

Punto visita:
Luce, laser e fotonica

Progetto formativo ASL:
*Fotonica: materiali ed
applicazioni*

Tutor: Maria Aurora Vincenti
aurora.vincenti@enea.it

Introduzione

Il termine **fotonica** è stato introdotto dallo scienziato francese Pierre Agrain nel 1967, successivamente all'invenzione del LASER (1960):

la fotonica è il campo della Scienza e Tecnologia che si occupa della generazione, rivelazione, manipolazione, trasmissione ed utilizzo della luce.

Il punto visita "Luce, laser e fotonica" ha come scopo quello di guidare i visitatori attraverso un percorso dedicato alla fotonica. Lungo questo percorso spiegheremo ai visitatori la differenza fra la luce emessa da una lampadina o un LED (Light Emitting Diode) e la luce laser e come le peculiarità di quest'ultima consentano il suo utilizzo in numerosi campi di applicazione, dal tecnologico al medicale. Mostreremo gli occhiali protettivi per luce laser, indispensabili per operare in sicurezza.

Daremo informazioni sul funzionamento delle fibre ottiche attraverso le quali si propagano i segnali luminosi e che sono alla base della realizzazione di sensori di temperatura e di deformazione.

Una parte del percorso è dedicata ad alcune delle attività di Ricerca e Sviluppo condotte nel Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica del Centro ENEA di Frascati: descriveremo le microcavità ottiche e le guide d'onda realizzate con il fluoruro di litio ed inoltre gli OLED (Organic Light Emitting Diode) basati su film di Alq₃.

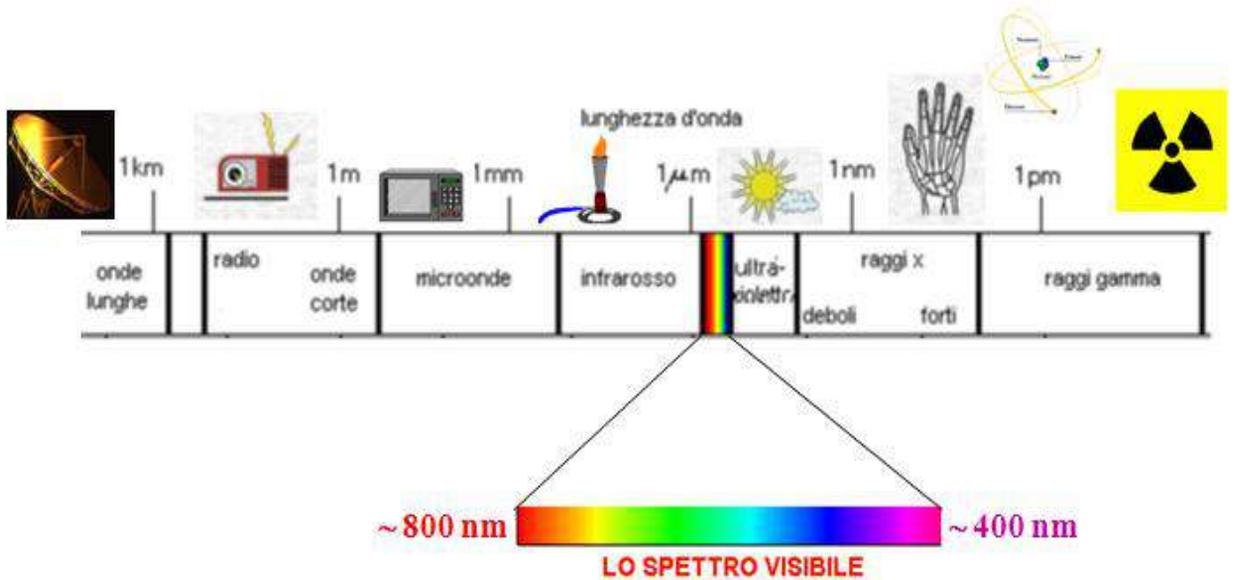
Queste dispense riportano brevemente alcuni concetti base che ci saranno utili per coinvolgere ed interessare a queste tematiche i visitatori del Centro ENEA di Frascati.

Per svolgere questo progetto di ASL dovete studiare gli argomenti trattati da pagina 3 a pagina 13, perché li spiegherete voi ai visitatori. Gli argomenti da pagina 14 a pagina 20, che necessiterebbero di un approfondimento che va oltre lo scopo di queste dispense, sono per sola lettura.

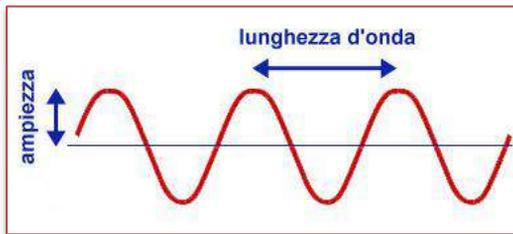
GRAZIE E BUON LAVORO!!

Radiazione elettromagnetica e luce

La “**Luce Visibile**” è una piccola porzione dell’intero spettro elettromagnetico, compresa fra le lunghezze d’onda di circa 400 nm (violetto) e 800 nm (rosso). E’ l’intervallo di lunghezze d’onda che i nostri occhi riescono a percepire.



Schema dello spettro elettromagnetico.

