Successivamente vennero sviluppati LED che emettevano luce gialla e verde e vennero realizzati dispositivi che integravano due LED, generalmente uno rosso e uno verde, nello stesso contenitore permettendo

di visualizzare quattro stati (spento, verde, rosso, verde+rosso=giallo) con lo stesso dispositivo.

Negli anni '90 del XX secolo vennero realizzati LED con efficienza sempre più alta e in una gamma di colori sempre più ampia fino a quando, con la realizzazione di LED a luce blu, non fu possibile realizzare dispositivi che, integrando tre LED (uno rosso, uno verde ed uno blu), potevano generare qualsiasi colore.

I LED in questi anni si sono diffusi in tutte le applicazioni in cui servono elevata affidabilità, lunga durata ed elevata efficienza; ad esempio:

- telecomandi ad infrarossi,
- indicazione di stato (lampade spia),
- retroilluminazione di LCD,
- semafori e luci di arresto delle automobili,
- cartelloni a messaggio variabile,
- illuminazione.

Impiego nell'illuminazione

I LED sono sempre più utilizzati in ambito illuminotecnico in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali. Il loro utilizzo nell'illuminazione domestica, quindi in sostituzione di lampade ad incandescenza, alogene o fluorescenti compatte (a risparmio energetico), è oggi possibile con notevoli benefici. Fondamentalmente, il limite dei LED per questo tipo di applicazione è la quantità di luce emessa (flusso luminoso espresso in lumen [lm]), che nei modelli di ultima generazione per uso professionale si attesta intorno a 120 lm, ma che nei modelli più economici raggiunge solo 20 lm. Una lampadina ad incandescenza da 60 W emette un flusso luminoso di circa 550 lm. Inoltre i LED più luminosi sono ancora quelli a luce fredda con resa cromatica relativamente bassa.

Il loro utilizzo diventa invece molto più interessante in ambito professionale, dove il rendimento di 40-60 lm/W li rende vantaggiosi. Come termine di paragone, una lampada ad incandescenza da 60-100 W ha un rendimento di circa 15 lm/W, una alogena di pari potenza un rendimento di circa 20 lm/W ed una fluorescente lineare un rendimento fino a 100 lm/W. Un altro limite illuminotecnico deriva dalle loro caratteristiche di emissione e durata, che sono fortemente condizionate dalle caratteristiche di alimentazione e dissipazione. Diventa dunque difficile individuare rapporti diretti tra le varie grandezze, tra le quali entra in gioco anche un ulteriore parametro, cioè l'angolo di emissione del fascio di luce, che può variare entro 4° ed oltre 120°.

Occorre sottolineare che, per applicazioni di illuminazione generale, sono indispensabili LED ad alta potenza (≥ 1 W), con correnti di esercizio minime di 350 mA. Al momento, il rendimento più alto fatto registrare da dispositivi ad alta potenza ad emissione di luce bianca appartiene ad un LED di Philips Lumileds Lighting Co., con un'efficienza luminosa di 115 lm/W a 350 mA. Agli inizi del 2008, ricercatori presso la Bilkent University in Turchia hanno messo a punto una nuova tecnica per produrre luce bianca da LED blu rivestiti con nanocristalli, ottenendo un rendimento di oltre 300 lm/W. Attualmente, dal punto di vista applicativo, i LED sono molto utilizzati quando l'impianto di illuminazione necessita delle seguenti caratteristiche:

- miniaturizzazione,
- saturazione dei colori,
- effetti dinamici (variazione di colore RGB)
- lunga durata e robustezza,
- valorizzazione di forme e volumi.

Riassumendo, i vantaggi dei LED dal punto di vista illuminotecnico sono i seguenti:

- durata di funzionamento (la durata dei LED è di uno-due ordini di grandezza superiore a quella delle sorgenti luminose tradizionali, specie in condizioni di stress meccanici; i LED ad alta emissione arrivano a circa 50.000 ore),
- prezzi contenuti,
- costi di manutenzione azzerati,
- elevato rendimento (soprattutto rispetto alle lampade ad incandescenza e alogene),
- luce pulita perché priva di componenti IR e UV,
- facilità di realizzazione di ottiche efficienti in plastica,
- flessibilità di installazione del punto luce,
- circuiti di alimentazione non complessi,
- elevata velocità di commutazione,
- saturazione dei colori,
- possibilità di un forte effetto spot (sorgente quasi puntiforme),
- funzionamento in sicurezza perché a bassissima tensione (normalmente entro 3-24 Vdc),
- accensione a freddo (fino a -40°C) senza problemi,
- insensibilità ad umidità e vibrazioni,
- assenza di mercurio,

- tecnologia di costruzione compatibile con quella dei circuiti integrati in silicio.

Assorbimenti elettrici dei LED	
Tipologia LED	Corrente elettrica assorbita
LED a basso consumo	3 – 10 mA
LED per uso generale	10 – 15 mA
LED flash	20 – 40 mA

Caratteristiche tecniche

In molti casi i LED sono alimentati in corrente continua con una resistenza in serie R_s per limitare la corrente diretta al valore di lavoro, il quale può variare da 5-6 mA fino a 20 mA quando è richiesta molta luce. Tale valore dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce emessa dal LED.

L'impiego della resistenza in serie è giustificato anche dalla necessità di garantire una lunga vita utile del dispositivo. In assenza di questa resistenza, un piccolo aumento della corrente farebbe diminuire il valore della resistenza differenziale del LED, come previsto dal grafico tensione/corrente. Tali variazioni, se di entità sufficiente, potrebbero innescare un differenziale negativo, in quanto la progressiva diminuzione della resistenza del LED causerebbe, a tensione costante, l'aumento della corrente ed un sempre maggiore riscaldamento per effetto Joule che porterebbe velocemente il dispositivo a bruciarsi.

Il valore della resistenza in serie R_s è calcolato mediante la **legge di Ohm** conoscendo la corrente di lavoro richiesta I_f , la tensione di alimentazione V_s e la differenza di potenziale del LED alla corrente di lavoro data, V_f .

Nel dettaglio, la formula per calcolare la resistenza in serie necessaria è la seguente:

$$R_s = (V_s - V_f) / I_f$$

che ha come unità di misura:

$$[\text{ohm} = \text{volt} / \text{ampere}]$$

Ad esempio, per $V_s = 12 \text{ V}$, $V_f = 1,8 \text{ V}$ e $I = 20 \text{ mA}$, si ha:

$$R_s = (12 - 1,8) / 0,020 = 510 \Omega$$

La differenza di potenziale V_f del LED può essere stimata in base a quella indicata nel datasheet del prodotto per una corrente di 20 mA. I LED devono operare solo con tensione diretta e non devono essere sottoposti a tensioni inverse superiori a pochi volt, che potrebbero danneggiarli. A differenza delle lampade ad incandescenza sono molto sensibili alle variazioni di tensione: basta il 10% in meno perché non si illuminino e il 10% in più per bruciarli.

In linea generale, se non si dispone del datasheet specifico, si può considerare per i LED consueti, con diametro di 5 mm, una tensione V_f pari a circa 2 V ed una corrente di lavoro I_f prudenziale di 10-15 mA e non oltre 20 mA. Valori superiori di corrente sono in genere sopportati, ma non assicurano un funzionamento duraturo. Quindi, secondo la suddetta formula, la resistenza dovrà essere compresa tra questi due valori:

$$R_{s \max} = (12 - 2) / 0,010 = 1000 \Omega \quad (\text{valore standard} = 1 \text{ k}\Omega)$$

$$R_{s \min} = (12 - 2) / 0,020 = 500 \Omega \quad (\text{valore standard} = 560 \Omega)$$

Per i LED di tipo flash, con correnti variabili tra 20 e 40 mA, i valori minimo e massimo della resistenza saranno pari rispettivamente a 250 e 500 Ω (valori standard 270 Ω e 470 Ω).

In caso di alimentazione in corrente alternata, occorre proteggere il LED dalla tensione inversa mediante un semplice circuito. Il metodo più semplice è quello di usare un diodo collegato in una cosiddetta **configurazione antiparallela**, cioè in parallelo al LED ma con polarità invertita per limitare la tensione inversa. Il LED è così protetto durante il ciclo negativo della sinusoide: si ha passaggio di corrente attraverso il diodo di protezione, ma non viene emessa luce, dimezzando l'efficienza.

È bene evitare di mettere il diodo di protezione in serie, in quanto entrerebbero in gioco le resistenze inverse (equivalenti) dei due componenti che, essendo di valore comparabile, potrebbero determinare ai capi del LED una tensione pericolosa.

Un metodo alternativo che mantiene attiva l'uscita luminosa consiste nell'usare un **ponte di quattro diodi** per assicurare che una corrente diretta scorra sempre attraverso il LED. Ovviamente, dal punto di vista dell'efficienza, il ponte di diodi ha senso soltanto se si alimentano più LED in serie, altrimenti l'energia dispersa nello stesso a causa delle sue cadute di tensione sarà inaccettabile.

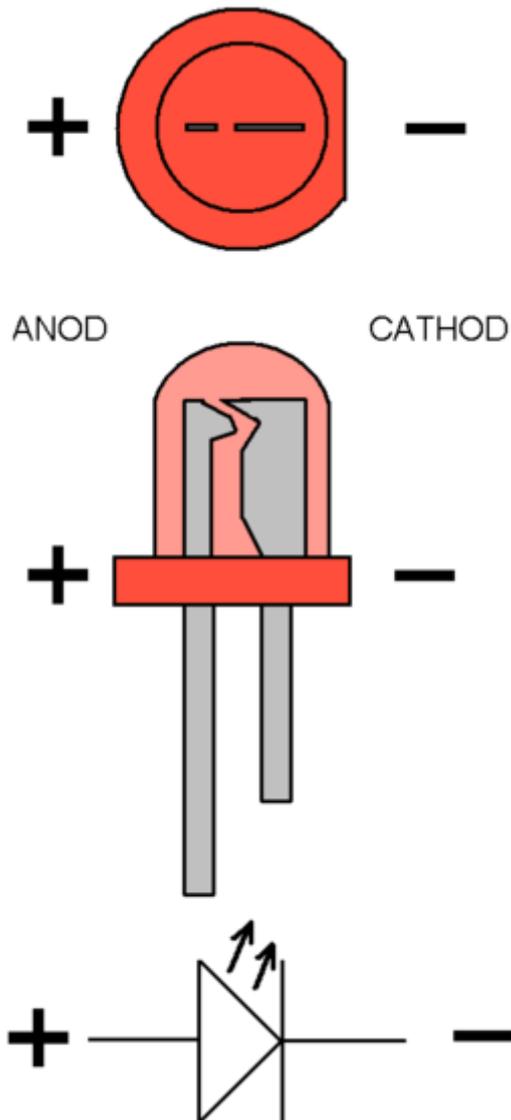
Se si vuole alimentare un LED con la tensione di rete, senza che il circuito dissipi troppa energia nella resistenza in serie, si può usare una configurazione costituita da un condensatore collegato in serie ad una sezione, che consiste nel LED in parallelo ad un diodo di protezione (con polarità invertita per limitare la tensione inversa), facendo seguire, ancora in serie, una resistenza di protezione, che serve a limitare la scarica all'accensione (di valore pari ad un decimo della reattanza del condensatore alla frequenza di rete). Il valore della capacità del condensatore dipenderà dalla reattanza (impedenza) che lo stesso dovrà presentare alla frequenza di rete per far scorrere la corrente desiderata (I_f) nel LED.

La massima quantità di luce che può essere emessa da un LED è limitata essenzialmente dalla massima corrente media sopportabile, che è determinata dalla massima potenza dissipabile dal chip. I recenti dispositivi progettati per impieghi professionali hanno una forma adatta ad accogliere un dissipatore termico, assolutamente necessario per smaltire il calore prodotto: sono ormai in commercio LED a luce bianca con potenza di 10 W e corrente assorbita di 1 A. Quando sono richiesti valori d'uscita più alti, normalmente si tende a non usare correnti continue, ma ad usare correnti pulsanti con ciclo operativo scelto in maniera opportuna. Ciò permette alla corrente e, di conseguenza, alla luce di essere notevolmente incrementate, mentre la corrente media e la potenza dissipata rimangono nei limiti consentiti.

Polarizzazione

Solitamente il terminale più lungo di un LED (diametro package 3 mm, 5 mm o superiori) è l'**anodo (+)** ed il terminale più corto il **catodo (-)**.

Inoltre, per polarizzare correttamente un diodo LED, si può sfruttare una caratteristica particolare del package: se si guarda il led dall'alto, si può notare come la parte laterale del package non sia regolare ma squadrata da un lato, ad identificare il catodo (-). Nel caso dei LED da 3 mm, si rende necessario l'uso di un tester, in quanto la squadratura, se presente, è quasi inavvertibile.



Esiste anche un metodo visivo per il riconoscimento del catodo o dell'anodo di un LED. Guardando all'interno del package trasparente si possono vedere due parti metalliche separate di diversa grandezza collegate ai terminali; la parte più grande è sempre collegata al catodo e, di conseguenza, la più piccola all'anodo (+).

Colori

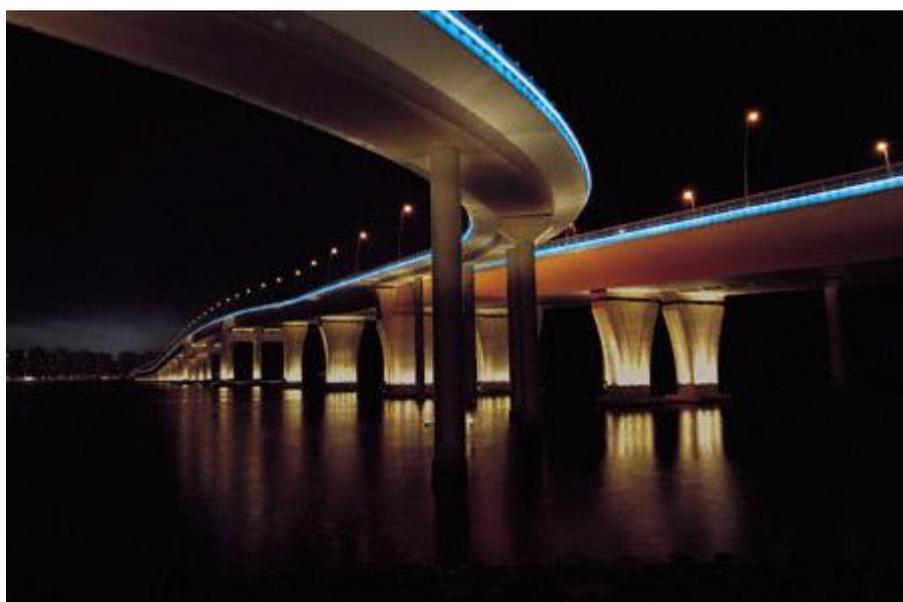
I LED convenzionali sono composti da vari materiali inorganici che producono i seguenti colori:

- AlGaAs - rosso ed infrarosso,
- GaAlP - verde,
- GaAsP - rosso, rosso-arancione, arancione e giallo,
- GaN - verde e blu,

- GaP - rosso, giallo e verde,
- ZnSe - blu,
- InGaN - blu-verde e blu,
- InGaAlP - rosso-arancione, arancione, giallo e verde,
- SiC come substrato - blu,
- Diamante (C) - ultravioletto,
- Silicio (Si) come substrato - blu (in sviluppo),
- Zaffiro (Al_2O_3) come substrato - blu,

Inoltre, la caduta di tensione dei LED è legata al colore della luce emessa, come riportato nella seguente tabella:

