

Introduzione alla tecnologia OLED.

1. Caratteristiche generali

1.1. Struttura

Un diodo organico ad emissione di luce (OLED) consiste in più strati di semiconduttori organici posti tra due elettrodi, di cui almeno uno trasparente. La figura 1 mostra due strutture semplificate di questo dispositivo: un OLED ad emissione unidirezionale della luce (a sinistra) e un OLED trasparente, che emette la luce sia verso l'alto, sia verso il basso (a destra). Questo dispositivo è realizzato sovrapponendo sequenzialmente a un substrato conduttore degli strati organici, ricoperti a loro volta da un elettrodo. La struttura più comune è composta da un substrato di vetro rivestito di ossido di indio-stagno (ITO), che funge da anodo, e da un sottile film metallico, che funge da catodo.

Normalmente lo spessore totale del dispositivo, compresi gli elettrodi, è inferiore a $1\ \mu\text{m}$. Per gli OLED di solito si usano due classi di materiali organici: i polimeri e i materiali a basso peso molecolare (piccole molecole), che non possiedono proprietà orientanti e, quindi, formano film amorfi. Un aspetto interessante dell'optoelettronica basata sui materiali organici è la possibilità di utilizzare semplici tecniche di serigrafia o deposizione umida per produrre dispositivi con ampie superfici a costi vantaggiosi. Attualmente, queste tecniche vengono applicate solo ai polimeri organici, mentre per le piccole molecole si continuano a utilizzare le tecniche di evaporazione.

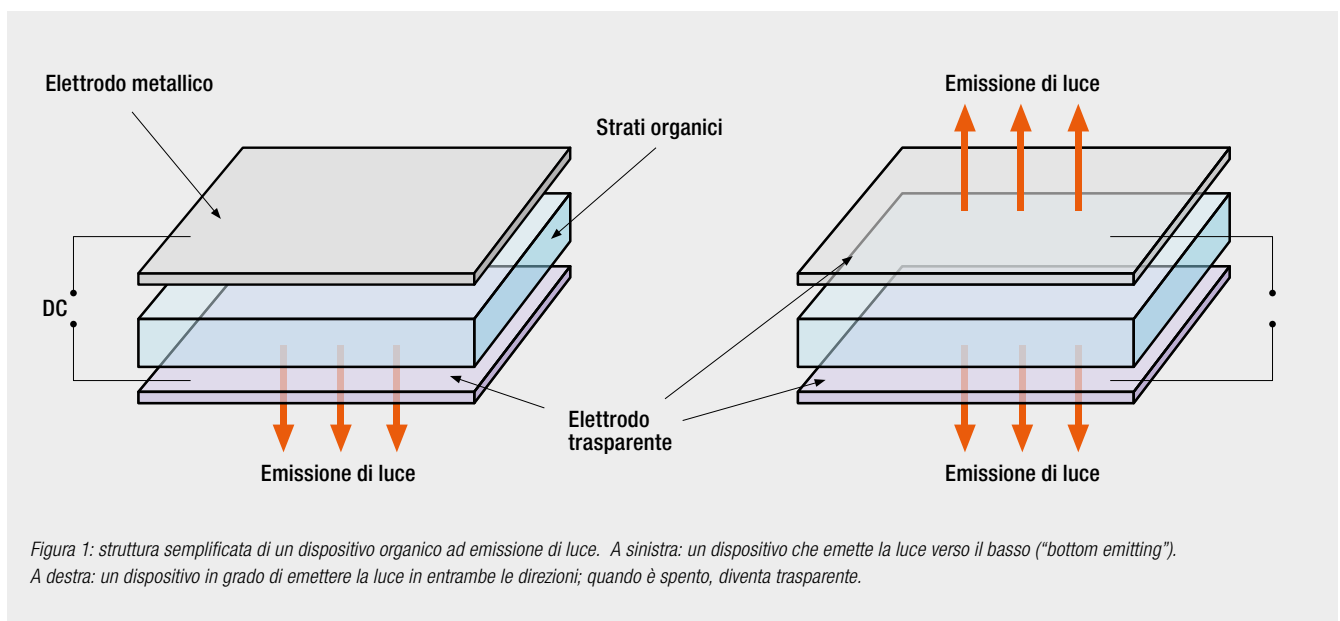


Figura 1: struttura semplificata di un dispositivo organico ad emissione di luce. A sinistra: un dispositivo che emette la luce verso il basso ("bottom emitting"). A destra: un dispositivo in grado di emettere la luce in entrambe le direzioni; quando è spento, diventa trasparente.