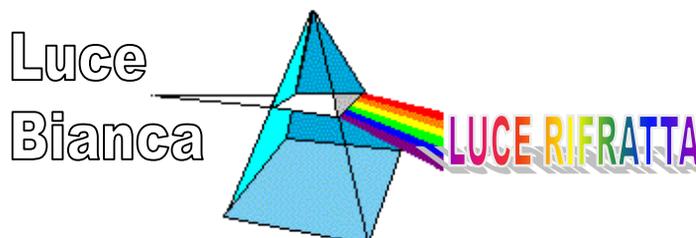


La luce è un’onda elettromagnetica a cui è associata una lunghezza d’onda, λ , che è la distanza fra due picchi successivi dell’onda e un’ampiezza, **A**, ossia l’altezza dei picchi.

La velocità della luce nel vuoto è circa 3×10^8 m/s.

Il “**colore**” della luce è associato alla sua frequenza.

La luce bianca, policromatica viene scomposta da un prisma ottico, nelle sue componenti monocromatiche, perché l’indice di rifrazione del mezzo dipende dalla lunghezza d’onda della radiazione incidente.



$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

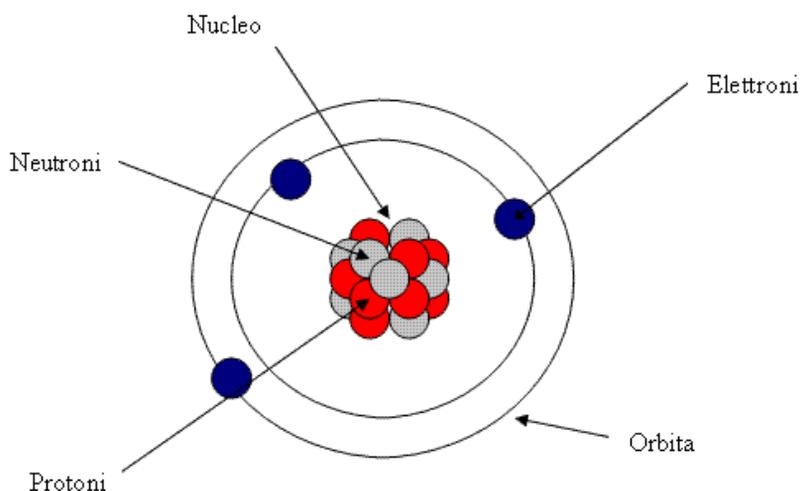
Modello atomico semplificato

Gli atomi di tutti gli elementi sono costituiti da tre particelle: elettroni, protoni e neutroni.

Il nucleo è costituito da protoni e neutroni.

Gli elettroni “occupano” determinate orbite stazionarie attorno al nucleo, alle quali corrispondono **livelli energetici permessi**, senza emettere ed assorbire energia.

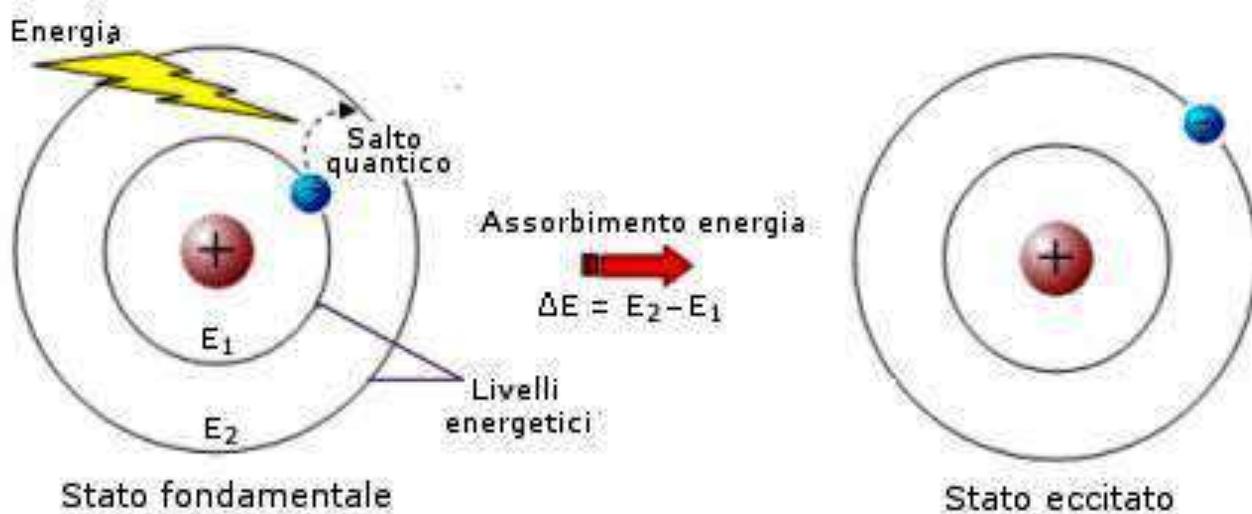
Assorbimento ed emissione di energia sono possibili solo nelle transizioni fra livelli energetici permessi.



Modello atomico semplificato.