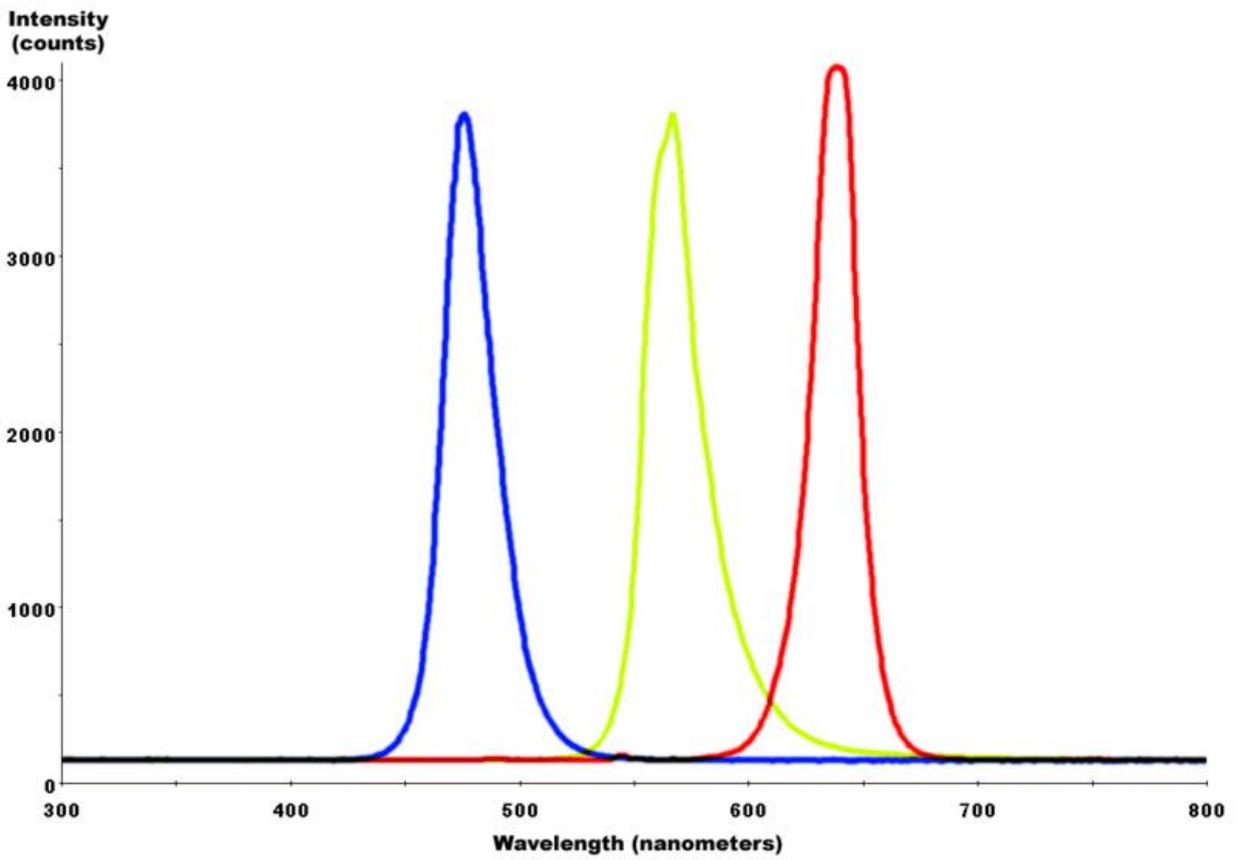
Relazione colore luce – caduta di tensione del LED	
Colore luce LED	Caduta di tensione V_f
Infrarosso	1,6 V
Rosso	1,8 – 2,1 V
Arancione	2,2 V
Giallo	2,4 V
Verde	2,6 V
Blu	3,0 – 3,5 V
Bianco	3,0 – 3,5 V
Ultravioletto	3,5 V





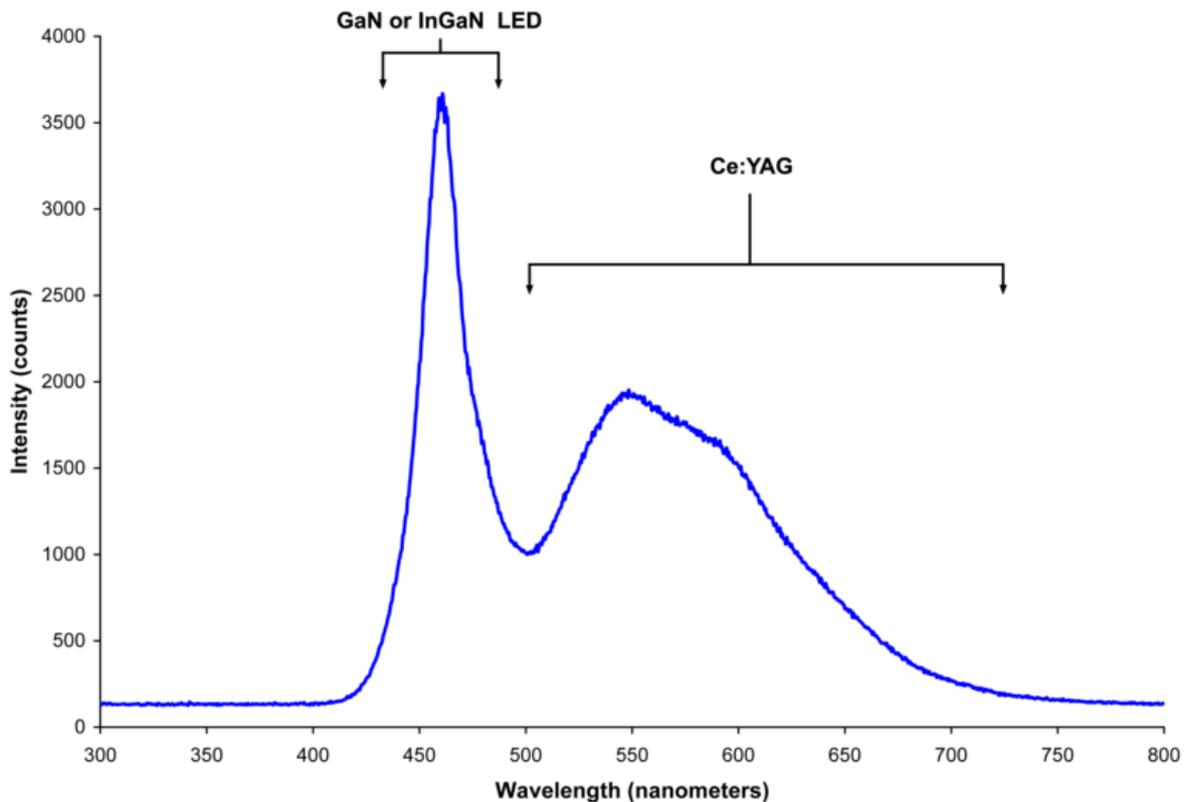
LED bianchi

Una combinazione di LED rossi, verdi e blu è in grado di produrre la sensazione di luce bianca, benchè gli attuali LED bianchi raramente sfruttino questo principio.





La maggior parte dei LED bianchi in produzione è rappresentata da varianti dei LED GaN–InGaN che emettono luce blu nell’intervallo di 450–470 nm. La struttura InGaN–GaN è ricoperta con fosfori giallognoli, costituiti solitamente da ***crystalli sintetici di ossidi di alluminio ed ittrio drogati con cerio (Ce³⁺:YAG, cerium-doped yttrium aluminum garnet)*** ridotti in polvere e collati con adesivi viscosi. Il chip del LED emette luce blu, convertita parzialmente in un’ampia banda centrata a circa 580 nm (giallo) dal Ce³⁺:YAG. Poiché i fotoni gialli stimolano i recettori rossi e verdi nella retina dell’occhio, la miscela risultante di luce blu e gialla appare bianca, con una tonalità denominata ***lunar white***. Questa tecnica è stata sviluppata da Nichia Corporation ed è utilizzata nella produzione di LED bianchi dal 1996.



L'emissione di colore giallo pallido del Ce^{3+} :YAG può essere modificata sostituendo il cerio con altre terre rare, quali il terbio (Tb) ed il gadolinio (Gd), o, in misura ancora maggiore, sostituendo parzialmente o totalmente l'alluminio con il gallio (Ga). A causa della banda spettrale limitata del diodo, i colori rossi e verdi illuminati dalla sua luce blu-gialla risultano meno vivaci che in luce bianca naturale. Le variazioni di composizione e spessore dei fosfori permettono di produrre LED con differenti temperature di colore, dal giallo caldo al blu freddo.

Una tecnica alternativa per ottenere LED bianchi consiste nel ricoprire i LED che emettono nell'**ultravioletto vicino (NUV, Near Ultraviolet)** con una miscela ad alto rendimento di fosfori a base di europio (Eu), che emettono nel rosso e nel blu, e di solfuro di zinco drogato con rame ed alluminio ($\text{ZnS}:\text{Cu}$, Al), che emettono nel verde. Il principio di funzionamento è analogo a quello delle lampade fluorescenti. Tuttavia, la luce ultravioletta causa la fotodegradazione della resina epossidica e di altri materiali usati nel package dei LED, abbreviandone la vita utile. Inoltre, questa tecnica è meno efficiente di quella dei LED blu con fosfori Ce^{3+} :YAG, in quanto comporta un maggior sviluppo di calore; ma la luce generata presenta caratteristiche spettrali migliori. La brillantezza dei due tipi di LED è all'incirca equivalente grazie alla maggiore emissione di quelli ultravioletti.

Una tecnica più recente prevede la produzione di LED a luce bianca senza impiego di fosfori, basata sulla crescita omoepitassiale di seleniuro di zinco (ZnSe) su un substrato dello stesso materiale, in grado di emettere simultaneamente luce blu dalla regione attiva e luce gialla dal substrato.

Per crescita epitassiale si intende la deposizione di sottili strati di materiale cristallino su un substrato massivo, pure cristallino, che ne indirizza la crescita e ne determina le proprietà strutturali. Lo spessore dello strato epitassiale può variare da frazioni di nanometro a centinaia di micrometri, l'epitassia può definirsi omoepitassia, quando il materiale epitassiale è lo stesso del substrato massivo, eteroepitassia, quando il materiale epitassiale è chimicamente differente dal substrato.

Pannelli a LED

Pannelli a LED discreti

Sono prevalentemente utilizzati in esterni, ad esempio negli stadi. I LED sono montati singolarmente sul pannello a formare terne di LED rossi, verdi e blu ed ogni terna costituisce un pixel. La distanza tra i centri di pixel adiacenti determina la risoluzione del pannello.

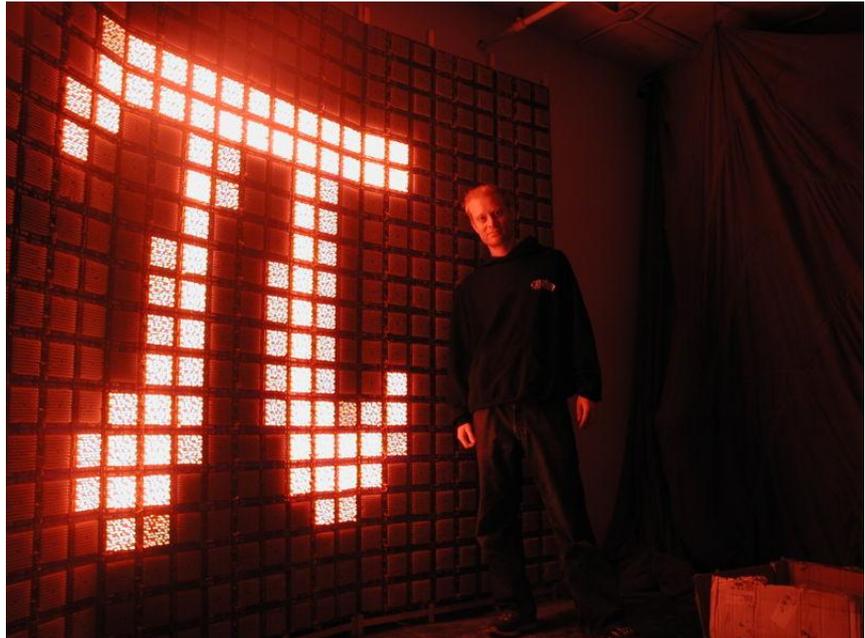
L'impiego in esterni richiede schermi con una luminanza minima di 2000 cd/m^2 (ufficiosamente: $1 \text{ cd/m}^2 = 1 \text{ nit}$); ma la visione diretta in piena luce solare rende preferibile utilizzare luminanze fino a 5000 nit (se necessario, è possibile ridurre la luminanza rispetto al valore massimo di progetto del pannello).



Pannelli a montaggio superficiale

Sono prevalentemente utilizzati in interni, ad esempio in manifestazioni fieristiche, ma stanno imponendosi anche per impieghi in esterni. I LED sono installati sul pannello mediante **montaggio superficiale (SMD, Surface Mounted Device)**. Il pixel SMD è costituito da una terna di LED rossi, verdi e blu montati su chipset, a sua volta montato su circuito stampato. I singoli LED sono di dimensioni ridottissime e la loro densità di montaggio è molto elevata. La massima distanza di visione si riduce del 25% circa rispetto ai pannelli a LED discreti di pari risoluzione.

L'impiego in interni richiede schermi SMD con una luminanza minima di 600 cd/m^2 ; ma la visione in condizioni ambientali di elevata luminosità rende preferibile utilizzare luminanze maggiori. Per contro, può rendersi necessario ridurre la luminanza e la temperatura di colore degli schermi utilizzati negli studi televisivi (infatti, i pannelli hanno usualmente una temperatura di colore compresa tra 6500 K e 9000 K, quindi con una tonalità più blu di quella dei set televisivi).

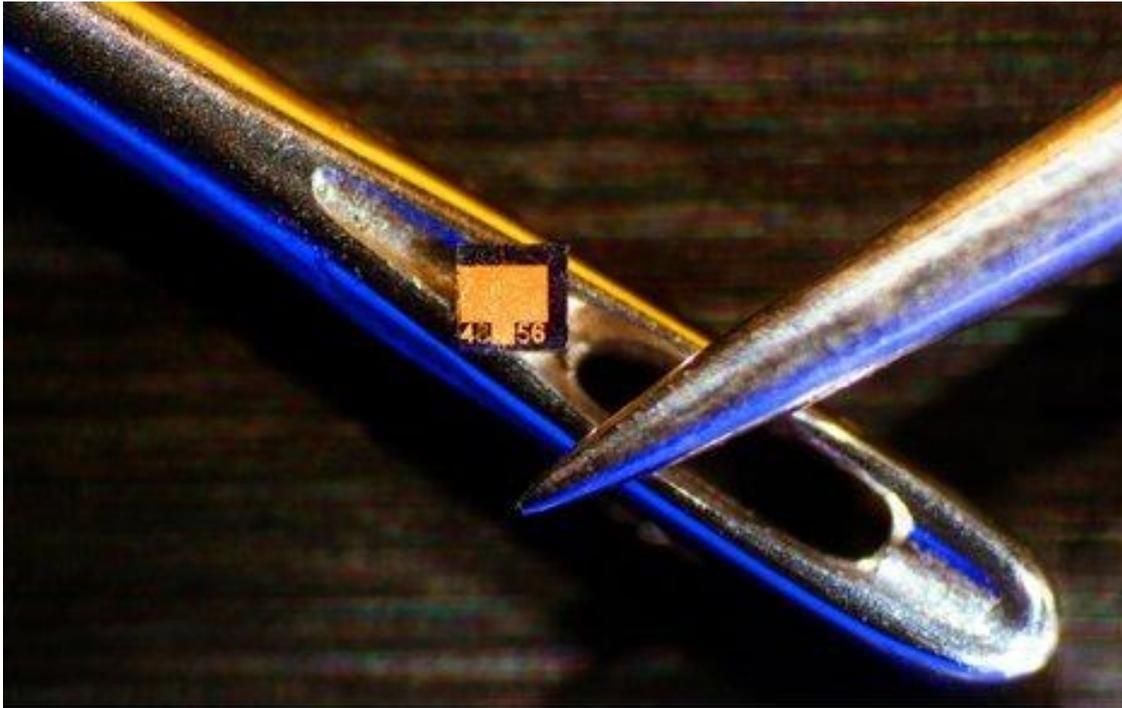


Laser

La sigla indica l'**amplificazione di luce tramite emissione stimolata di radiazioni (LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)**.

Il laser è un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce coerente, monocromatica e (con alcune eccezioni) concentrata in un raggio rettilineo estremamente collimato. Inoltre, la brillantezza delle sorgenti laser è elevatissima a paragone di quella delle sorgenti luminose tradizionali.