1.2. Trasporto per “hopping” e ricombinazione

Quando agli elettrodi viene applicata una corrente di polarizzazione diretta, gli elettroni e le lacune iniettati, possono ricombinarsi negli strati organici, emettendo luce di un determinato colore, a seconda delle proprietà del materiale organico. Poiché nei semiconduttori organici il trasporto dei portatori di carica dipende dai singoli processi di “hopping” tra molecole più o meno isolate lungo la catena dei polimeri (figura 2), la conducibilità dei semiconduttori è di diversi ordini di grandezza inferiore a quella degli omologhi inorganici. Inoltre, il concetto di bande di energia con funzioni di onde altamente delocalizzate non è applicabile all’elettronica organica. Non si parla quindi di “banda di valenza” e “banda di conduzione”, ma di “livello HOMO” (highest occupied molecular orbital level, orbitale molecolare a più alta energia occupato) e “livello LUMO

level” (lowest unoccupied molecular orbital level, orbitale molecolare a più bassa energia non occupato). Prima del decadimento radiativo, in uno stadio intermedio la coppia elettrone-lacuna forma un eccitone che, quando decade, emette luce. A seconda della struttura chimica, una molecola di colorante può essere un emettitore fluorescente o fosforescente. Solo nel secondo caso, tutti gli eccitoni – singoletti e tripletti – possono decadere radiativamente, anche se, nel primo caso, i tre quarti di tutti gli eccitoni – gli eccitoni di tripletto – non emettono luce. Gli emettitori fluorescenti, quindi, hanno un’efficienza intrinseca massima solo del 25%; se possibile, se ne evita l’impiego. Fino ad ora, comunque, la durata degli emettitori fosforescenti, soprattutto a una lunghezza d’onda corta (blu), è inferiore a quella degli emettitori fluorescenti.

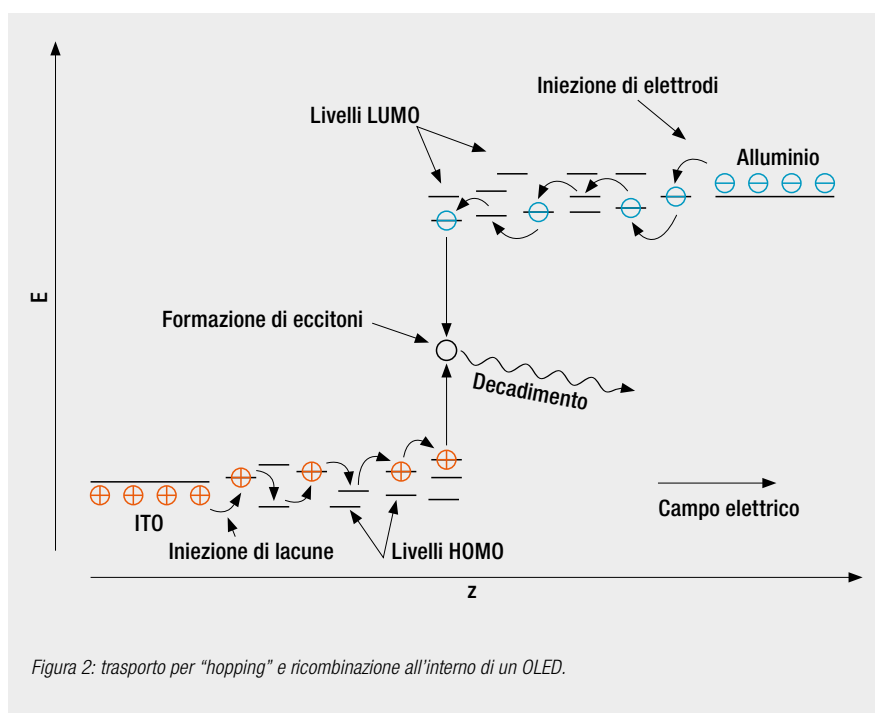


Figura 2: trasporto per “hopping” e ricombinazione all’interno di un OLED.