Assorbimento atomico

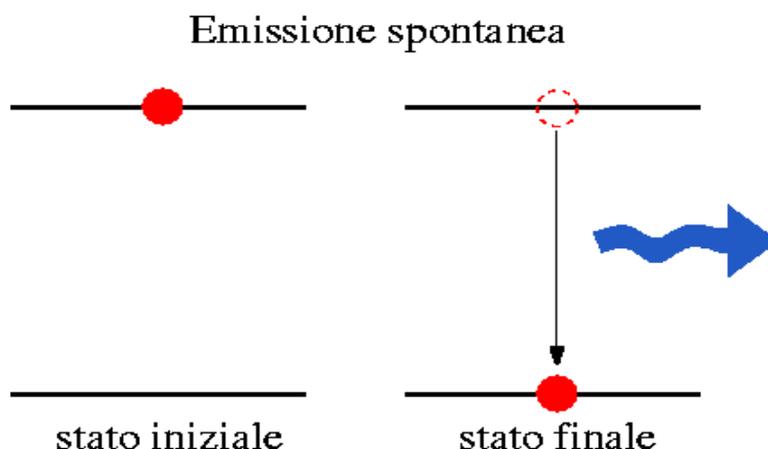
Gli elettroni scelgono naturalmente l'orbita di minore energia: si dice allora che l'atomo è nello **stato fondamentale**. Mediante **assorbimento** di un quanto di energia, l'elettrone passa da un'orbita ad un'altra di energia maggiore: l'atomo è in uno **stato eccitato**.



Schema dell'assorbimento atomico.

Emissione spontanea

L'elettrone nello stato eccitato, dopo un tempo caratteristico di circa 10^{-8} s, tende naturalmente a tornare nello stato fondamentale, rilasciando sotto forma di radiazione elettromagnetica l'energia che aveva precedentemente assorbito.



L'emissione spontanea è un processo di tipo casuale, i fotoni vengono emessi in tutte le direzioni senza nessuna relazione di fase fra di loro (sono incoerenti).

La “vecchia” lampadina ad incandescenza ed i LED (Light Emitting Diode) sono esempi di sorgenti luminose che si basano sul fenomeno della **EMISSIONE SPONTANEA**.

Luce emessa da un LED



Luce emessa da LED di differenti colori.

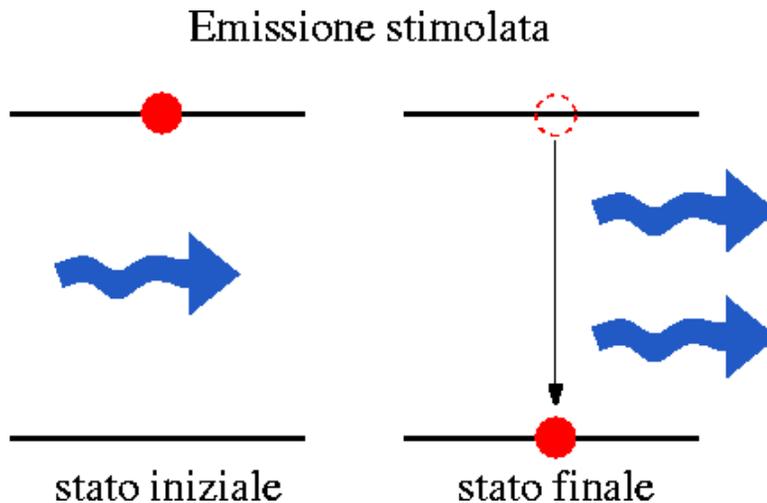
Il colore della radiazione emessa dipende dal tipo di materiale di cui è costituito il LED. I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso, ora è possibile ottenere LED di qualunque colore in dispositivi che integrano 3 diodi, uno di colore rosso, uno verde e uno blu.

E' una tecnologia efficiente che garantisce risparmio energetico rispetto le lampadine ad incandescenza ed alogene.

L'emissione è **ISOTROPA** ed **INCOERENTE**.

Emissione stimolata

L'emissione stimolata (Einstein, 1917) si verifica in presenza di radiazione elettromagnetica. Se un atomo si trova in uno stato eccitato può essere perturbato dalla presenza di radiazione elettromagnetica (fotoni) di energia corrispondente all'energia necessaria per la transizione dallo stato eccitato allo stato fondamentale. Un fotone incidente, di opportuna energia, stimola la transizione dallo stato eccitato allo stato fondamentale con l'emissione di un secondo fotone **IDENTICO** al primo, di stessa frequenza, stessa direzione ed in fase (coerente).



La probabilità di emissione spontanea è generalmente più elevata di quella di emissione stimolata, ma in opportune circostanze questo secondo processo può essere reso dominante. Ciò si verifica quando si realizza una **INVERSIONE DI POPOLAZIONE** dei livelli energetici, ossia quando gli atomi eccitati sono di più di quelli nello stato fondamentale.

LASER

La parola LASER è l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ovvero **amplificazione della luce mediante il fenomeno dell'emissione stimolata**.

L'emissione laser si basa sul fenomeno dell'EMISSIONE STIMOLATA che diviene il processo dominante in un materiale attivo nel quale viene realizzata la condizione di inversione di popolazione mediante un opportuno **pompaggio**, che può essere realizzato otticamente, mediante l'utilizzo di lampade o elettricamente attraverso una scarica elettrica.