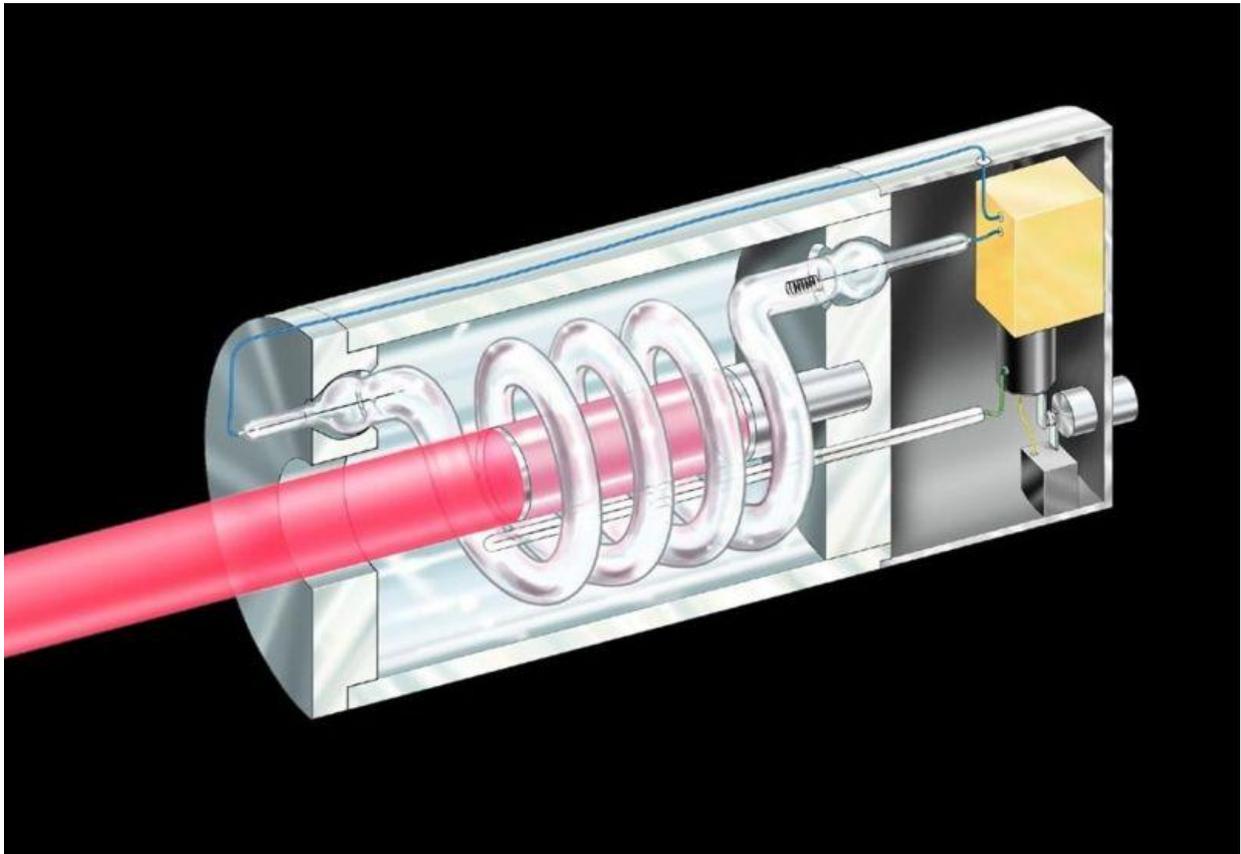
Le proprietà di **coerenza, direzionalità, monocromaticità ed elevata brillantezza** sono alla base del vasto ventaglio di applicazioni dei dispositivi laser nei campi più disparati: l'elevatissima brillantezza, conseguente alla concentrazione di una grande potenza in un'area molto piccola, permette di eseguire operazioni di taglio, incisione e saldatura di metalli; la monocromaticità e la coerenza li rendono ottimi strumenti di misura di distanze, spostamenti e velocità; sempre la monocromaticità li rende adatti a trasportare informazioni nelle fibre ottiche e per distanze lunghissime.



Le dimensioni dei laser spaziano dai microscopici diodi laser (in alto), dalle numerosissime applicazioni, ai giganteschi laser neodimio-vetro (in basso), estesi quanto un campo sportivo ed impiegati per ricerche sulla fusione nucleare a confinamento inerziale ed esperimenti di fisica con altissime densità di energia.

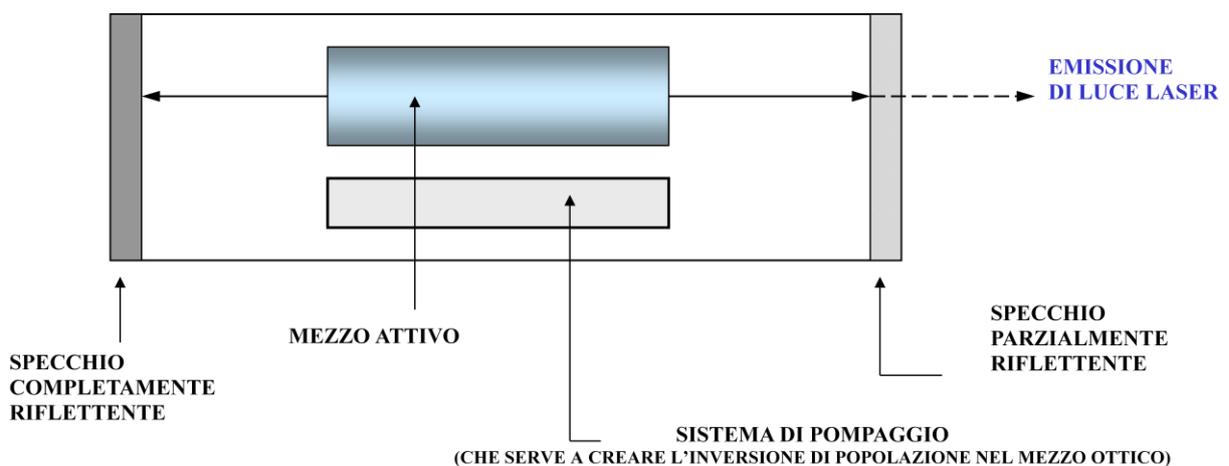
Il primo laser è stato messo a punto nel maggio del 1960 da Theodore Maiman presso gli Hughes Research Laboratories. Si trattava di un laser a stato solido, dove il mezzo attivo era un cristallo di rubino sintetico ed il sistema di pompaggio era una lampada a scarica elettrica. L'emissione laser

era costituita da impulsi luminosi della durata di un millisecondo e con lunghezza d'onda di 694,3 nm, corrispondente ad un colore rosso cupo.



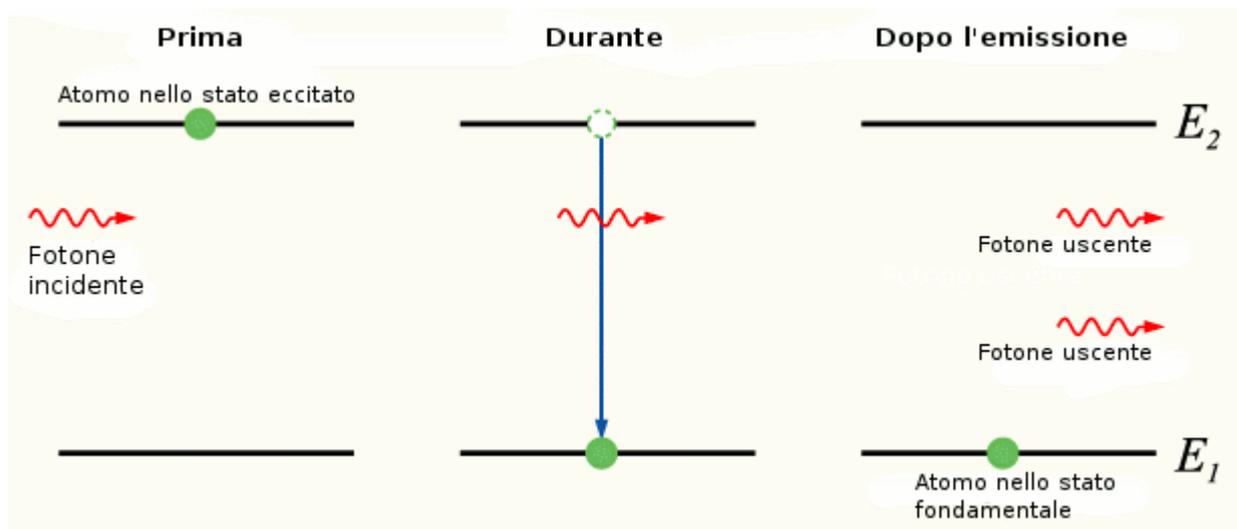
Fisica del laser

Un laser è composto da un **mezzo attivo** e da una **cavità ottica risonante**.



Il mezzo attivo ha il compito di trasferire l'energia esterna nel fascio laser ed è realizzato con materiali di purezza, dimensioni, concentrazione e

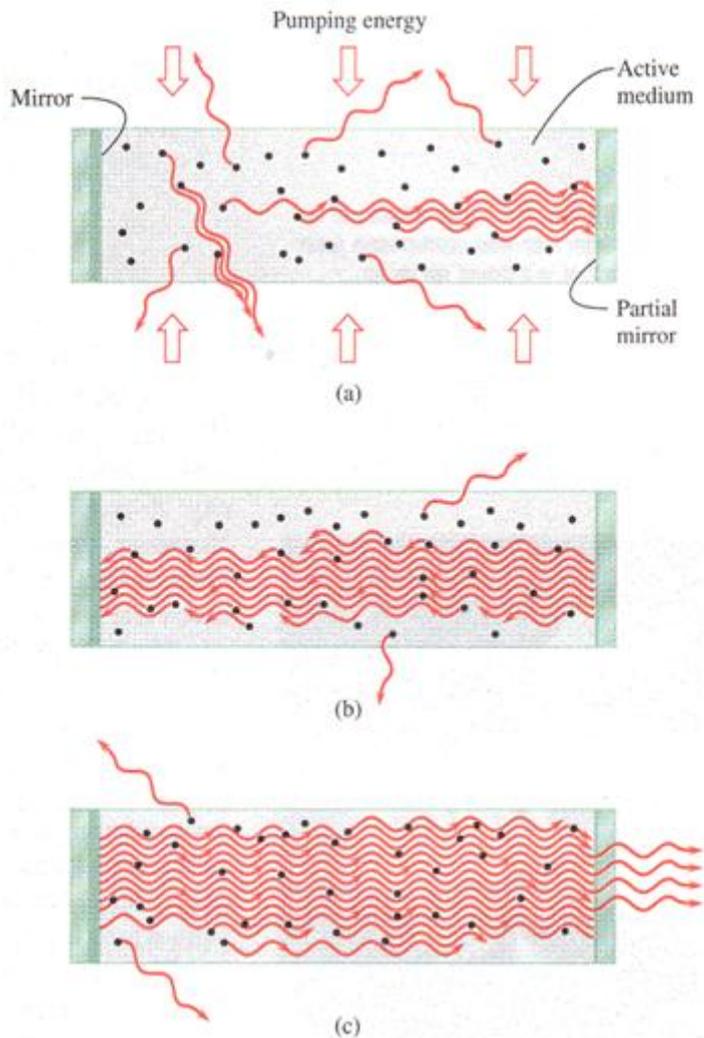
forma controllate al fine di amplificare il fascio mediante processo di emissione stimolata. Il mezzo attivo viene energizzato, o pompato, da una sorgente di energia esterna: ad esempio, un lampeggiatore o un altro laser. L'**energia di pompa** assorbita porta gli atomi o le molecole del mezzo attivo in **stati quantici ad alta energia (stati eccitati)**. Gli atomi o le molecole interagiscono con la luce assorbendo o rilasciando fotoni e si può avere **emissione luminosa spontanea o stimolata**. Nel caso di emissione stimolata, il fotone è rilasciato nella stessa direzione della luce in transito.



Quando il numero di atomi o molecole in uno stato eccitato supera quello corrispondente ad uno stato di minore energia, si ha l'**inversione di popolazione** e la quantità di energia emessa per stimolazione dovuta alla luce in transito è maggiore della quantità di energia assorbita, ottenendo così l'amplificazione luminosa.

La luce generata per emissione stimolata è molto simile al segnale in ingresso in termini di lunghezza d'onda, fase e polarizzazione, conferendole la caratteristica di coerenza e consentendole di mantenere la polarizzazione uniforme e, sovente, la monocromaticità prevista dal progetto della cavità ottica.

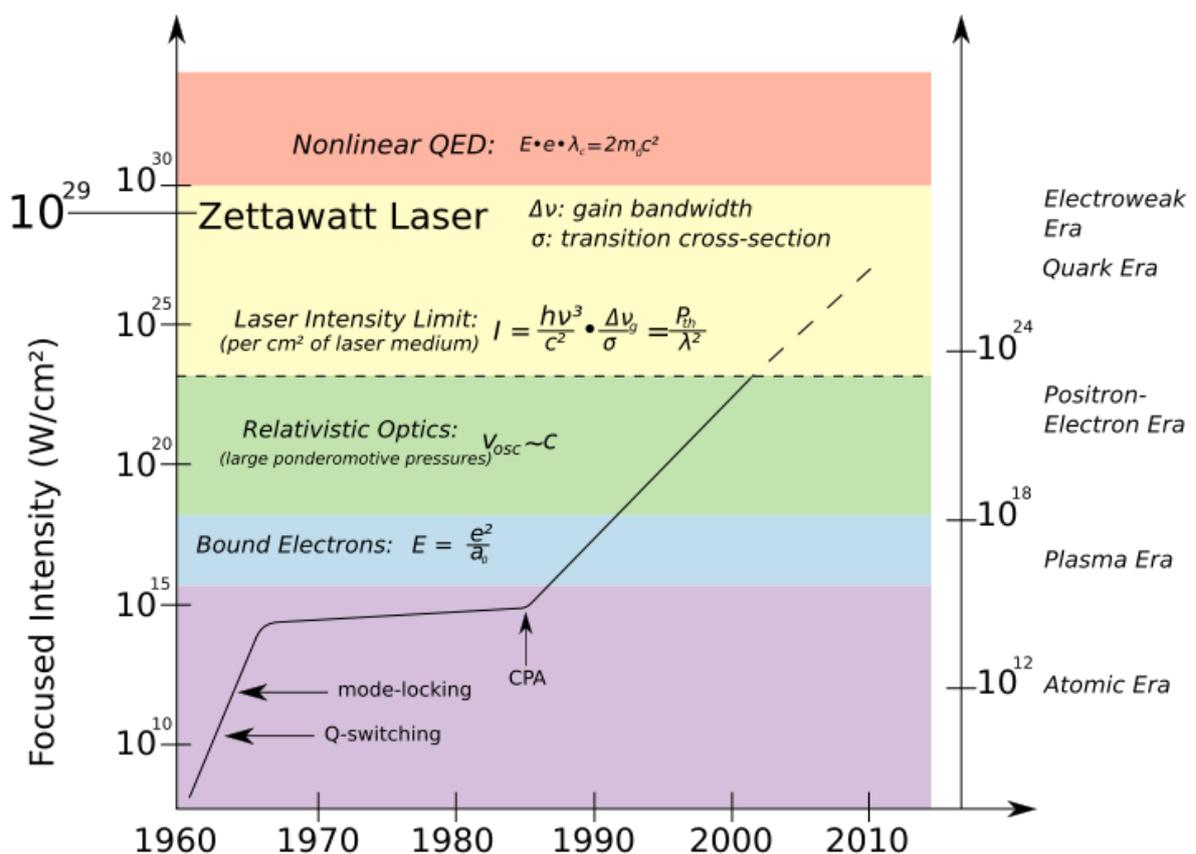
La cavità ottica, un **risonatore a cavità**, confina il fascio luminoso coerente tra le superfici riflettenti, in modo che la luce attraversi il mezzo attivo più volte prima di essere emesso dall'apertura di uscita o perso per diffrazione o assorbimento.