1.3. Spettro di emissione

Gli spettri di emissione tipici delle molecole organiche sono ampi (vedi figura 3). Come già evidenziato, il colore emesso dipende dalla proprietà del materiale. L'emissione complessiva, pertanto, può produrre qualsiasi colore, compreso il bianco, a qualsiasi temperatura di colore, sovrapponendo diversi strati emittenti in un unico dispositivo. Ciò è possibile perché gli strati organici sono quasi trasparenti nelle regioni dello spettro visibile.

Quasi tutti gli OLED bianchi contengono uno strato emittente rosso, verde e blu, che permette di creare luce bianca di alta qualità.

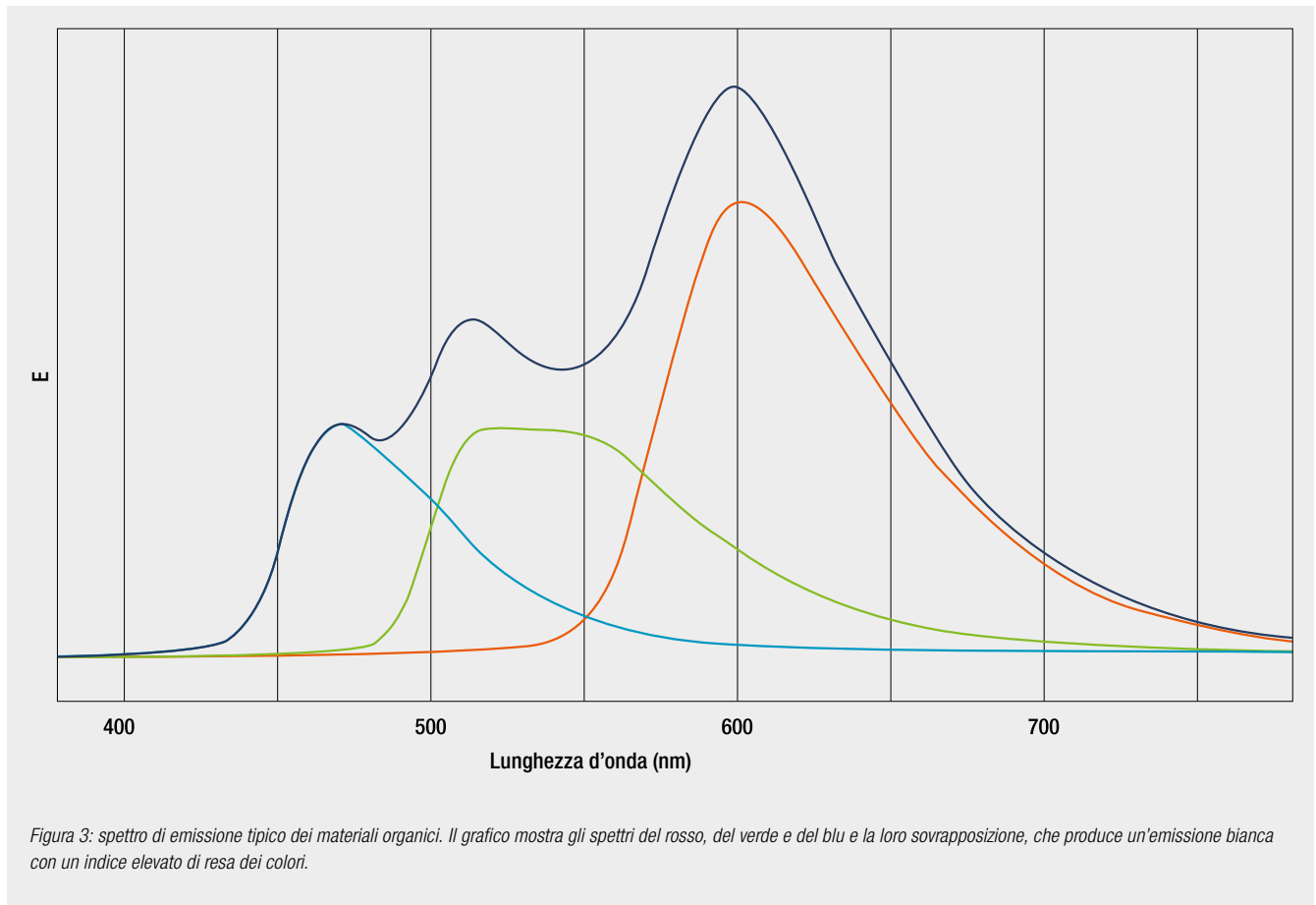


Figura 3: spettro di emissione tipico dei materiali organici. Il grafico mostra gli spettri del rosso, del verde e del blu e la loro sovrapposizione, che produce un'emissione bianca con un indice elevato di resa dei colori.

1.4. Doping

Nella tecnologia dei semiconduttori organici, il doping elettrico viene utilizzato per aumentare la conducibilità del materiale e potenziare l'iniezione dei portatori dagli elettrodi nei materiali organici. Ciò permette di realizzare dispositivi con strati attivi, intrinsecamente non drogati, integrati negli strati drogati di tipo 'p' e 'n', che per questo motivo vengono chiamati "diodi PIN". Il processo di doping, oltre a migliorare le prestazioni elettriche, offre la possibilità di aumentare lo spessore del dispositivo, mantenendo quasi costante la tensione di esercizio. Per