Le proprietà di un fascio laser sono:

- **MONOCROMATICITA'**
- **COERENZA**
- **DIREZIONALITA'**
- **ELEVATA POTENZA PER UNITA' DI SUPERFICIE**

In virtù di queste proprietà i laser trovano applicazioni in diversi campi della scienza e della tecnica.

Applicazioni dei LASER

Lavorazioni di materiali: foratura, taglio, saldatura, trattamenti termici;

Applicazioni mediche: in oftalmologia, chirurgia generale, chirurgia con microscopio operatorio, chirurgia endoscopica;

Sistemi di misura: misuratori di distanza, misuratori di diametri di fili, rugosimetri, livelle laser;

Presentazione: laser per la visualizzazione di ologrammi, puntatori laser per conferenze, sistemi laser per didattica;

Giochi di luce: laser per effetti speciali in discoteca, mostre, spettacoli all'aperto;

Beni durevoli: lettori laser di codici a barre, lettori di compact disk, stampanti laser ecc.;

Telecomunicazioni e fibre ottiche: sorgenti laser per applicazioni, tramite fibra ottica, nella trasmissione ed elaborazione ottica dei dati;

Ricerca: spettroscopia lineare e non lineare, olografia, interazione radiazione materia;

Ecc.

Componenti fondamentali di un LASER

La **cavità ottica risonante** è il “cuore” di un LASER. In essa viene generata la luce. Una cavità ottica risonante è costituita da due specchi, uno completamente riflettente e l’altro parzialmente riflettente (riflettività compresa fra 80 e 99 %), fra i quali è posto il mezzo attivo.

Il **mezzo attivo** è il materiale nel quale avviene la generazione e l’amplificazione della luce la cui lunghezza d’onda dipende dal tipo di materiale attivo e dalla lunghezza della cavità risonante. Il mezzo attivo può essere gassoso, liquido e solido ed anche elettroni.

La **sorgente di energia esterna**, o pompaggio, rende possibile l’inversione di popolazione.



Componenti fondamentali di un LASER.

Come si genera la luce LASER

Mediante il pompaggio viene realizzata l'inversione di popolazione.

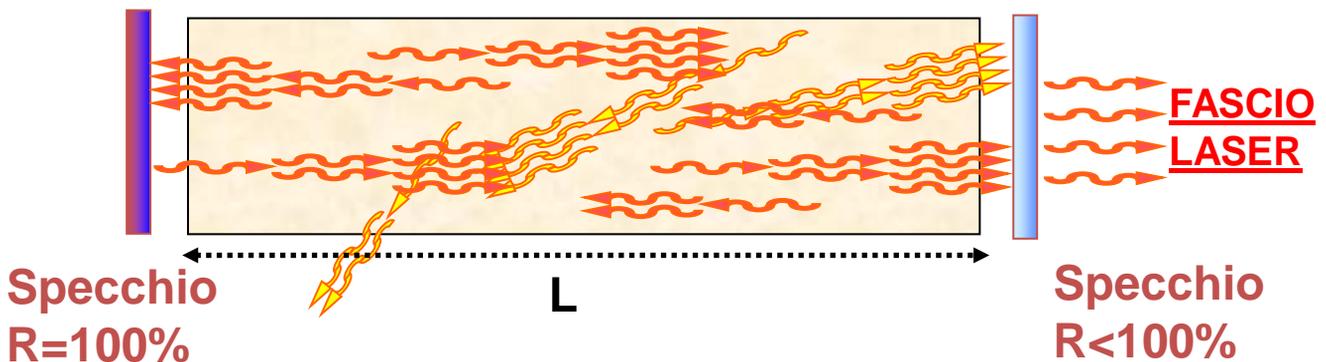
Per la presenza degli specchi:

i fotoni emessi per emissione stimolata (**COERENZA**), innescata dai primi fotoni generati per emissione spontanea, attraversano molte volte il materiale attivo dando luogo all'amplificazione della radiazione (moltiplicazione a valanga);

la direzione del fascio è ortogonale alla superficie degli specchi. I fotoni emessi fuori asse vengono perduti (**DIREZIONALITA'**);

Quando il fascio ha raggiunto l'intensità richiesta, viene emesso attraverso lo specchio parzialmente riflettente. La lunghezza d'onda λ del fascio laser emesso dipende dalla lunghezza L della cavità e dalle caratteristiche del mezzo attivo (**MONOCROMATICITA'**).

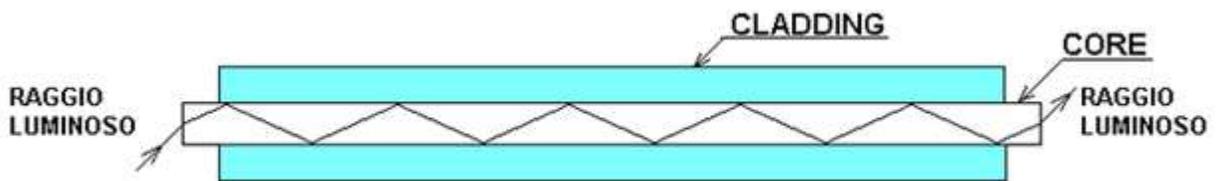
$$L = k \frac{\lambda}{2} = k \frac{\lambda_0}{2n}$$



Schema del funzionamento di una cavità ottica.