Se l'amplificazione nel mezzo attivo attraversato è maggiore delle perdite del risonatore, la potenza della luce circolante può crescere esponenzialmente. Ma ciascun evento di emissione stimolata riporta un atomo o una molecola dallo stato eccitato allo stato fondamentale, riducendo la capacità di ulteriore amplificazione del mezzo attivo. Quando questo effetto si intensifica, si è nella condizione di **amplificazione saturata**. Il bilanciamento tra la **potenza di pompa**, la saturazione dell'amplificazione e le perdite della cavità porta alla condizione di equilibrio la potenza all'interno della cavità che, a sua volta, determina l'attivazione del laser. Se la potenza di pompa prescelta è insufficiente, l'amplificazione non è in grado di compensare le perdite del risonatore ed il laser emette luce a bassissima potenza. La potenza di pompa minima per attivare il laser è definita **soglia laserante**. Il mezzo attivo amplificherà i fotoni circolanti indipendentemente dalla loro direzione; ma solo quelli allineati con l'asse della cavità potranno attraversarlo più di una volta, ottenendo così un'amplificazione significativa.

Il fascio luminoso può essere altamente collimato, cioè costituito da **fotoni non divergenti**. Tuttavia, la **diffrazione** rende impossibile generare un fascio perfettamente collimato. Il fascio rimane collimato su distanze proporzionali al quadrato del suo diametro e diverge con un angolo inversamente proporzionale al suo diametro. Così, un fascio generato da un piccolo laser da laboratorio, tipo elio-neon, si allarga a circa 1,6 km di diametro se inviato dalla Terra alla Luna. Per confronto, il fascio di un tipico laser a semiconduttori, caratterizzato da un diametro ridotto, diverge quasi subito dopo l'emissione con un angolo di quasi 50°. È tuttavia possibile trasformare il fascio divergente in un fascio collimato mediante lenti.

Il fascio luminoso del laser può essere un **fascio continuo ad amplificazione costante (CW, continuous wave)** o un **fascio pulsato** mediante tecniche di **commutazione Q, modelocking o commutazione di guadagno**. Il funzionamento pulsato consente di ottenere potenze di picco più alte.



Alcuni tipi di laser, come i laser a coloranti, sono in grado di emettere luce entro un ampio spettro di lunghezze d'onda; questa proprietà li rende adatti a generare impulsi luminosi estremamente brevi, dell'ordine di qualche **femtosecondo (fs = 10⁻¹⁵ s)**.

Inversione di popolazione

In fisica, e più specificamente in meccanica quantistica, si parla di **inversione di popolazione** quando un sistema costituito da un gruppo di corpi elementari (per esempio atomi, molecole o particelle) presenta più corpi in stato eccitato che corpi in stati di minore energia. Questa particolare condizione è alla base del funzionamento di alcuni tipi di transistor, diodi ed altri semiconduttori nonché dei dispositivi laser.

Per comprendere in che cosa consiste l'inversione di popolazione, è necessario prima analizzare come è costituita una **popolazione normale** nella meccanica statistica. Ad esempio, si consideri un gruppo di atomi in grado di assumere due stati energetici diversi, il primo con energia E_1 e l'altro con energia $E_2 > E_1$: lo stato 1 è quello base e lo stato 2 quello eccitato.

Ogni atomo nello stato eccitato ha una certa probabilità P_{21} di decadere nello stato base, emettendo energia, entro un certo intervallo di tempo:

$$P_{21} = B \cdot N_2 \cdot \rho(f_{12})$$

dove: B = coefficiente di Einstein,
 N_2 = popolazione nello stato di energia E_2 , con $E_2 > E_1$,
 $\rho(f_{12})$ = densità del campo di radiazione alla frequenza f_{12} ,
 $f_{12} = (E_2 - E_1) / h$.

Ed ogni atomo nello stato base ha una certa probabilità P_{12} di assorbire energia, dagli altri atomi del sistema o da urti con l'esterno del sistema stesso, e di passare nello stato eccitato, entro lo stesso intervallo di tempo:

$$P_{12} = B \cdot N_1 \cdot \rho(f_{12})$$

dove: B = coefficiente di Einstein,
 N_1 = popolazione nello stato di energia E_1 ,
 $\rho(f_{12})$ = densità del campo di radiazione alla frequenza f_{12} ,
 $f_{12} = (E_2 - E_1) / h$.

Quindi, il rapporto fra atomi eccitati ed atomi normali dipenderà sia dal rapporto fra le due distribuzioni stocastiche, che descrivono il numero di atomi nello stato relativo al passare del tempo, sia dalla temperatura del

sistema, che esprime la densità di energia mediamente disponibile nel sistema.

Poiché le due distribuzioni sono esponenziali, la relazione risultante è la seguente:

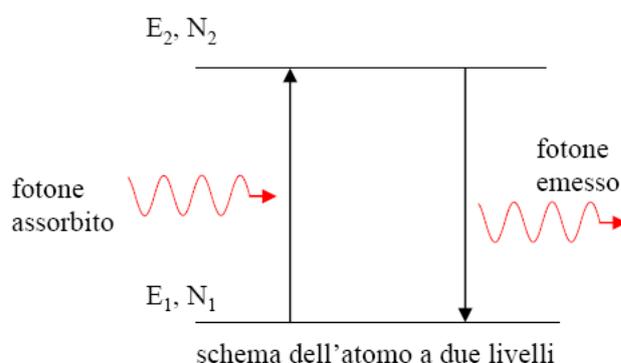
$$N_2 / N_1 = e^{-(E_2 - E_1)/kT}$$

dove: N_1 = popolazione nello stato di energia E_1 ,
 N_2 = popolazione nello stato di energia E_2 ,
 k = costante di Boltzmann,
 T = temperatura assoluta del sistema.

Le due probabilità P_{12} e P_{21} sono identiche e sono incorporate nella costante di Boltzmann.

In condizioni di equilibrio, N_1 è sempre maggiore di N_2 : considerando atomi a temperatura ambiente all'equilibrio termodinamico, con un salto di energia fra i due stati di 2,07 eV (pari all'energia media di un fotone di luce visibile), il numero di atomi in stati eccitati è infinitesimo: $1,8 \cdot 10^{-38}$. Questo valore cresce lentamente all'aumentare della temperatura, ma rimane sempre molto piccolo; ad una temperatura di 4.000 K, gli atomi eccitati saranno solo 4 su 10.000. Se non si altera l'equilibrio termodinamico del sistema con una fonte di energia esterna, è impossibile ottenere un'inversione di popolazione a temperatura ambiente.

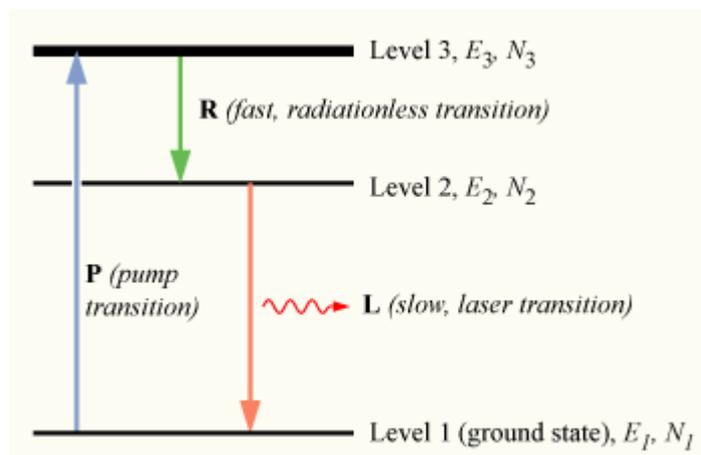
È ugualmente impossibile raggiungere una condizione di inversione di popolazione in un sistema di atomi che abbia soltanto due stati energetici possibili. Poiché la probabilità di salto energetico da uno stato all'altro è la stessa nei due sensi, il massimo ottenibile sarebbe un pareggio: lo stesso numero di atomi in tutti e due gli stati.



Per ottenere il risultato desiderato, servono atomi in grado di assumere almeno tre stati energetici diversi. Nel caso dei laser, i dispositivi che più di tutti sfruttano il fenomeno dell'inversione di popolazione, si usano quasi esclusivamente sistemi atomici a tre o a quattro livelli energetici. Nei dispositivi a semiconduttore non esistono livelli energetici, bensì intere bande di energie permesse: il fenomeno dell'inversione di popolazione si esprime nello svuotamento e nel riempimento di queste bande da parte degli elettroni e delle lacune.

Sistemi a tre livelli di energia

Si consideri un gruppo di N atomi, ognuno con tre possibili stati di energia. Ai livelli 1, 2 e 3 corrispondono rispettivamente le energie E_1 , E_2 e E_3 , con $E_1 < E_2 < E_3$, e le popolazioni N_1 , N_2 e N_3 .



Inizialmente, il gruppo è in equilibrio termico e la maggioranza degli atomi è nello stato fondamentale, caratterizzato da $N_1 \approx N$, $N_2 \approx N_3 \approx 0$.

Se ora si illumina il gruppo con una radiazione di frequenza f_{31} , con $E_3 - E_1 = hf_{31}$, il processo di assorbimento ottico ecciterà gli atomi dallo stato fondamentale al livello 3.

Questo processo è detto **pompaggio** e, in generale, non richiede esclusivamente l'impiego di luce; è, infatti, possibile ricorrere anche ad altri metodi di eccitazione del mezzo attivo, basati su scariche elettriche o reazioni chimiche.

Il livello 3 è anche denominato **livello di pompa o banda di pompa**, mentre la transizione di energia $E_1 \rightarrow E_3$ è indicata come **transizione di pompa (P)**.

Il pompaggio deve indurre l'eccitazione di un numero consistente di atomi nel livello 3, in modo che $N_3 > 0$. In un mezzo attivo idoneo, gli atomi eccitati decadono rapidamente nel livello 2. Sebbene l'energia rilasciata possa essere emessa sotto forma di fotone (emissione spontanea), la transizione $3 \rightarrow 2$ avviene solitamente senza radiazione: **transizione non radiativa (R)**. Infatti, l'energia rilasciata incrementa il **moto vibrazionale (calore)** del materiale circostante l'atomo, senza generazione di un fotone.

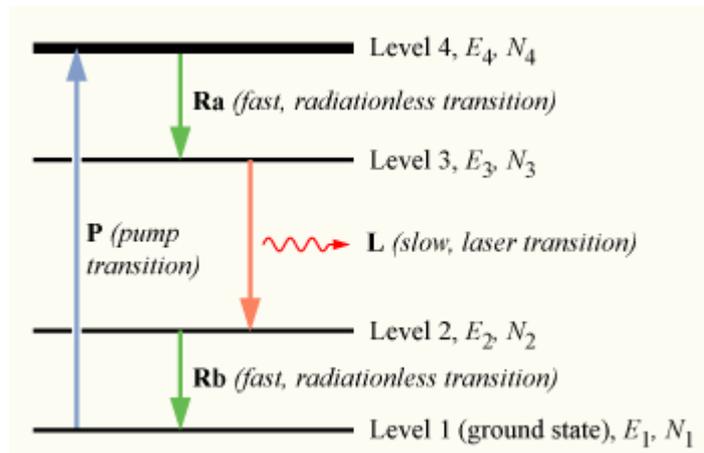
Un atomo nel livello 2 può decadere nello stato fondamentale per emissione spontanea, rilasciando un fotone di frequenza f_{21} , con $E_2 - E_1 = hf_{21}$; in questo caso si parla di **transizione radiativa (L) o transizione laser**. Se il tempo di transizione t_{21} è molto più grande del tempo di transizione senza radiazione t_{32} ($t_{21} \gg t_{32}$, **rapporto favorevole dei tempi di transizione**), la popolazione con energia E_3 sarà praticamente nulla ($N_3 \approx 0$) ed una popolazione di atomi eccitati si accumulerà nel livello 2 ($N_2 > 0$). Se oltre la metà degli N atomi si accumula in questo stato, N_2 supererà la popolazione dello stato fondamentale N_1 . Il risultato sarà l'**inversione di popolazione ($N_2 > N_1$)** tra i livelli 1 e 2, rendendo così possibile l'**amplificazione ottica alla frequenza f_{21}** .

Poiché almeno metà degli N atomi deve essere eccitata per ottenere l'inversione di popolazione, è necessario un intenso pompaggio del mezzo attivo. I laser a tre livelli risultano quindi alquanto inefficienti, benché siano stati i primi ad essere messi a punto (laser a rubino di Theodore Maiman, 1960).

Un sistema a tre livelli può anche avere la transizione radiativa tra i livelli 3 e 2 e la transizione non radiativa tra i livelli 2 e 1. In questo caso, l'intensità di pompaggio necessaria è minore.

Sistemi a quattro livelli di energia

Si consideri un gruppo di N atomi, ognuno con quattro possibili stati di energia. Ai livelli 1, 2, 3 e 4 corrispondono rispettivamente le energie E_1 , E_2 , E_3 e E_4 , con $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$, e le popolazioni N_1 , N_2 , N_3 e N_4 .



In questo sistema, la **transizione di pompa (P)** eccita gli atomi dallo stato fondamentale (livello 1) nel livello di pompa (livello 4). Dal livello 4, decadono mediante una rapida **transizione non radiativa (Ra)** nel livello 3. Poiché il tempo di transizione laser t_{32} è lungo rispetto al tempo di transizione non radiativa t_{43} ($t_{32} \gg t_{43}$), la popolazione nel livello 3 (**livello laser superiore**) non è nulla e può decadere per emissione spontanea o stimolata nel livello 2 (**livello laser inferiore**). Il decadimento dal livello 2 nello stato fondamentale è una rapida **transizione non radiativa (Rb)**.

Poiché le transizioni non radiative sono rapide, l'esaurimento della popolazione nella banda di pompa è molto veloce ($N_4 \approx 0$). Nei sistemi a quattro livelli, ogni atomo nel livello laser inferiore si diseccita altrettanto velocemente, cosicché la popolazione presente è trascurabile ($N_2 \approx 0$). Questo è importante, in quanto la popolazione accumulatasi nel livello laser superiore determinerà un'inversione di popolazione rispetto al livello 2. In altri termini, **per $N_3 > 0$ si ha $N_3 > N_2$ con conseguente inversione di popolazione**. Quindi, l'amplificazione ottica e l'emissione laser avvengono alla **frequenza f_{32} ($E_3 - E_2 = hf_{32}$)**.

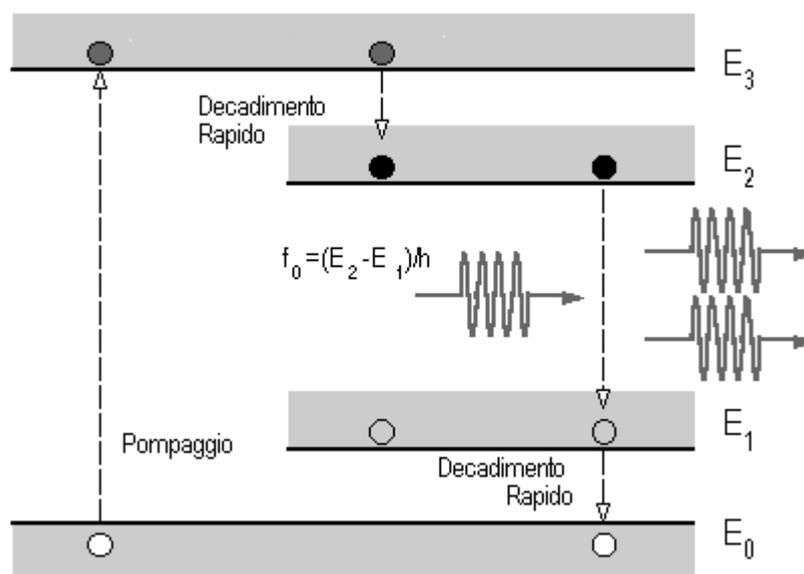
Poiché sono sufficienti pochi atomi nel livello laser superiore per formare l'inversione di popolazione, i laser a quattro livelli sono più efficienti di quelli a tre livelli e pertanto costituiscono il tipo più diffuso di dispositivi ad emissione stimolata.