fornire una protezione adeguata dai cortocircuiti, lo spessore complessivo del dispositivo compreso tra gli elettrodi deve assommare a qualche centinaio di nanometri. Spesso i cortocircuiti sono causati dalla presenza di particelle sul substrato durante l'evaporazione degli strati organici o dalla rugosità del substrato stesso. Il doping permette anche di collegare in serie diversi strati attivi in una struttura con un maggior numero di strati

sovrapposti (figura 4). Una giunzione PN intermedia in senso contrario si comporta come un contatto tunnel: i portatori possono passare direttamente dal livello HOMO di uno strato al livello LUMO dello strato adiacente. In ambito OLED, queste giunzioni sono spesso chiamate CGL ("charge generation layers", strati di generazione della carica), perché le coppie elettrone-lacuna vengono create in corrispondenza dell'interfaccia e separate dal campo.

Un dispositivo con connessione in serie viene definito "stacking" (configurazione sandwich). Fondamentalmente, ad esempio, un dispositivo sandwich, bianco e doppio, può raggiungere gli stessi livelli di luminanza di un dispositivo planare, utilizzando metà della corrente, perché ci sono due unità emittenti, ma il doppio della tensione. Rispetto ai dispositivi PIN planari, i dispositivi sandwich offrono numerosi vantaggi in termini di durata, prestazioni ottiche, ecc, che vedremo più avanti.

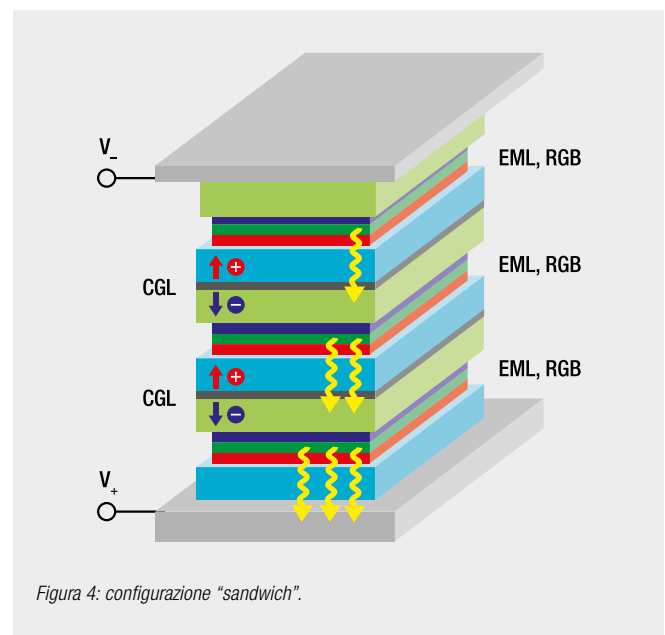


Figura 4: configurazione "sandwich".