Fibre ottiche

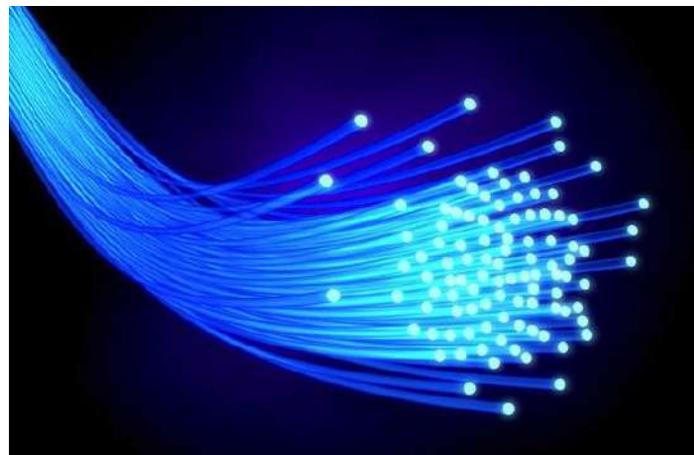
Una fibra ottica è una guida d'onda cilindrica costituita da un nucleo interno, denominato **core**, nel quale la luce è guidata, ricoperto da un rivestimento concentrico, detto **cladding**, che ha un indice di rifrazione n_2 inferiore a quello del core n_1 . Il core ed il cladding sono generalmente ricoperti da un rivestimento primario di materiale plastico, per la protezione della fibra dalle abrasioni meccaniche.



Schema di una fibra ottica.

Nella fibra il raggio luminoso si propaga per riflessione totale.

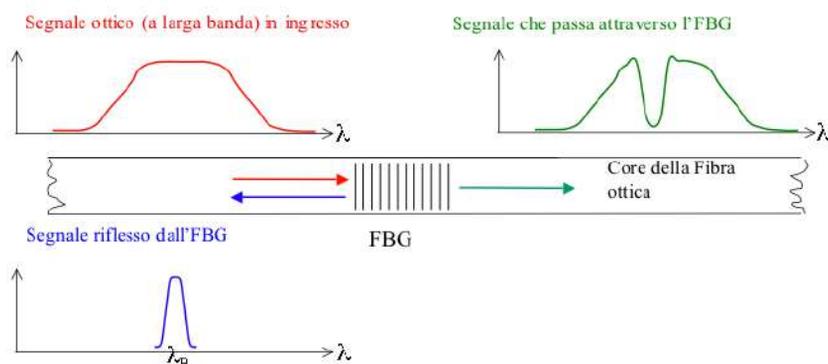
Le fibre ottiche consentono di trasmettere a grandi distanze una notevole quantità di informazioni. Rispetto ai cavi coassiali di rame, presentano un ingombro ed un peso ridotti, insensibilità ai disturbi atmosferici ed elettromagnetici e sono resistenti agli aggressivi chimici ed alle alte temperature. Le lunghezze d'onda utilizzate nelle comunicazioni ottiche sono negli intervalli $800 \div 900$ nm e $1300 \div 1500$ nm.



Fibre ottiche.

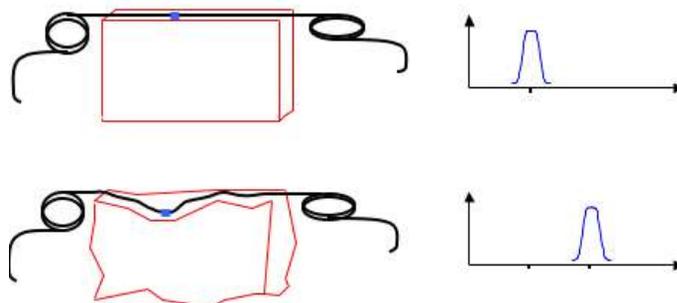
Sensori di Bragg in fibra ottica

Un sensore di Bragg in fibra ottica, o sensore FBG, è una fibra ottica che presenta in una sua regione un reticolo di Bragg cioè una modulazione periodica dell'indice di rifrazione della fibra. Il reticolo di Bragg agisce come uno specchio che riflette la luce di una specifica lunghezza d'onda dipendente dal periodo della modulazione. Nel seguente schema un segnale ottico indicato in rosso viene mandato in ingresso ad un sensore FBG, che ne trasmette una parte (segnale verde). Il reticolo di Bragg riflette verso l'ingresso la parte (segnale blu) mancante al segnale di uscita.



Schema di funzionamento di un sensore FBG.

I sensori FBG vengono utilizzati per monitorare temperatura, deformazione, ecc., in quanto le variazioni di parametri esterni comportano una variazione del passo della modulazione del reticolo di Bragg presente nella fibra ottica e quindi il cambiamento della lunghezza d'onda della luce che il reticolo riflette (vedi il seguente schema).

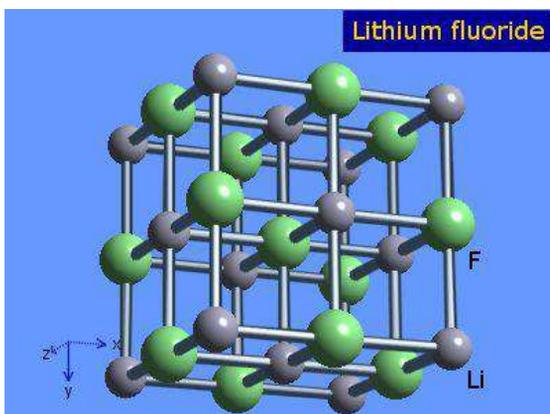


Sensore FBG utilizzato per monitorare la deformazione.