Sia nei laser a tre livelli sia in quelli a quattro livelli, l'energia della transizione di pompa è superiore a quella della transizione laser. Questo significa che, in caso di pompaggio luminoso, la frequenza della luce di eccitazione deve essere superiore a quella della luce laser emessa. In altri termini, ***la lunghezza d'onda di pompa è più corta della lunghezza d'onda laser.***

Sebbene, come visto finora, il funzionamento di molti laser si basi sulla transizione di atomi tra differenti stati elettronici di energia, questo non è l'unico meccanismo di emissione laser. Ad esempio, in alcuni laser di impiego comune, quali i laser a coloranti ed i laser ad anidride carbonica (CO₂), il mezzo attivo è costituito da molecole e gli stati di energia corrispondono ai loro modi vibrazionali e rotazionali.

Sistemi a bande di energia

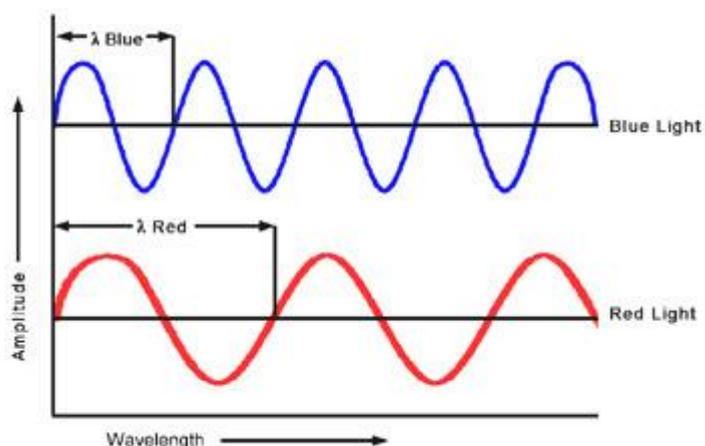
Nei laser a semiconduttori, il meccanismo di emissione può comprendere anche più di quattro livelli di energia, con processi di eccitazione e decadimento molto complessi. In particolare, la banda di pompa può risultare costituita da diversi singoli livelli di energia o da un insieme continuo di livelli, consentendo il pompaggio del mezzo attivo entro un ampio spettro di lunghezze d'onda.



Caratteristiche della radiazione laser

Monocromaticità

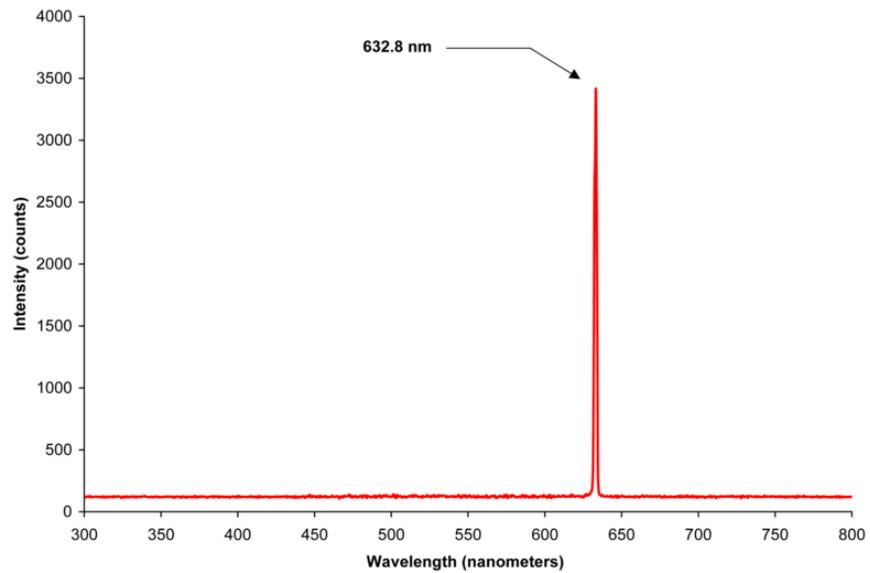
Ogni onda elettromagnetica è caratterizzata dalla lunghezza d'onda λ che, a sua volta, determina il colore della luce corrispondente.



Tutte le usali sorgenti luminose emettono luce composta da differenti lunghezze d'onda. Normalmente, una luce colorata è costituita da un'ampia banda di lunghezze d'onda che coprono una o più specifiche porzioni dello spettro visibile.

Per contro, se si considera ad esempio un laser a gas elio-neon, la sua luce è di colore rosso con un elevato grado di purezza, poiché è composto da una banda

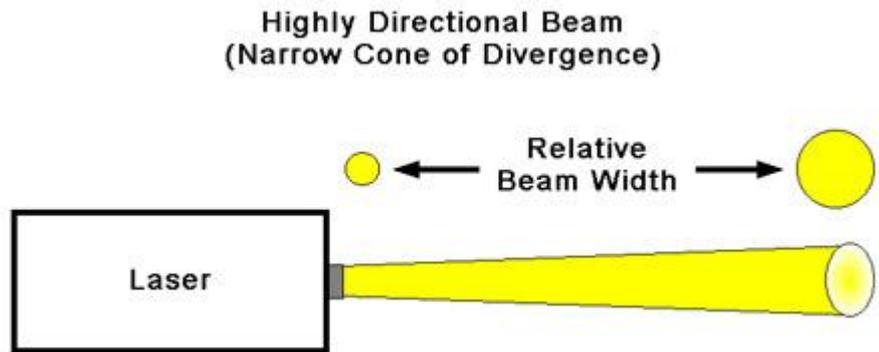
estremamente ristretta di lunghezze d'onda nella porzione rossa dello spettro visibile.



Si tratta quindi di una *luce quasi monocromatica*, una proprietà specifica dei dispositivi laser. Sebbene la luce emessa dai laser non sia perfettamente monocromatica, ha comunque un grado di monocromaticità di gran lunga superiore a quello di qualsiasi altra sorgente luminosa.

Direzionalità

Le usuali sorgenti luminose emettono luce in tutte le direzioni. Anche se si dotano le lampade di sistemi ottici per la collimazione della luce emessa, il raggio direzionale uscente tende rapidamente a divergere. La figura sottostante illustra la natura altamente direzionale della luce prodotta da un laser.

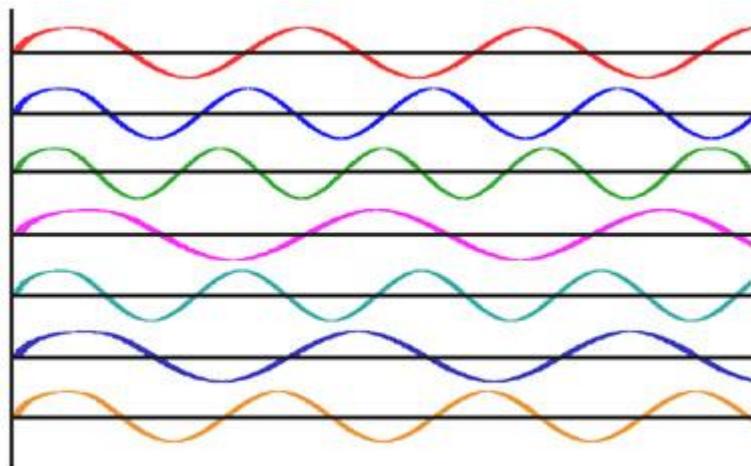


La direzionalità è la caratteristica che consente alla luce laser di muoversi in una singola direzione entro un **ristrettissimo cono di divergenza**.

Nella realtà, non è possibile generare raggi luminosi unidirezionali perfettamente paralleli, indicati come **luce collimata**, vista la loro tendenza a disperdersi durante il loro movimento. Ma la luce laser ha un grado di collimazione superiore a quello della luce emessa da qualsiasi altro tipo di sorgente.

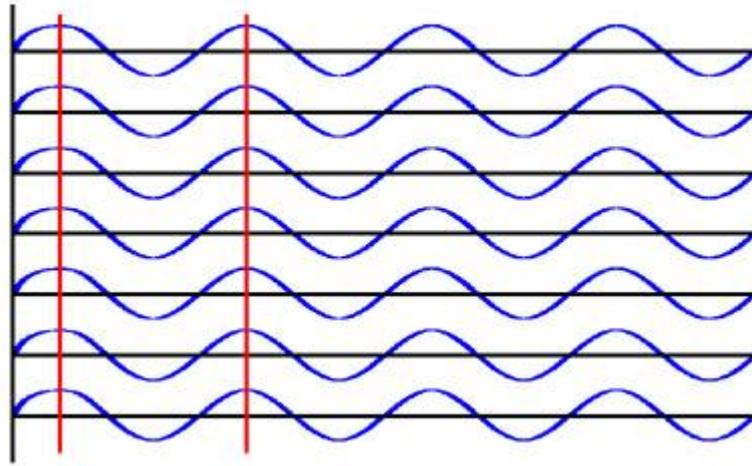
Coerenza

La figura seguente rappresenta un fascio di raggi luminosi paralleli emessi da una sorgente ordinaria.



Le onde elettromagnetiche non presentano caratteristiche in comune tra loro, direzione a parte. Il fascio è quindi costituito da **luce incoerente**, cioè priva di ordine interno.

La figura sottostante illustra onde elettromagnetiche che compongono un fascio laser altamente collimato. Tutte le onde sono **in fase** tra loro in qualsiasi punto. **Coerenza** è il termine usato per descrivere la proprietà di movimento in fase della luce del fascio.

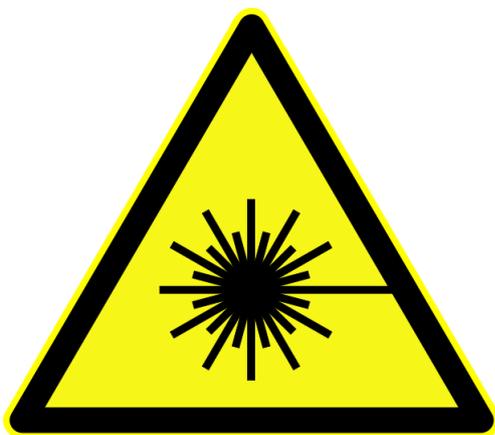


Come la luce laser non può essere né perfettamente monocromatica né perfettamente direzionale, così non può essere perfettamente coerente. Ciononostante, è di gran lunga più coerente della luce emessa da qualsiasi altro tipo di sorgente.

La coerenza è la proprietà più importante della luce laser e la distingue dalla luce ordinaria. Quindi, i dispositivi laser possono essere definiti come **sorgenti di luce coerente**.

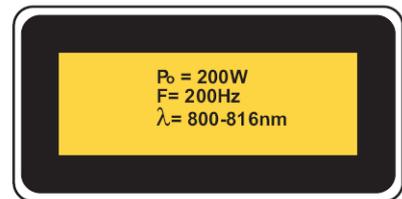
Sicurezza

La potenziale pericolosità della luce laser era emersa già con il primo dispositivo messo a punto. Il suo creatore, Theodore Maiman, affermava, infatti, che il primo laser aveva la potenza di una "Gillette", essendo in grado di bucare una lametta da barba dell'omonima marca. Attualmente, è opinione comune che anche i laser con una potenza limitata a pochi milliwatt rappresentino un rischio per gli organi visivi umani.

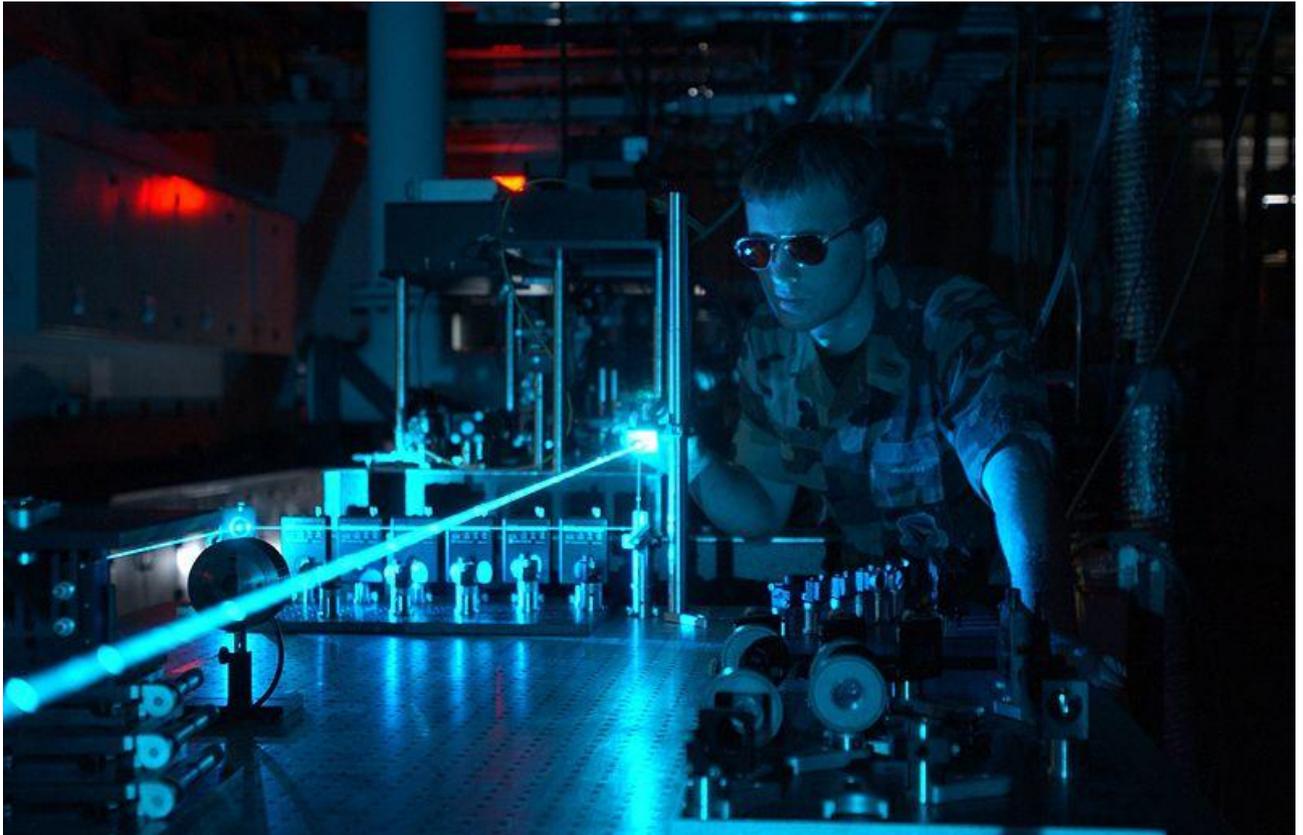


Simbolo di avvertenza per laser

Alle lunghezze d'onda elaborabili dall'occhio, la cornea ed il cristallino sono in grado di focalizzare il fascio laser, in virtù della sua coerenza e della sua ridotta divergenza, in un punto estremamente piccolo della retina, determinando bruciature localizzate e lesioni permanenti entro pochi secondi o frazioni di secondo. I laser sono suddivisi in classi di sicurezza numerate da I (intrinsecamente sicuro) a IV (anche la luce diffusa può causare danni agli occhi e/o alla pelle). I laser presenti in prodotti elettronici di largo impiego nel settore civile, quali lettori di CD/DVD e puntatori laser, rientrano solitamente in classe I, II, o III.