1.5. Incapsulamento

Gli strati organici devono essere protetti dal contatto con l'aria, perché sono sensibili all'umidità e all'ossigeno, e si decompongono quando sono esposti all'atmosfera. La figura 5 mostra alcune tecniche di incapsulamento. A sinistra, una copertura di vetro viene incollata alla parte posteriore dell'OLED. Per accrescere la stabilità della barriera di permeazione, lo spazio vuoto tra la copertura di vetro e il dispositivo viene riempito con un gas inerte, e si aggiunge un agente disidratante in grado di assorbire l'umidità e l'ossigeno.

A destra vediamo che sul catodo si deposita un sottile ma denso strato di ossido amorfo, che crea una barriera di permeazione simile all'incapsulamento in vetro raffigurato a sinistra. Data l'estrema sottigliezza, questo tipo di incapsulamento a film sottile (TFE, thin-film encapsulation) deve essere protetto dai danni meccanici, ad esempio laminando uno strato di vetro supplementare, applicando un rivestimento in vernice, ecc.

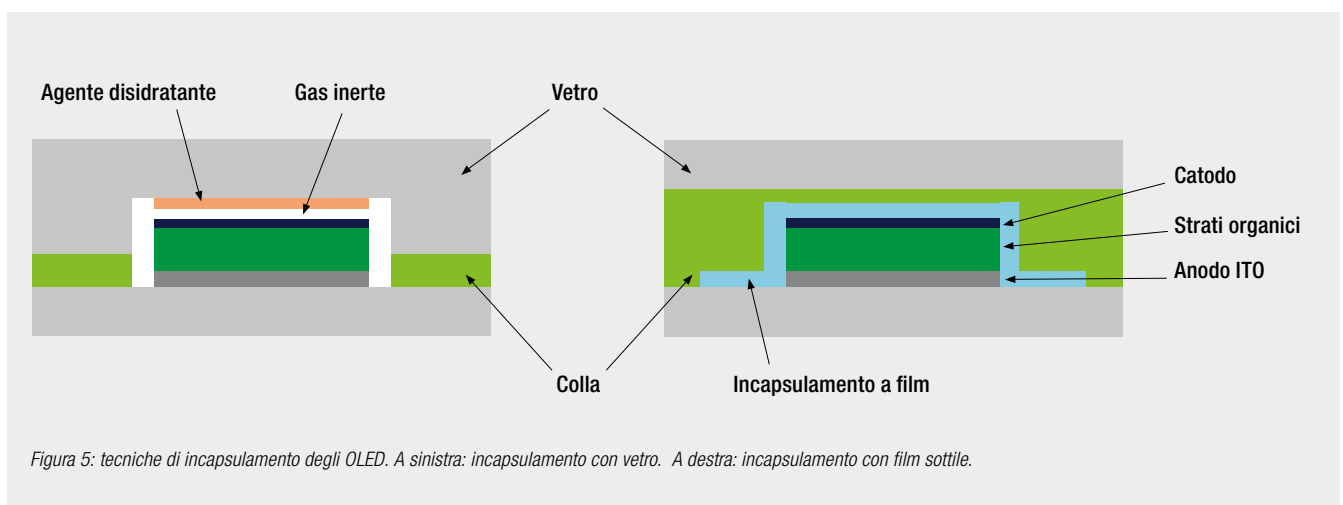


Figura 5: tecniche di incapsulamento degli OLED. A sinistra: incapsulamento con vetro. A destra: incapsulamento con film sottile.

1.6. Cavità ottica

Il sistema a strati sottili di un OLED costituisce una cavità ottica in direzione della normale alla superficie, ossia un sistema ottico con uno spessore complessivo di alcune lunghezze d'onda della luce emessa e uno specchio a ciascuna estremità. In senso stretto, l'OLED è una semicavità, perché solo il catodo di metallo agisce da vero e proprio specchio. A seconda dello spessore e degli indici di rifrazione dei vari materiali, la cavità evidenzia una o più risonanze superficiali per la luce a una determinata lunghezza d'onda. Per i raggi luminosi emessi dal dispositivo con un angolo maggiore rispetto all'angolo di incidenza normale, questa condizione di risonanza si trasforma in lunghezze d'onda superiori.