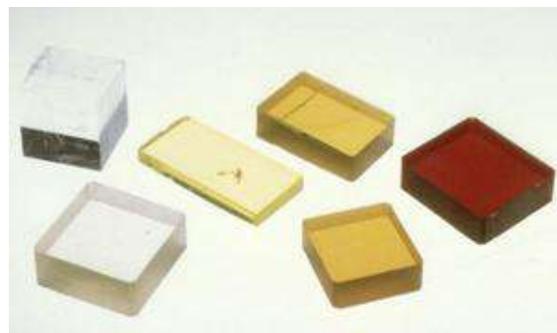
Materiali per la fotonica: Il fluoruro di litio

Il fluoruro di litio (LiF) è un alogenuro alcalino (come il cloruro di sodio, cioè il sale utilizzato in cucina) che ha molte applicazioni in fotonica in virtù delle sue proprietà chimico-fisiche ed ottiche:

- ✓ i cristalli di LiF sono relativamente duri e poco solubili in acqua e quindi sono facilmente maneggevoli e vengono conservati senza particolari cautele;
- ✓ sono otticamente trasparenti da circa 120 nm a 7 μm (dall'ultravioletto all'infrarosso);
- ✓ è possibile crescere film di LiF, cioè strati sottili di questo materiale, mediante evaporazione termica, tecnica semplice e ben assestata (vedi Appendice A).
- ✓ radiazioni ionizzanti (raggi X, raggi gamma, elettroni, protoni ecc.) vengono utilizzate per "colorare" cristalli e film di LiF, cioè per modificare le proprietà di questo materiale. L'irraggiamento produce infatti nella struttura cristallina del LiF, che idealmente è perfettamente regolare e periodica, difetti noti come centri di colore (vedi Appendice B). Nella zona irraggiata l'indice di rifrazione del materiale aumenta (l'indice di rifrazione del LiF non irraggiato è 1.39).



Struttura cristallina del fluoruro di litio.



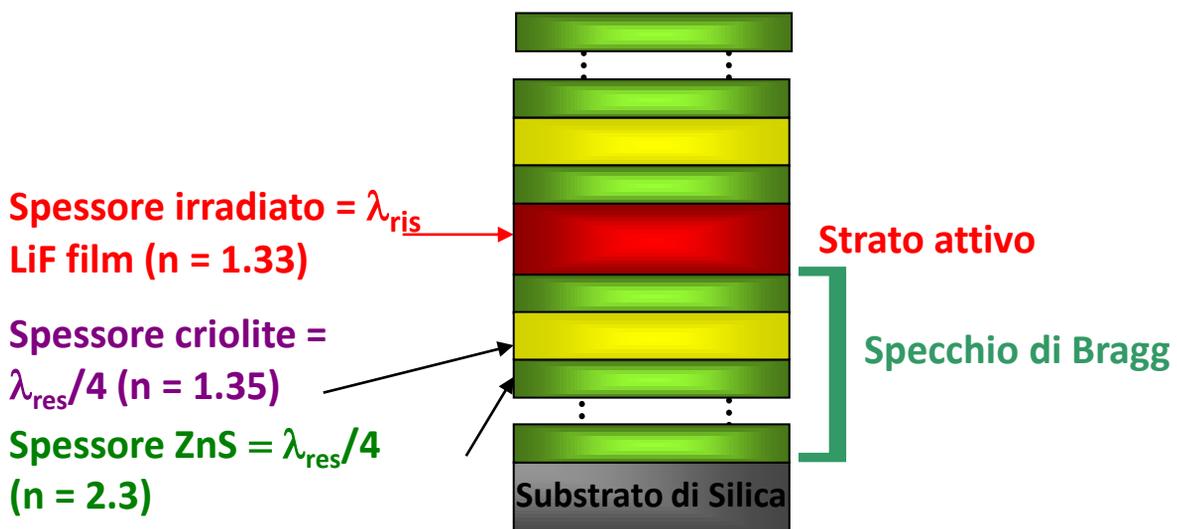
Cristalli di fluoruro di litio non irraggiati (trasparenti) ed irraggiati con raggi gamma (colorati).

Microcavità ottiche basate su film di LiF

Le microcavità ottiche sono delle cavità ottiche risonanti (vedi la slide “Componenti fondamentali di un LASER”) che vengono utilizzate per realizzare **sorgenti di luce miniaturizzate**. La microcavità ottica, mostrata nel seguente schema, consiste di due specchi (indicati nello schema con strati gialli e verdi) fra i quali è posto un film di LiF irraggiato con radiazioni ionizzanti, che ha il ruolo di **mezzo attivo**. Una microcavità di questo tipo è progettata per emettere luce alla lunghezza d’onda λ_{ris} di 668 nm (luce rossa) quando è illuminata da luce blu (che costituisce il pompaggio ottico) perché i centri F_2 prodotti nel film di LiF dall’irraggiamento (vedi Appendice B) assorbono luce blu ed emettono luce rossa.