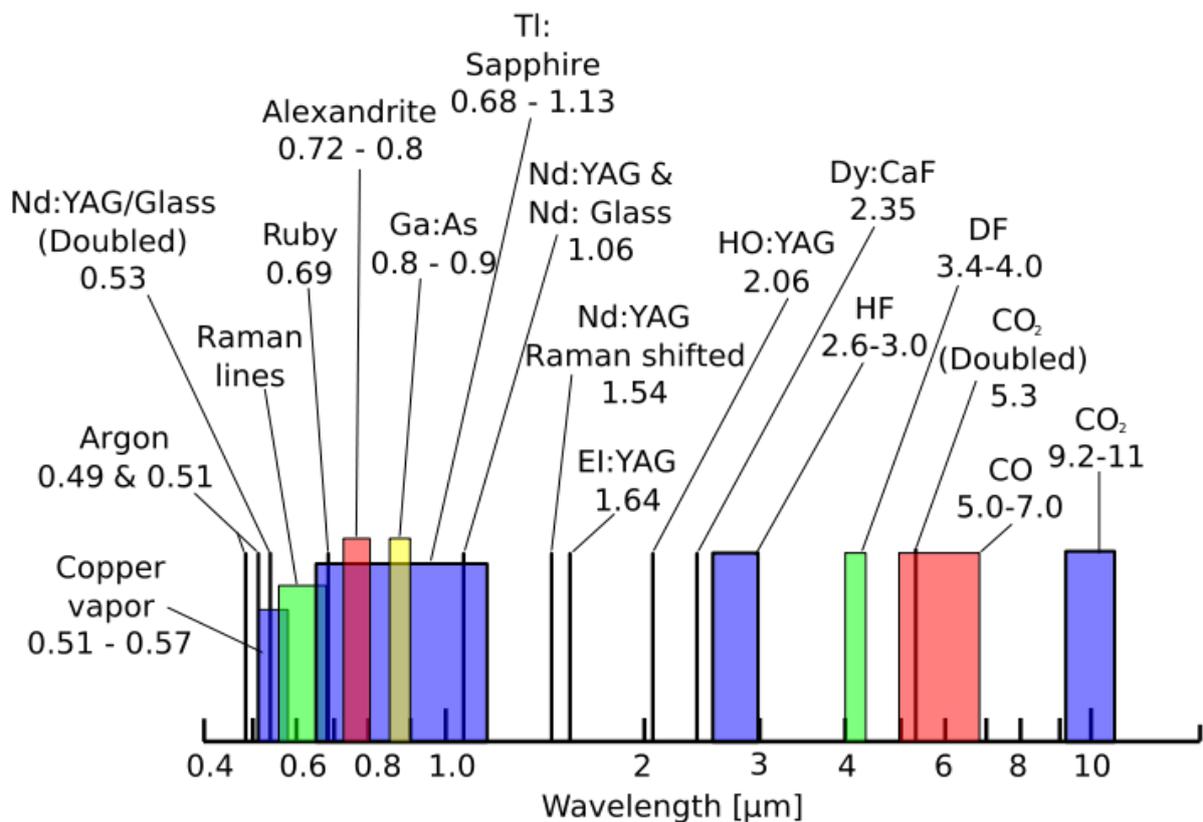


Alcuni laser infrarossi con lunghezze d'onda superiori a 1,4 μm (1400 nm) sono definiti **eye-safe (sicuro per gli occhi)**, in quanto le vibrazioni intrinseche delle molecole di acqua assorbono fortemente la luce in questa parte dello spettro. Pertanto, durante il passaggio attraverso la cornea, un fascio laser a queste lunghezze d'onda è attenuato in misura tale da non contenere luce residua che il cristallino possa focalizzare sulla retina. L'etichetta "eye-safe" può però risultare fuorviante, giacché è valida solo per fasci laser continui a bassa potenza: tutti i laser ad alta potenza o a commutazione Q (laser pulsati) sono in grado di bruciare la cornea e di causare gravi lesioni all'occhio anche a queste lunghezze d'onda dell'infrarosso.



Tipi di laser

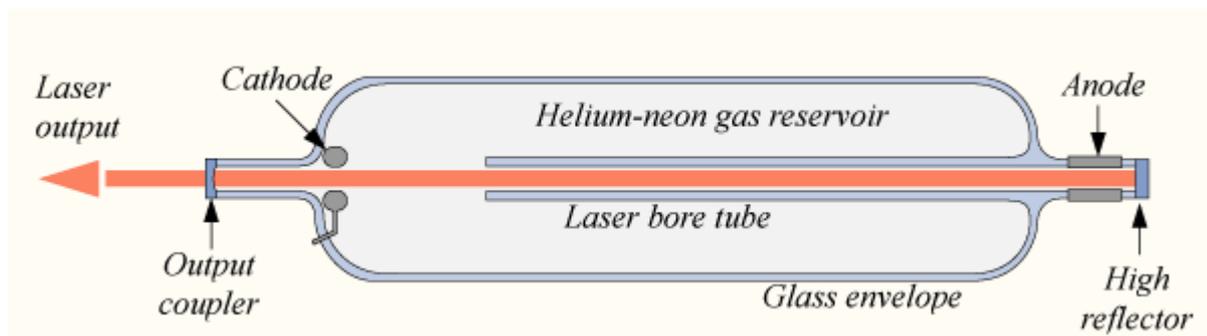
Questa è una lista dei tipi di laser noti finora, con le loro lunghezze d'onda operative e le loro applicazioni. Sono note alcune migliaia di tipi di laser diversi, per la maggior parte sperimentali e mai usciti dai laboratori.



Laser a gas

Rappresentano uno dei primi tipi di laser realizzati e trovano impiego in un ampio spettro di applicazioni.

Il laser ad elio-neon (HeNe) emette a varie lunghezze d'onda; le unità operanti a 633 nm sono molto comuni in ambito educativo grazie al basso costo.



Il laser ad anidride carbonica (CO₂) può arrivare a potenze di centinaia di kilowatt a 9,6 μm e 10,6 μm ed è utilizzato in ambito industriale per il taglio e la saldatura. La sua efficienza è superiore al 10%.



Il laser ad argon emette nella banda di 351-528,7 nm. In funzione delle ottiche e del tubo laser, sono utilizzabili differenti righe di emissione, ma le più comuni sono quelle a 458 nm, 488 nm e 514,5 nm.

Il laser ad azoto a **scarica elettrica trasversale a pressione atmosferica (TEA, Transverse Electrical discharge in gas at Atmospheric pressure)** a un costo molto basso ed emette luce UV a 337,1 nm.

I laser a ioni metallici generano luce nell'UV lontano. Ad esempio il laser ad elio-argento (HeAg) emette a 224 nm e quello a neon-rame (NeCu) emette a 248 nm. Questi laser hanno oscillazioni della larghezza di riga inferiori a 3 GHz (0,5 pm), rendendoli adatti per la spettroscopia Raman in assenza di fluorescenza.

Laser chimici

Sono pompate mediante reazioni chimiche e possono raggiungere elevate potenze in funzionamento continuo. Ad esempio, nei laser a fluoruro di idrogeno (HF), operante a 2700-2900 nm, ed a fluoruro di deuterio (DF), operante a 3800 nm, la reazione avviene tra gas di idrogeno o deuterio ed i prodotti di combustione dell'etilene (C_2H_4) in trifluoruro di azoto (NF_3).

Laser ad eccimeri

Sono pompate mediante reazione chimica di un **dimero eccitato o eccimero (excited dimer \rightarrow excimer)**, che è una molecola dimera o eterodimera a vita breve formata da due monomeri, almeno uno dei quali è

in uno stato elettronico eccitato. Emettono luce UV e sono utilizzati nella fotolitografia di semiconduttori e nella chirurgia oculare LASIK. Gli eccimeri di uso comune comprendono il fluoro (F_2 , emissione a 157 nm) e composti di gas nobili (ArF [193 nm], KrCl [222 nm], KrF [248 nm], XeCl [308 nm], e XeF [351 nm]).

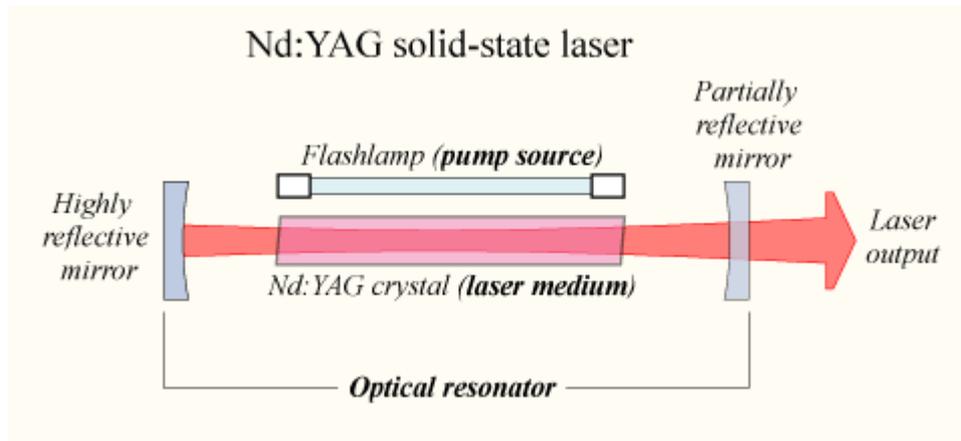


Laser a stato solido

Sono costituiti da un solido cristallino drogato con ioni in grado di fornire gli stati energetici desiderati. Ad esempio, il primo laser realizzato utilizzava un rubino (corindone drogato con cromo). Formalmente, la classe dei laser a stato solido comprende anche i laser a fibra, essendo il mezzo attivo (la fibra) allo stato solido. Praticamente, questa classe comprende laser con mezzi attivi di volume consistente, mentre i laser a guida d'onda sono definiti **laser a fibra**.

Il neodimio (Nd) è usato comunemente per drogare vari tipi di cristalli, compresi ortovanadato di ittrio (Nd:YVO₄), fluoruro di ittrio e litio (Nd:YLF) e cristalli sintetici di ossidi di ittrio ed alluminio (Nd:YAG). Tutti questi laser sono in grado di generare elevate potenze nello spettro infrarosso a 1064 nm e sono impiegati per il taglio, la saldatura e la marcatura di metalli ed altri materiali, nonché in spettroscopia e per il pompaggio dei laser a coloranti. Inoltre, se necessario, è possibile raddoppiare, triplicare o

quadruplicare la loro frequenza per farli emettere a 532 nm (verde), a 355 nm (UV) ed a 266 nm (UV).



Altri elementi droganti di uso comune nei laser a stato solido sono l'itterbio (Yb), l'olmio (Ho), il tulio (Tm) e l'erbio (Er). L'itterbio è utilizzato in cristalli di Yb:YAG, Yb:KGW, Yb:KYW, Yb:SYS, Yb:BOYS, Yb:CaF₂, operanti a circa 1020-1050 nm. Un piccolo difetto quantico conferisce potenzialmente a tutti un'efficienza ed una potenza elevate. I cristalli di Yb:YAG possono raggiungere potenze elevatissime con impulsi ultrabrevi. I cristalli di YAG drogati con olmio emettono a 2097 nm e consentono di realizzare laser efficienti operanti alle lunghezze d'onda infrarosse fortemente assorbite da tessuti acquosi. Il laser a Ho-YAG è normalmente impiegato in modalità pulsata in strumenti chirurgici a fibra ottica per levigare superfici articolari, asportare radici dentali, vaporizzare tumori e polverizzare calcoli renali e biliari.

Lo zaffiro drogato con titanio (Ti:zaffiro) permette di realizzare laser infrarossi altamente sintonizzabili per spettroscopia e laser ad impulso ultrabreve.

I laser a stato solido presentano restrizioni termiche originate da potenza di pompa non convertita e degradata in calore ed energia fononica.

Il fonone è una quasiparticella che descrive un quanto di vibrazione in un reticolo cristallino rigido.

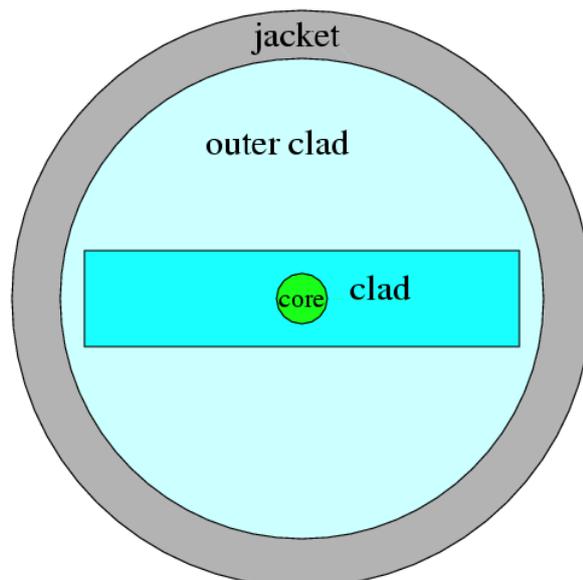
Laser a fibra

Sono laser a stato solido in cui la luce è guidata mediante riflessione interna totale in una guida d'onda e sono caratterizzati da un elevato rapporto lunghezza/dimensione trasversale, variabile da 10⁶ a 10⁹. Visivamente, il mezzo attivo ha l'aspetto di una fibra. La guida della luce consente di avere regioni di amplificazione estremamente lunghe, con un

efficiente raffreddamento in virtù dell'elevato rapporto superficie/volume. Inoltre, le proprietà ottiche della fibra tendono a ridurre la distorsione termica del fascio luminoso.

Fibra a doppio mantello

È costituita dal nucleo, da un mantello interno e da un mantello esterno. Il profilo dell'indice di rifrazione dei tre strati concentrici è scelto in modo che il nucleo si comporti come una fibra monomodale per l'emissione laser ed il mantello esterno agisca da fibra multimodale per il pompaggio. Questo consente di diffondere mediante pompaggio grandi quantità di energia in tutto il nucleo interno attivo, pur mantenendo un'elevata **apertura numerica (NA, Numerical Aperture)** per facilitare l'attivazione.



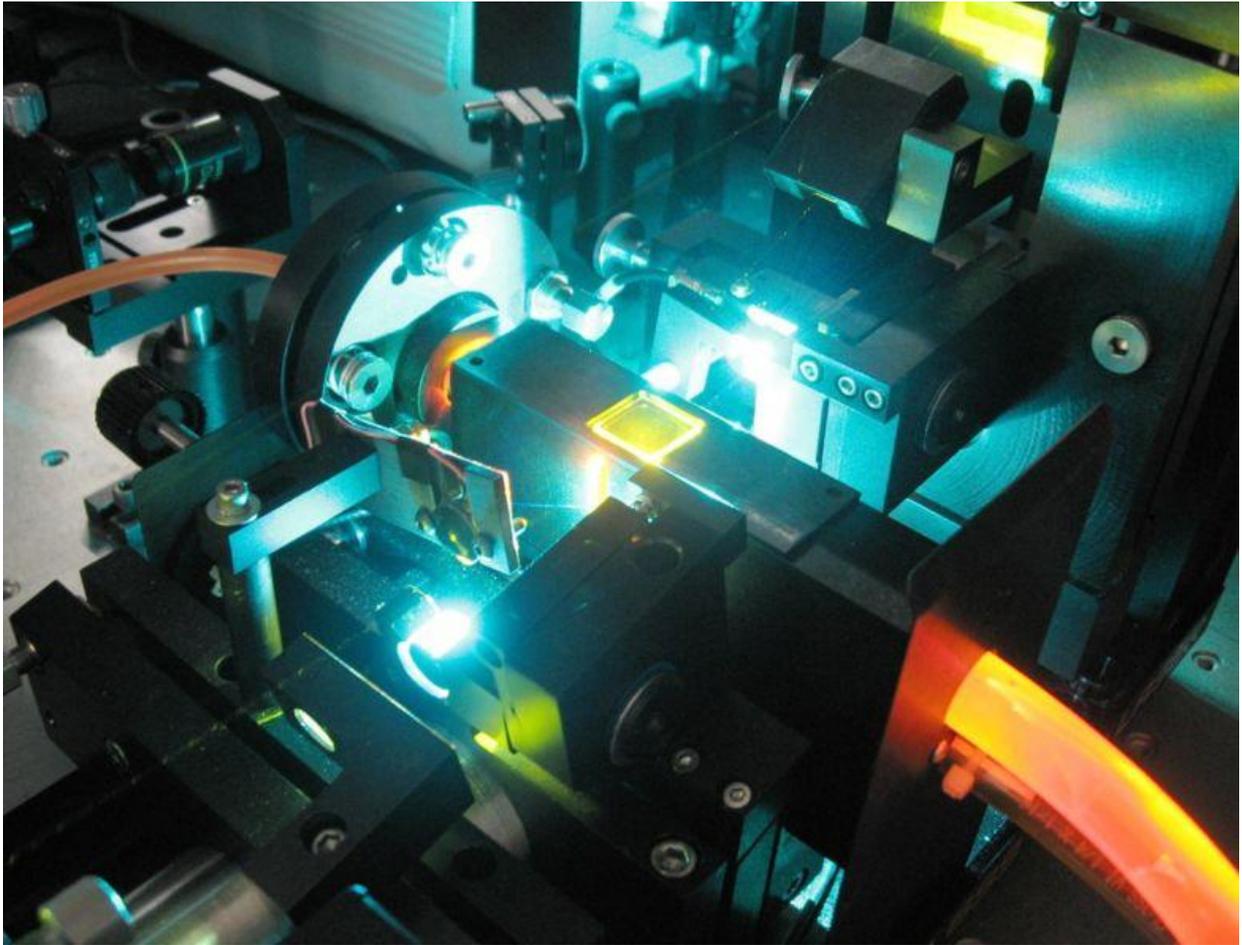
Fibra a spira

È una fibra avvolta a spira e la luce di pompaggio è iniettata trasversalmente. Contrariamente alla fibra a doppio mantello, il fascio di pompaggio non è in asse con il nucleo attivo della fibra ottica, ma è angolato di 10° - 40° . È così possibile l'utilizzo efficiente dei fasci di pompaggio emessi dai diodi laser.