Di conseguenza, il colore di emissione di un OLED può mostrare una pronunciata dipendenza angolare, che può essere minimizzata attraverso una progettazione intelligente dello spessore degli strati e delle posizioni dei materiali emittenti rispetto al catodo riflettente. Ciò inoltre significa che, quando si genera luce all'interno di una cavità, c'è sempre una posizione ottimale che offre la massima efficienza per uno strato che emette luce a una determinata lunghezza d'onda. La posizione ottimale di uno strato emittente si ottiene agendo sullo spessore degli strati non emittenti.

1.7. Proprietà di guida d'onda

Oltre a formare una microcavità, la pila di strati possiede anche delle proprietà di guida d'onda. Negli strati attivi la generazione della luce avviene per propagazione isotropa, ma solo una piccola parte, cioè la luce con una direzione di propagazione nel cono di fuga, definito dalla condizione della riflessione interna totale in corrispondenza delle interfacce, è realmente in grado di abbandonare il dispositivo. Un'elevata percentuale (circa l'85%) è guidata dall'onda negli strati organici e nel substrato di vetro e non è utile ai fini dell'illuminazione. Un sistema per ovviare a questo problema è aggiungere al substrato in vetro uno strato con adattamento dell'indice di rifrazione, contenente particelle in dispersione, ad esempio un film diffusore. La luce che viaggia nel substrato penetra nel film diffusore, alterandone la direzione quando colpisce una particella e, infine, abbandonando il film con un angolo maggiore. Ne deriva un'efficienza dell'estrazione più elevata, quindi prestazioni complessive migliori del dispositivo e una buona miscelazione dei colori, grazie alla dispersione statistica di tutte le lunghezze d'onda. Ciò comporta anche una minore dipendenza angolare del colore di emissione. L'unico inconveniente dell'utilizzo di un film diffusore è la perdita dell'aspetto a specchio quando il dispositivo è spento.

1.8. Conducibilità

Uno dei principali problemi degli OLED con ampie superfici è la bassa conducibilità del materiale dell'elettrodo, in particolare degli ossidi conduttivi trasparenti (TCO), ad es. l'ossido di indio-stagno (ITO), che è circa di due ordini di grandezza inferiore a quella dell'alluminio. Ciò provoca una significativa caduta di tensione nell'elettrodo trasparente e variazioni nella tensione di comando locale degli strati attivi, a seconda della distanza dai contatti elettrici. Di conseguenza, l'intensità delle emissioni diminuisce dalla periferia al centro del dispositivo. Per ridurre la caduta di tensione laterale, sull'anodo ITO si possono depositare sottili linee di bus metallico; questa operazione aumenta la conducibilità dell'anodo, coprendo solo una piccola porzione dell'area attiva e, quindi, producendo un pattern di luminanza più uniforme. Il circuito equivalente di un dispositivo di grande superficie consiste in un collegamento in serie di tre resistori, che rappresentano l'anodo, gli strati organici e il catodo. A una maggiore resistività differenziale degli strati organici in corrispondenza del punto di funzionamento corrisponde una caduta di tensione minore negli elettrodi e una migliore uniformità. Poiché le configurazioni sandwich hanno una resistività differenziale molto più alta, lo "stacking" rappresenta un modo per migliorare l'uniformità dei dispositivi con grandi superfici senza dover utilizzare delle linee di bus.

1.9. Durata

Durante la vita di un OLED, la luminanza diminuisce monotonicamente a corrente costante; la resistività e quindi la tensione di esercizio aumentano di conseguenza. La durata varia in modo superlineare insieme all'intensità delle radiazioni emesse (o densità di corrente) e alla temperatura. Quest'ultima, in particolare, deve essere presa in considerazione durante la progettazione di apparecchi con OLED. Ad alti livelli di luminanza, i dispositivi con grandi superfici potrebbero avere temperature molto elevate durante il funzionamento. Per questo motivo, si dovrebbe prevedere la possibilità di scambiare calore con l'ambiente circostante, per garantire una lunga durata al dispositivo. In questo caso, ancora una volta le architetture impilate offrono la possibilità di ridurre le singole emissioni di ciascuna unità, rallentando i meccanismi di invecchiamento e mantenendo costante l'emissione complessiva.