Luce direzionale emessa da una cavità ottica.



Schema di microcavità ottica.

Guide d'onda nel LiF

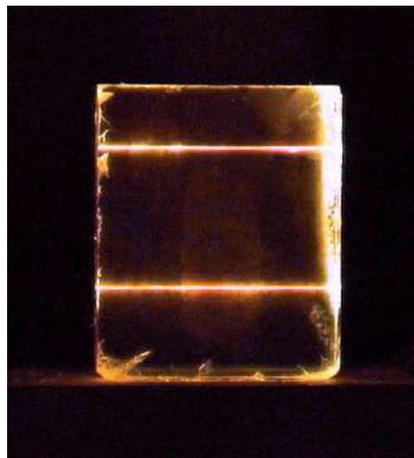
Guide d'onda, come quelle riportate nella seguente figura, si possono considerare come delle fibre ottiche miniaturizzate che, se illuminate con luce esterna opportuna (luce blu), sono in grado di confinare la luce ed amplificarla.

Come è possibile ottenerle?

Si possono realizzare per **scrittura diretta** in cristalli e film di LiF utilizzando un fascio di elettroni focalizzato e di direzione controllatae con energia tipicamente $2 \div 25$ keV. Nella zona di cristallo o film di LiF irraggiata dal fascio di elettroni si formano centri di colore in elevate concentrazioni e stabili a temperatura ambiente, che danno luogo ad un incremento dell'indice di rifrazione nella zona irraggiata, rispetto quella non colorata.

Come funzionano?

La luce blu utilizzata per illuminare le guide viene assorbita dai centri F_2 (Appendice B) i quali emettono luce rossa. La differenza di indice di rifrazione fra zona irraggiata e non irraggiata consente il confinamento della luce rossa (come avviene nelle fibre ottiche).



Guide d'onda, larghe alcuni micron e lunghe alcuni millimetri, operanti nel visibile.

OLED

Un OLED è costituito da due strati organici, indicati con (1) e (2) nel seguente schema, posti tra due elettrodi metallici uno dei quali deve essere semitrasparente (anodo di ITO) per consentire il passaggio della luce emessa.

Il primo OLED è stato realizzato da Tang e Van Slyke nel 1987.

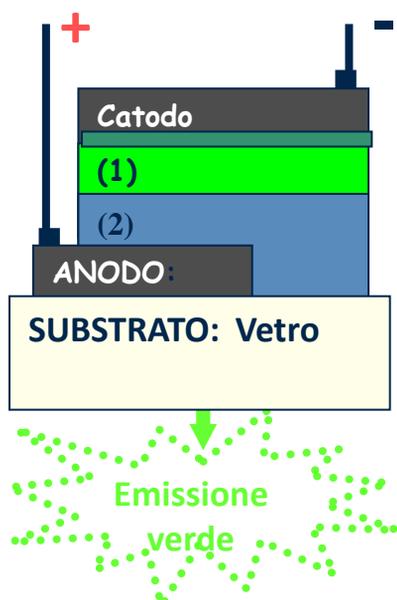
Struttura degli OLED:

Catodo: film di alluminio di 100 nm di spessore + film di LiF di spessore < 5nm

(1): strato emissivo costituito da un film di Alq₃ di spessore 50 nm

(2): strato conduttivo costituito da un film di un composto organico noto come TPD di spessore 50 nm

Anodo : è costituito da un materiale trasparente e conduttivo noto come ITO di spessore 180 nm.



Applicando un'opportuna differenza di potenziale gli OLED emettono luce. L'emissione verde è dovuta alla presenza del film di Alq₃.

Gli OLED posseggono alta brillantezza con consumi ridotti ed ottime caratteristiche di contrasto. Sono ideali candidati per applicazioni nel campo dell'illuminazione e degli schermi luminosi, con prestazioni superiori rispetto ai display a cristalli liquidi.

Presentano però una vita media finita di 10.000 – 20.000 h, troppo corta per un gran numero di applicazioni.

La vita media viene limitata dal fatto che sia gli strati organici che gli elettrodi sono suscettibili a deterioramento a causa della presenza dell'ossigeno e del vapore acqueo atmosferici. Lo stesso funzionamento del dispositivo produce zone non emissive ed il degrado delle sue caratteristiche.

Materiali per la fotonica: Alq₃

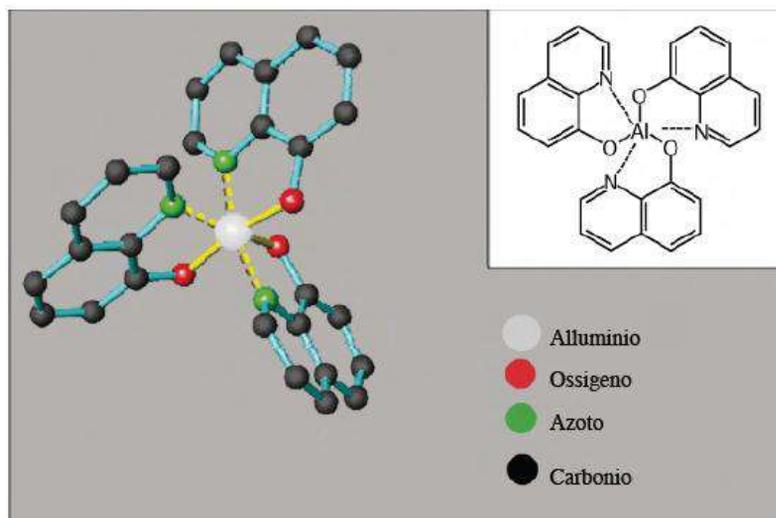
Tra i materiali organici di tipo molecolare, buoni trasportatori di elettroni ed efficienti emettitori di luce, il tris(8-idrossichinolina)alluminio, noto come Alq₃, è uno dei più studiati per le sue proprietà ottiche.