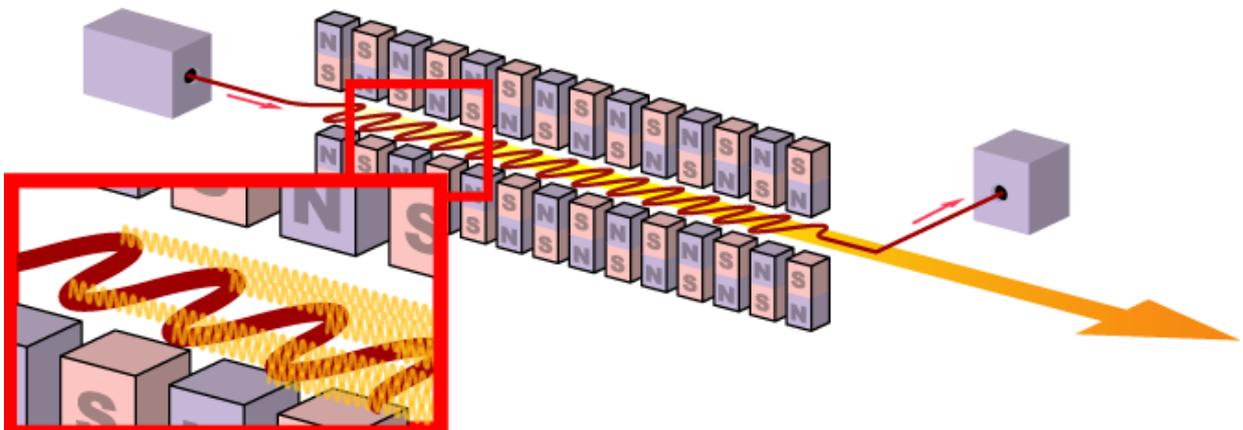
Laser a coloranti

Utilizzano un colorante organico come mezzo attivo. L'ampio spettro di guadagno dei coloranti disponibili permette a questi laser di essere altamente sintonizzabili o di generare impulsi di brevissima durata, dell'ordine di alcuni femtosecondi.



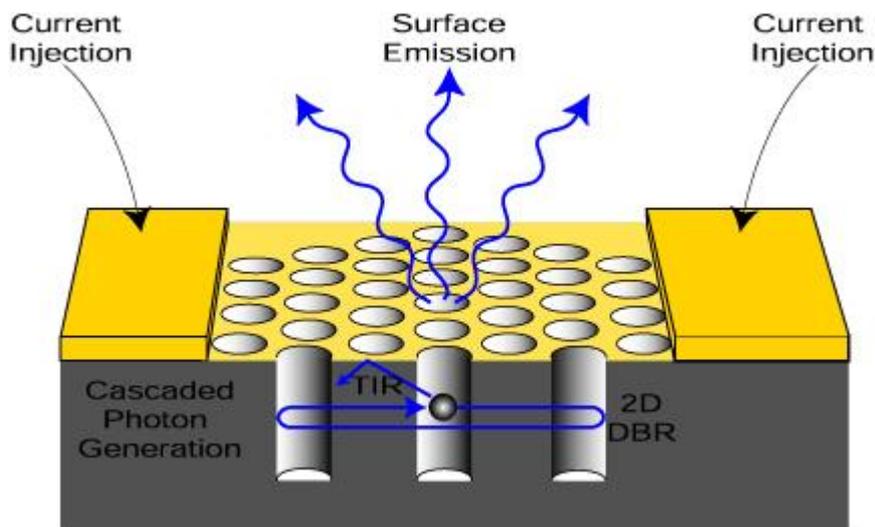
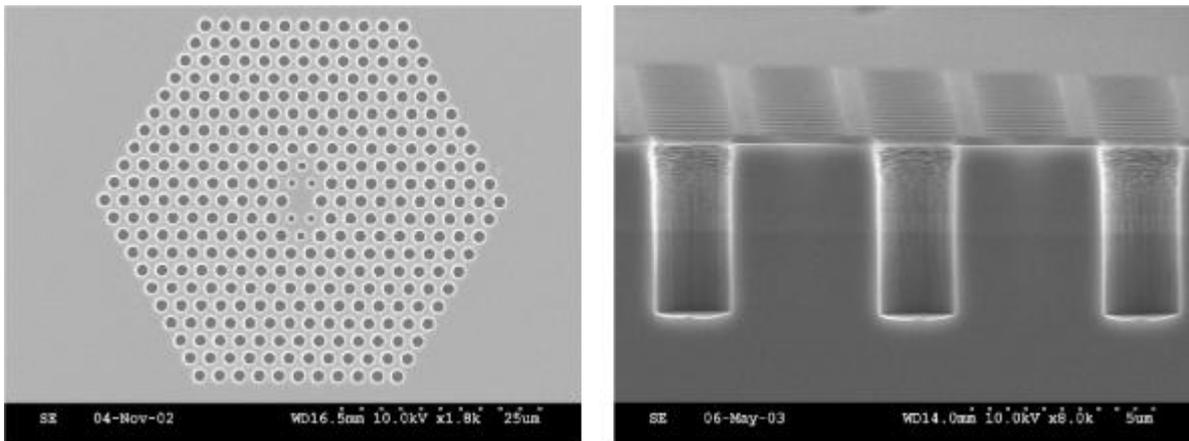
Laser ad elettroni liberi

Il ***laser ad elettroni liberi (FEL, Free Electron Laser)*** genera radiazione coerente ad elevata Potenza ed è altamente sintonizzabile, più di qualsiasi altro tipo di laser potendo spaziare dalle microonde agli infrarossi, al visibile, ai raggi X molli. Mentre il FEL emette un fascio elettromagnetico che condivide le stesse proprietà ottiche di quelli degli altri laser, il suo funzionamento è alquanto differente, in quanto utilizza come mezzo attivo un fascio di elettroni relativistici, da cui il termine ***elettrone libero***.



Laser a cristalli fotonici

Grazie all'utilizzo dei cristalli fotonici come elementi attivi dei LED si è scoperto come sia possibile eliminare l'emissione spontanea che si genera al loro interno, per mezzo del **gap di banda fotonica**; incanalando tutta l'energia nella radiazione in uscita è possibile aumentare enormemente l'efficienza. Nella figura seguente è riportato un esempio di laser ottenuto creando un **cammino periodico** di cilindri verticali in cui è presente un difetto, in questo caso un anello privo di tali cilindri.

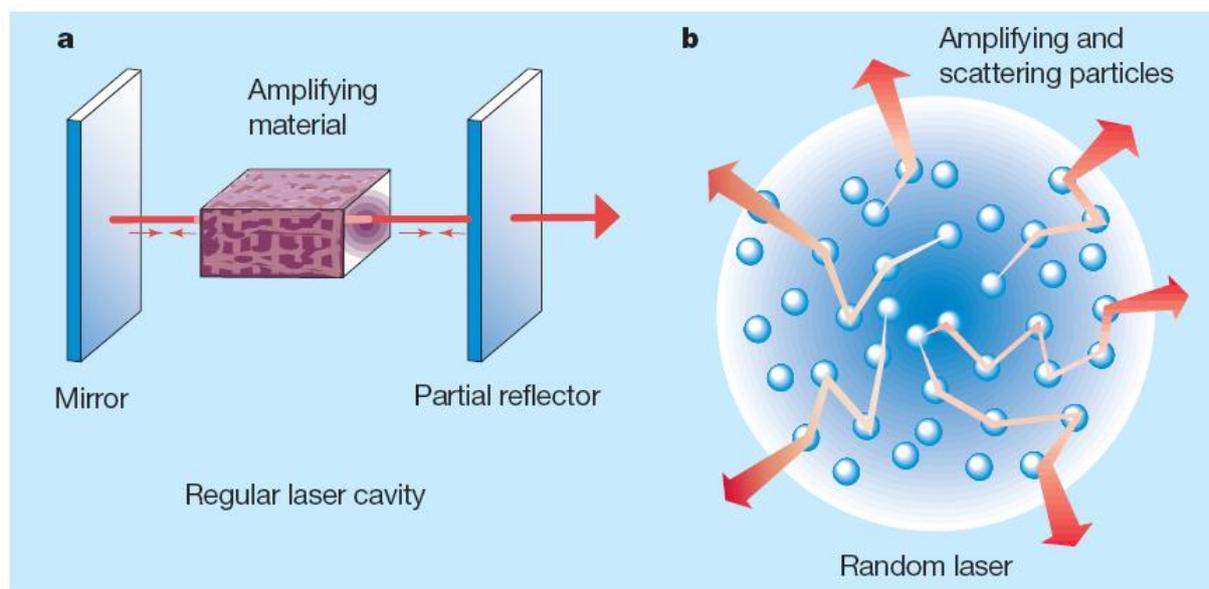


La luce è forzata ad essere intrappolata all'interno dell'**area difettata** generando un'oscillazione laser.

Random laser

Il mezzo attivo è costituito da materiale suddiviso in microscopici granuli disposti in configurazione disordinata (ad esempio, agglomerati di nanocristalli di ossido di zinco (ZnO)).

L'amplificazione è provocata dal fenomeno della diffusione multipla. Quando i granuli vengono colpiti da un raggio luminoso lo diffondono in tutte le direzioni; il processo è analogo a quanto avviene nella propagazione della luce in sistemi bianchi e opachi come la nebbia, un bicchiere di latte o un qualsiasi altro materiale disordinato e opaco. La diffusione multipla tra le particelle del materiale disordinato intrappola la luce per un tempo sufficiente ad ottenere un'amplificazione efficiente prima che la radiazione laser sia emessa in direzioni casuali.



Questi laser possono essere accesi o spenti semplicemente variando la temperatura. Al di sotto del valore di soglia, dell'ordine di qualche decina di gradi Celsius, il sistema mostra la caratteristica emissione random; al di sopra, l'emissione è invece quella di una lampadina. Inoltre, è possibile allargare o restringere la larghezza della banda di frequenze di emissione.

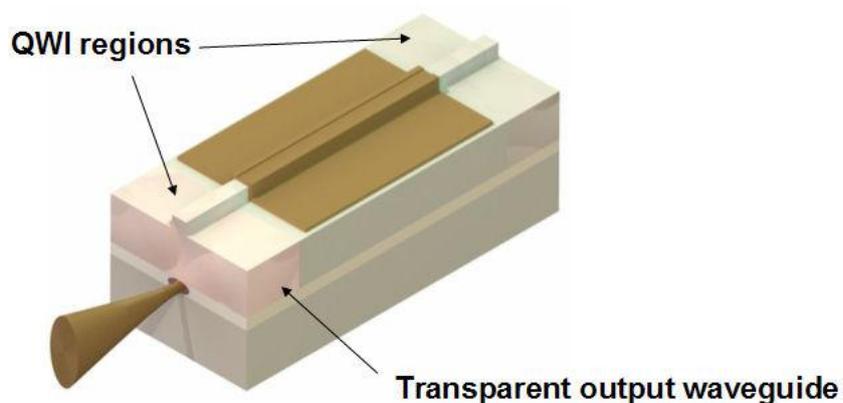
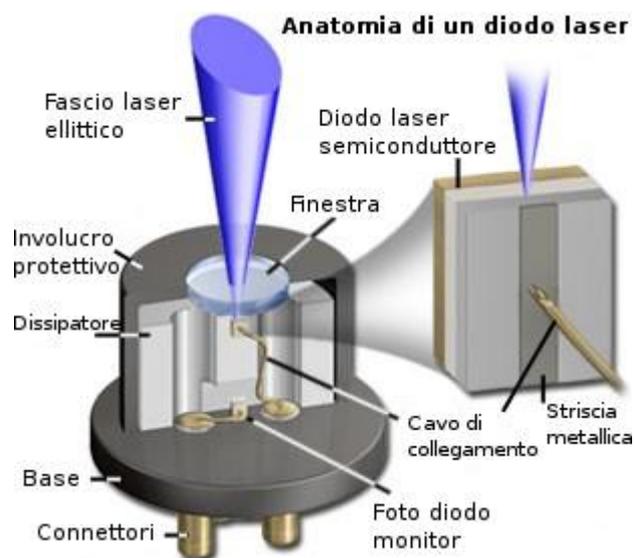
Diodo laser (laser a semiconduttore)

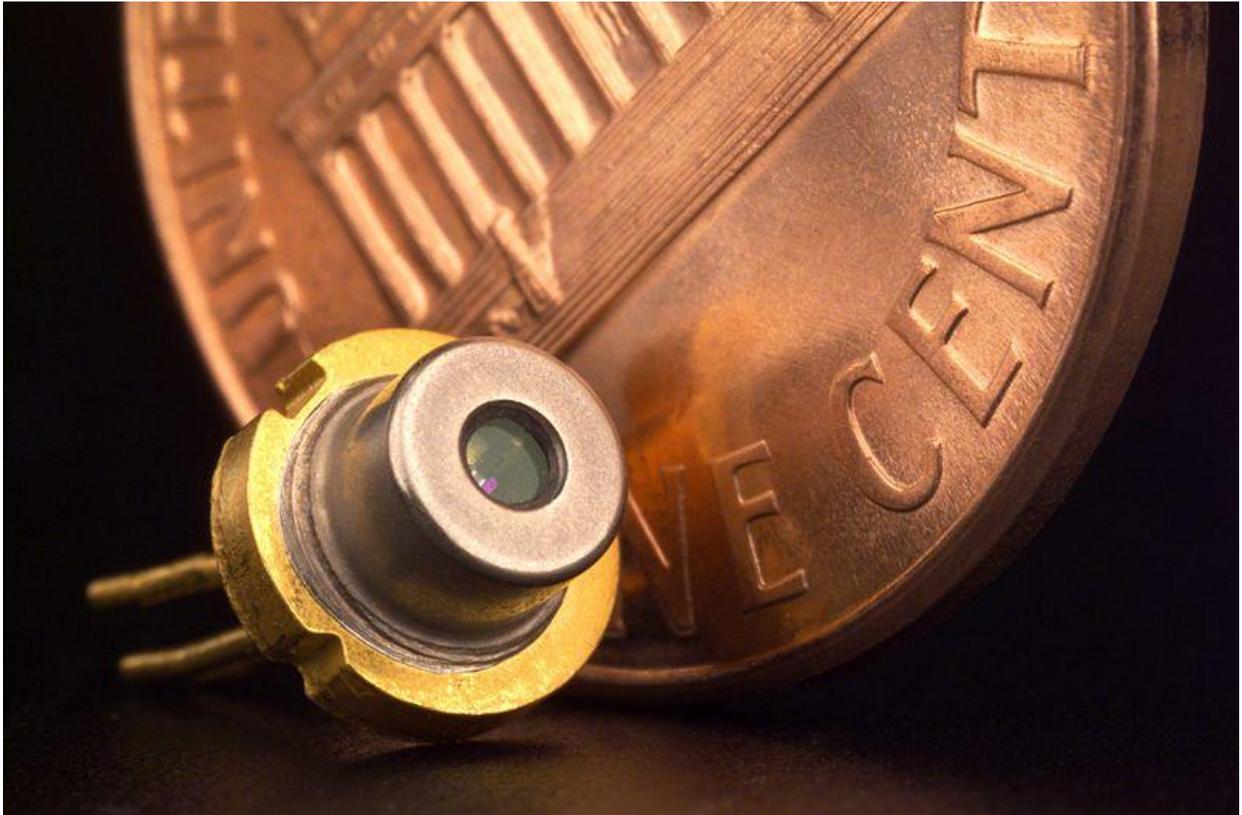
È un laser in cui il componente attivo è un semiconduttore simile a quelli impiegati nella produzione di LED. La tipologia più comune e funzionale di diodo laser è formata da una **giunzione p-n alimentata da corrente**

elettrica iniettata. Questi dispositivi vengono spesso chiamati **diodi laser a iniezione** per distinguerli da quelli pompati otticamente, che sono più facili da produrre in laboratorio.