1.10. Caratteristiche speciali

Gli OLED offrono caratteristiche uniche:

- Possono essere molto sottili e quindi molto leggeri: lo spessore dipende essenzialmente dal substrato e dall'incapsulamento.
- Sono sorgenti luminose superficiali prive di abbagliamento, che possono essere trasparenti oppure avere un aspetto a specchio o opalescente quando sono spente.
- Offrono un'elevata qualità cromatica e si accendono immediatamente al passaggio della corrente.
- Possono essere efficienti e durevoli quanto o più delle lampade fluorescenti, e sono totalmente privi di mercurio.
- Non emettono UV o IR.
- I prodotti realizzati con gli OLED potranno essere plasmabili o sagomabili.

2. Caratteristiche elettro-ottiche

2.1. Emissione

Con buona approssimazione, si può dire che gli OLED sono superfici emittenti lambertiane, perché hanno la stessa radianza da qualsiasi angolo di osservazione. Questa caratteristica può essere in qualche misura modificata variando la composizione della microcavità. La modellazione di un fascio efficace è possibile solo per mezzo di elementi ottici esterni aggiuntivi, come gli array di microlenti.

Come già detto, il colore di emissione di un OLED mostra una notevole dipendenza angolare, che può essere minimizzata applicando un film diffusore alla superficie emittente.

La figura 6 mostra che lo spostamento angolare del colore nello spazio CIE può essere ridotto di più di un ordine di grandezza per mezzo di un diffusore, portando allo stesso tempo l'efficienza del processo di out-coupling fino al 50%.

2.2. Intensità di emissione

Solitamente l'intensità di emissione di un OLED è data dalla sua luminanza, cioè dalla misura dell'intensità luminosa per unità di superficie della luce che viaggia in una determinata direzione. L'unità di misura della luminanza è espressa in cd/m^2 oppure in "nit". I valori tipici della luminanza sono compresi tra $300 \text{ cd}/\text{m}^2$ per l'illuminazione d'atmosfera d'ambiente e alcune migliaia di cd/m^2 per l'illuminazione generale.

Questi valori corrispondono a un flusso luminoso compreso tra 10 e 100 lumen, per un dispositivo con una superficie di 100 cm^2 . L'efficienza degli OLED e di altre sorgenti luminose si misura in lumen per watt, e si chiama "efficienza luminosa". A volte le specifiche comprendono l'efficienza quantica esterna, che indica il rapporto tra numero di fotoni generati e numero di coppie di elettroni-lacune iniettate. I dati sulle prestazioni indicati nelle schede tecniche si riferiscono al funzionamento a $1000 \text{ cd}/\text{m}^2$.

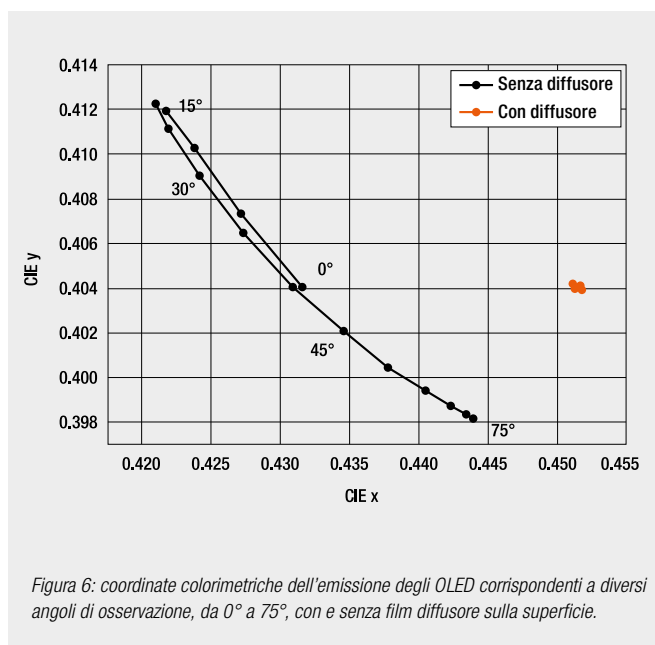


Figura 6: coordinate colorimetriche dell'emissione degli OLED corrispondenti a diversi angoli di osservazione, da 0° a 75°, con e senza film diffusore sulla superficie.