È una polvere di colore giallo insolubile in acqua di formula chimica C₂₇ H₁₈ AlN₃ O₃.

Mediante questa polvere vengono cresciuti per evaporazione termica film di Alq₃ (vedi Appendice A) per realizzare lo strato emissivo degli OLED (strato (1)).

È stato osservato che la degradazione di film di Alq₃ avviene in aria in poche ore facendo diminuire drasticamente la luce che i film di questo materiale sono in grado di emettere se opportunamente illuminati. Film incapsulati in atmosfera inerte usando vetro sigillato con resina epossidica resistono per più di 1.000 h ma sono comunque soggetti a degradazione.

Il riscaldamento (annealing) dei film a temperature comprese fra 130 e 200 °C rallenta la diminuzione della luce emessa e migliora le loro performance (incremento di luminosità e vita media, decremento del voltaggio di funzionamento del dispositivo).



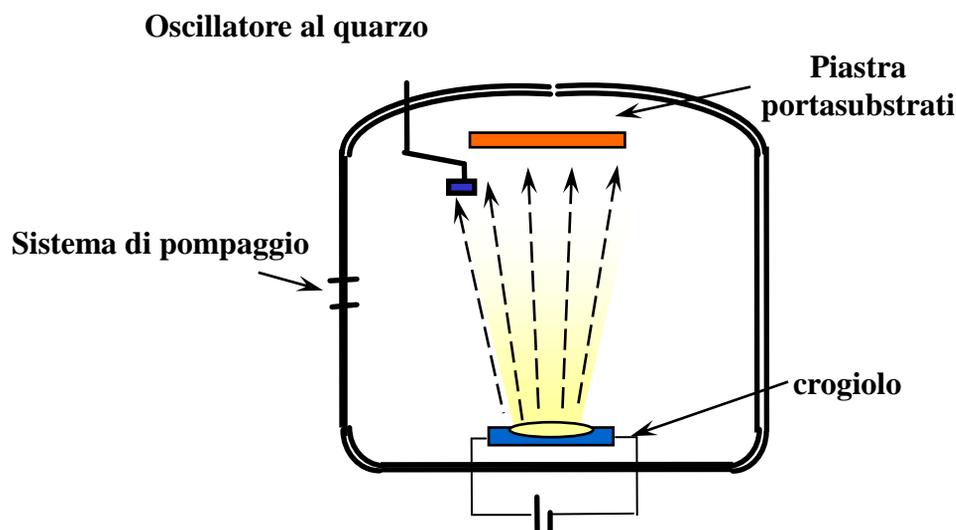
Molecola di Alq₃.

Appendice A

Deposizione di film per evaporazione termica

L'evaporazione termica è una tecnica di deposizione che consente di crescere su diversi substrati film di diversi materiali, in particolare di LiF e di Alq₃.

Il processo di deposizione avviene in una camera di acciaio nella quale viene fatto vuoto (circa 10⁻⁴ Pa). La polvere del materiale che si vuole depositare viene posta in un crogiolo di tungsteno o molibdeno (il crogiolo deve essere chimicamente inerte e non deve fondere alla temperatura alla quale si opera) riscaldato per effetto Joule alla temperatura di sublimazione del materiale che si vuole depositare. Il materiale che sublima si deposita sui substrati alloggiati sulla piastra portasubstrati, come mostrato nel seguente schema.



Tipici parametri di deposizione:

- Pressione $P < 10^{-6}$ mbar
- Velocità di evaporazione = 1 - 10 nm/min
- Distanza substrato-crogiolo = 22/28 cm
- Temperatura substrato compresa fra temperatura ambiente e 300 °C¹⁹

Appendice B

Centri di colore nel LiF

I centri di colore sono dei difetti che vengono prodotti nella struttura cristallina del LiF dall'irraggiamento con radiazioni ionizzanti.

I centri di colore modificano le proprietà ottiche del materiale:

- prima dell'irraggiamento il LiF è trasparente alla radiazione in un ampio intervallo spettrale, dopo l'irraggiamento assorbe la radiazione in ampi intervalli di lunghezza d'onda a causa della formazione dei centri di colore;
- dove vengono formati i centri di colore si ha un incremento dell'indice di rifrazione del materiale.

Fissiamo l'attenzione in particolare su due centri di colore, che vengono chiamati F_2 ed F_3^+ .

Entrambi questi centri assorbono luce blu ed emettono luce rossa (gli F_2) e verde (gli F_3^+).

Su questi concetti sono basate molte applicazioni del fluoruro di litio nella fotonica.