I diodi laser sono il tipo più diffuso di laser, con vendite approssimative nel 2004 di 733 milioni di esemplari contro i soli 131.000 di tutti gli altri tipi di laser. Tra le numerosissime applicazioni si segnalano le seguenti:

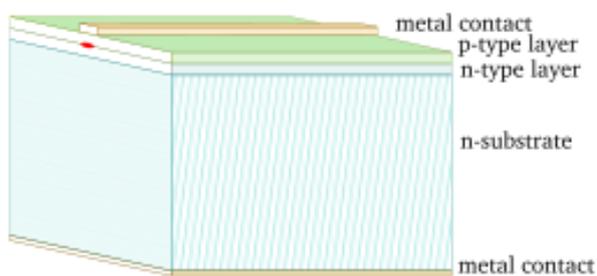
- lettori CD e DVD, utilizzanti diodi laser infrarossi;
- lettori Blu-Ray e HD DVD, utilizzanti laser blu-violetti;
- emettitori ed amplificatori di segnale per fibre ottiche;
- strumenti di misurazione;
- lettori di codici a barre;
- puntatori laser, utilizzanti laser a luce rossa o verde);
- stampanti laser e fotocopiatrici digitali;
- mouse per computer.





Principio di funzionamento

Un diodo laser, come molti altri dispositivi elettronici, è composto da uno strato molto sottile di materiale semiconduttore drogato depositato sulla superficie di un wafer cristallino. Il cristallo viene drogato per produrre una regione di tipo n ed una regione di tipo p, una sopra l'altra, per ottenere una **giunzione p-n**, cioè un diodo.



Quando la struttura viene polarizzata direttamente, le lacune provenienti dalla regione p vengono iniettate nella regione n, dove gli elettroni sono i **portatori maggioritari di carica**. Analogamente, gli elettroni dalla regione n sono iniettati nella regione p, dove le lacune sono i portatori maggioritari. Quando un elettrone ed una lacuna sono presenti nella stessa regione, possono ricombinarsi per emissione spontanea, cioè l'elettrone può

rioccupare lo stato energetico della lacuna, emettendo un fotone con un'energia uguale alla differenza tra gli stati dell'elettrone e della lacuna coinvolti. Questi elettroni e lacune iniettati rappresentano la **corrente di iniezione** del diodo e, sotto la **soglia laser**, l'emissione spontanea fornisce al diodo laser proprietà simili ad un LED. L'emissione spontanea è necessaria per iniziare l'oscillazione laser, ma è causa di inefficienza una volta che il laser è in oscillazione.

In condizioni appropriate, l'elettrone e la lacuna possono coesistere nella stessa area per un po' di tempo (nell'ordine dei microsecondi) prima che si ricombinino per emissione stimolata da un fotone con energia uguale all'energia di ricombinazione. Il nuovo fotone ha uguale frequenza, direzione, polarizzazione e fase del primo fotone. Ciò significa che l'emissione stimolata causa un guadagno in un'onda ottica nella regione di iniezione e l'amplificazione aumenta al crescere del numero di elettroni e lacune iniettati attraverso la giunzione. I processi di emissione spontanea e stimolata sono molto più efficienti nei semiconduttori a **gap di banda diretto** che in quelli a **gap di banda indiretto**, perciò il silicio non è un materiale molto usato per i diodi laser.

Come in altri laser, la regione di guadagno è circondata da una **cavità ottica (cavità risonante)** che costituisce il laser. Consiste in una guida ottica sulla superficie del cristallo, strutturata in modo tale da confinare la luce in una linea relativamente stretta e le superfici piane e perfettamente parallele ai due capi del cristallo formano un risonatore Fabry-Perot. I fotoni generati viaggeranno lungo la guida d'onda e saranno riflessi molte volte dalla faccia di ciascuna estremità prima di essere emessi. Quando un'onda luminosa attraversa la cavità, è amplificata per emissione stimolata, ma parte della luce è persa per assorbimento e riflessione incompleta. Se l'amplificazione supera le perdite, il diodo inizia ad emettere luce laser.

Alcune importanti proprietà dei diodi laser sono determinate dalla geometria della cavità ottica. In direzione verticale, la luce è contenuta in uno strato estremamente sottile e la struttura offre un solo modo di propagazione ottico nella direzione perpendicolare agli strati. In direzione orizzontale, se la guida d'onda è larga rispetto alla lunghezza d'onda della luce, sono possibili diversi modi di propagazione ottici laterali ed il laser è definito **laser multimodale**. Questi dispositivi multimodali sono indicati nei casi in cui sia richiesta una notevole potenza, ma non un raggio ristretto, come nella stampa, nell'attivazione di processi chimici o nel pompaggio di altri tipi di laser. Nelle applicazioni dove è richiesto un raggio finemente focalizzato, la guida d'onda deve essere stretta, dell'ordine della lunghezza d'onda. In questo caso, si impiega un solo modo di propagazione laterale per ottenere un raggio limitato dalla diffrazione ed il laser è definito **laser**

monomodale. Disponendo di modi di propagazione longitudinali multipli, questi dispositivi monomodali possono emettere luce laser a diverse lunghezze d'onda e sono usati per archiviazione ottica, puntatori laser e fibre ottiche.

La lunghezza d'onda emessa è una funzione del **gap di energia** tra le bande del semiconduttore e dei modi di propagazione della cavità ottica. In generale il guadagno massimo si ottiene per fotoni con energia leggermente superiore a quella del gap ed i modi di propagazione più vicini al picco di guadagno emetteranno in modo predominante. Se il diodo è pilotato con sufficiente potenza, si avranno anche emissioni addizionali, dette **modi laterali**. Alcuni diodi laser, tra cui la maggior parte di quelli che emettono luce visibile, operano a lunghezze d'onda fisse, che non sono però stabili e cambiano nel tempo in funzione della temperatura e della corrente.

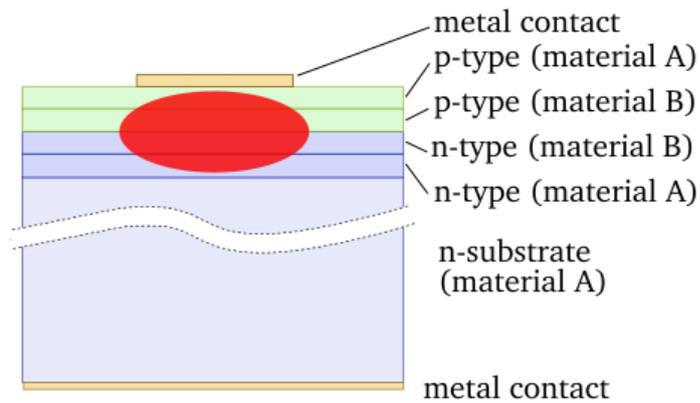
Per via della diffrazione, il raggio diverge rapidamente dopo avere lasciato la cavità, con un angolo tipico di 30° verticalmente e 10° lateralmente. Per formare un raggio collimato, ad esempio per un puntatore laser, si deve impiegare una lente. Se è richiesto un raggio circolare, saranno necessari dispositivi ottici più complessi, comprendenti anche lenti cilindriche. Con lenti simmetriche, i laser monomodali forniranno un raggio ellittico, a causa della differenza tra le divergenze verticale e laterale, caratteristica facilmente osservabile nei puntatori laser economici.

Tipi di diodi laser

La semplice struttura di diodo laser descritta precedentemente è estremamente inefficiente. Tali dispositivi, definiti anche **laser omogiunzione**, richiedono potenze così elevate che ne rendono possibile solo il **funzionamento impulsivo** se si vuole evitare di danneggiarli. Pertanto, nel corso degli anni, sono stati messi a punto vari schemi caratterizzati da maggiore efficienza e praticità.

Laser a doppia eterostruttura

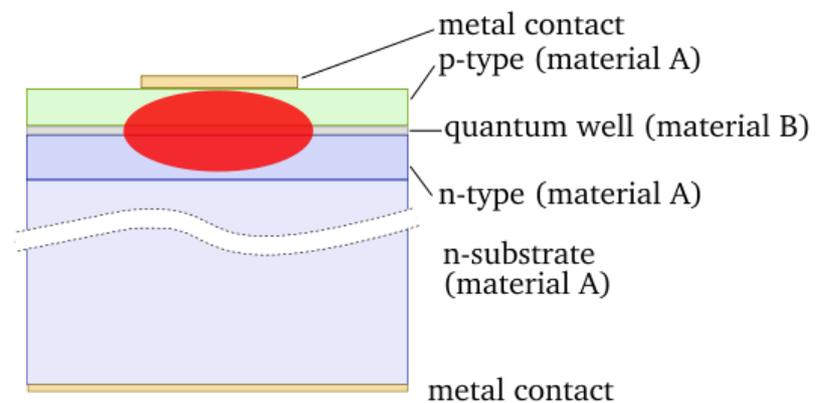
In questi dispositivi, uno strato di materiale a basso gap di banda viene posto tra due strati ad alto gap di banda. Un paio di materiali molto usati sono l'arseniuro di gallio (GaAs) e l'arseniuro di alluminio-gallio ($\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$). Ogni giunzione tra materiali con differenti gap di banda costituisce un'**eterostruttura**, da cui il nome **laser a doppia eterostruttura o laser DH**.



Il vantaggio di un laser DH è che la regione attiva, dove gli elettroni e le lacune liberi esistono simultaneamente, è confinata al sottile strato intermedio, cosicché molte più coppie elettrone-lacuna contribuiscono all'amplificazione. Inoltre, la luce viene riflessa dalla eterogiunzione e rimane confinata nella regione sede dell'effetto di amplificazione.

Laser a pozzo quantico

Se lo strato intermedio è realizzato sufficientemente sottile, agisce da pozzo quantico. Questo significa che la variazione verticale della funzione d'onda dell'elettrone è quantizzata e l'efficienza di un laser a pozzo quantico è maggiore di quella laser semplice.

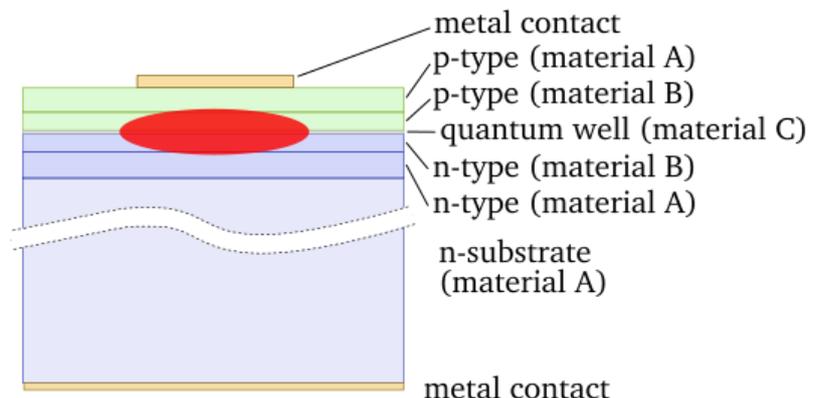


I laser contenenti più di uno strato a pozzo quantico sono conosciuti come **laser a pozzi quantici multipli**. I pozzi quantici multipli migliorano la *sovrapposizione* delle regioni di guadagno con la modalità normale a guida d'onda ottica.

In un **laser a cascata quantica**, la differenza tra i livelli di energia del pozzo quantico viene usata per la transizione laser invece del gap di banda. Sono così possibili emissioni laser a lunghezze d'onda relativamente ampie, regolabili variando semplicemente lo spessore dello strato.

Laser ad eterostruttura a confinamento separato

Il problema del diodo a pozzo quantico semplice, descritto in precedenza, è che lo strato sottile è semplicemente troppo piccolo per confinare efficacemente la luce. Se si aggiungono altri due strati, esternamente ai primi tre, che possiedono un indice di rifrazione inferiore a quello degli strati centrali, si rende più efficace il confinamento della luce in maniera più efficace.



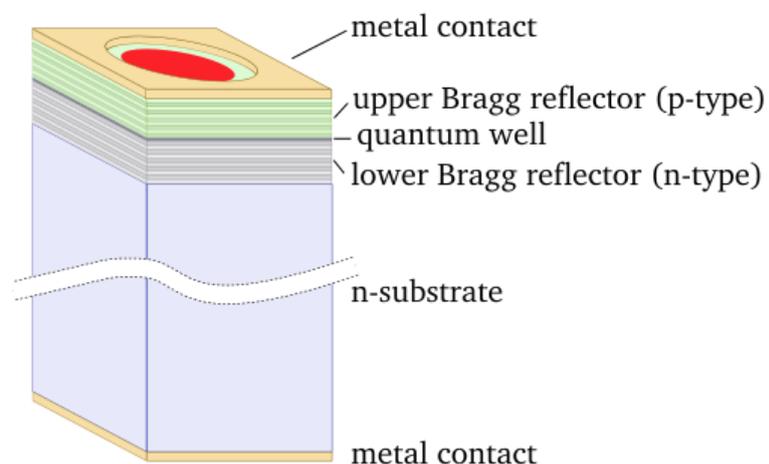
Tale struttura è denominata **diodo laser a eterostruttura a confinamento separato o laser SCH**. Quasi tutti i diodi laser commerciali prodotti dal 1990 sono di tipo SCH.

Laser a retroazione distribuita

Sono i "cavalli da tiro" delle più esigenti tecnologie ottiche di comunicazione e sono denominati anche **laser DFB**. Per stabilizzare la lunghezza d'onda del laser, si incide un **reticolo di diffrazione** vicino alla giunzione p-n del diodo, che agisce come un filtro ottico, permettendo solo ad una singola lunghezza d'onda di essere riportata nella regione a guadagno. Dato che il reticolo fornisce la retroazione necessaria per l'effetto laser, la riflessione delle sfaccettature non è necessaria. Perciò, i laser DFB hanno almeno una faccia trattata con un **rivestimento antiriflettente**. La lunghezza d'onda dell'emissione dipende dal passo del reticolo inciso durante il processo di fabbricazione ed è stabile, variando solo leggermente con la temperatura.

VCSEL

Nei **laser ad emissione superficiale a cavità verticale (VCSEL, Vertical Cavity Surface Emitting Laser)** l'asse della cavità ottica è disposto lungo la direzione del flusso corrente invece che perpendicolarmente, come nei diodi laser convenzionali. La lunghezza della regione attiva è molto breve in confronto alle dimensioni laterali, di modo che la radiazione emerge dalla 'superficie' della cavità piuttosto che dai bordi.



I riflettori ai lati della cavità sono **specchi dielettrici**.

VECSEL

I **laser a cavità esterna verticale a emissione superficiale (VECSEL, Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser)** sono simili ai VCSEL. Nei VCSEL, gli specchi vengono creati tramite **crescita epitassiale** come parte della struttura del diodo o creati separatamente e connessi direttamente al semiconduttore contenente la regione attiva. I VECSEL si distinguono per una tecnica costruttiva nella quale uno dei due specchi è esterno alla struttura del diodo; come risultato, la cavità include una regione di spazio libero. La distanza tipica dal diodo allo specchio esterno è di 1 cm.