2.3. Caratteristiche I-V e I-L

La figura 7 mostra le caratteristiche tipiche corrente-tensione e corrente-luminanza. Con buona approssimazione, la luminanza è direttamente proporzionale alla corrente di esercizio. I dispositivi sandwich funzionano con una tensione multipla rispetto ai dispositivi planari con la stessa luminanza, a seconda del numero di unità emittenti. Contemporaneamente, la corrente di esercizio è più bassa, cosicché l'efficienza luminosa è all'incirca la stessa per entrambe le configurazioni. Tuttavia, la resistività differenziale, cioè la curva delle caratteristiche tensione-luminanza, è ridotta, e ciò rende le configurazioni sandwich più adatte alla produzione di dispositivi con grandi superfici (vedi sezione 1.4.).

2.4. Indice di resa dei colori

L'indice di resa dei colori (IRC) è la misura quantitativa della capacità di una sorgente luminosa di riprodurre i colori di vari oggetti in modo simile a una sorgente luminosa naturale. Un IRC pari a 100 significa che la sorgente luminosa ha le stesse proprietà della luce a incandescenza (CCT < 5.000 K) o della luce diurna (CCT > 5.000 K). I valori inferiori a 100 indicano una carenza in qualche regione dello spettro. Come spiegato nella sezione 1.3., lo spettro di emissione di una molecola organica è naturalmente ampio: è facile raggiungere un IRC superiore a 80 abbinando emettitori rossi, verdi e blu (come in figura 1). Inoltre, osservando lo spettro, risulta evidente che gli OLED non emettono UV o IR.

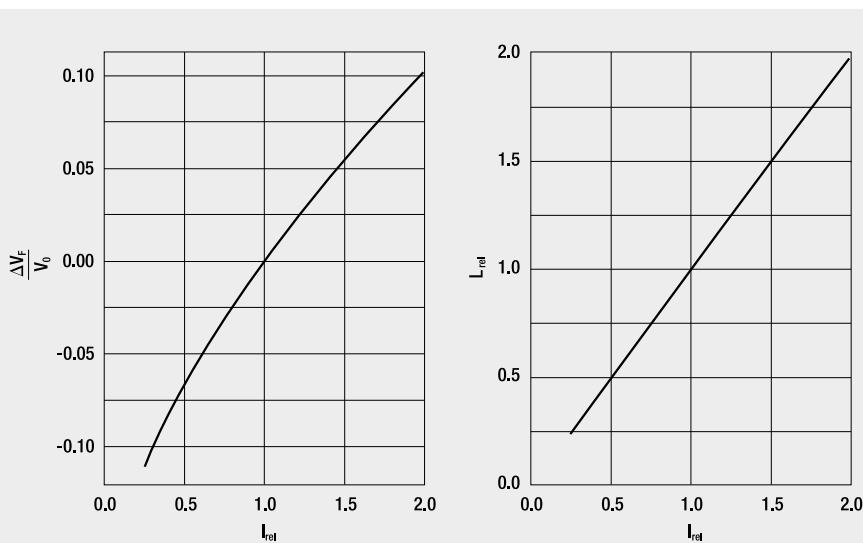


Figure 7: caratteristiche I-V (a sinistra) e I-L (a destra) nelle unità relative. Una corrente o luminanza relativa pari a 1 e una tensione pari a 0 si riferiscono a condizioni di funzionamenti tipiche.

OSRAM SpA

Viale dell'Innovazione, 3
20126 Milano
Tel. 02 4249.1
Fax 02 4249.380
www.osram.it