

fondata da AIDI nel 1962 · n. 300-301/2012 · anno 50 · bimestrale · € 12,00

Gino Sarfatti  
alla Triennale  
**di Milano**

I giovani  
progettisti:  
le opinioni di  
**APIL, PLDA  
e AIDI**

Viaggio  
nell'impresa  
**della luce  
Italiana**

Luce per  
il verde  
**di Verona**

LED, qualità  
della luce  
**ed efficienza**



# LED: QUALITÀ DELLA LUCE E EFFICIENZA

L'articolo prende spunto da una ricerca in corso presso il Laboratorio Luce del Politecnico di Milano mirata alla valutazione di differenti sistemi a LED per la generazione della luce bianca in collaborazione con aziende del settore illuminazione. L'analisi dello stato dell'arte ha permesso di individuare le soluzioni maggiormente diffuse sul mercato e di valutarne le prestazioni sulla base di due parametri principali: la qualità della luce (intesa soprattutto come indice di resa cromatica) e l'efficienza luminosa.

di Fulvio **Musante**, Maurizio **Rossi**, Danilo **Paleari**, Daria **Casciani**, Andrea **Siniscalco** \*

## **L** A LUCE BIANCA CON I LED

La maggior parte delle soluzioni tecnologiche a LED utilizzano il principio della sintesi additiva del colore per generare la luce bianca. La luce bianca può essere generata attraverso il mix dei tre colori primari (rosso, verde e blu) oppure anche attraverso la combinazione di un primario (blu) con il suo complementare (giallo). Con l'attuale livello di sviluppo ottenuto dei LED per l'illuminazione si sono consolidati tre metodi per la generazione della luce bianca. Il primo metodo è ottenuto attraverso la combinazione di più dies (chip) di colori diversi (tipicamente rosso, verde e blu) all'interno di uno stesso package, oppure realizzando cluster di LED differenti. Il vantaggio di questo metodo risiede nella possibilità di realizzare una vasta combinazione di colori all'interno della gamut area definita dalle coordinate cromatiche dei singoli dies, con la conseguente possibilità di realizzare una gamma di bianchi dal freddo al caldo. Per contro il suddetto metodo ha il difetto di generare una luce bianca con scarsa resa cromatica. Per ovviare a questa criticità alcuni produttori hanno realizzato multichip di tipo RGBW (rosso, verde, blu e bianco). Altro svantaggio di questa metodologia è legato ai costi elevati in quanto il sistema di pilotaggio elettronico è sostanzialmente più complesso. Nel caso di applicazioni che richiedano esclusivamente luce bianca questo metodo non viene generalmente utilizzato.

Il secondo metodo è quello di utilizzare un LED blu in combinazione con un materiale convertitore di lunghezza d'onda (fosforo). In questo caso la luce blu generata dal LED eccita il fosforo che la converte riemettendola a lunghezze d'onda maggiori (con un picco tipicamente sul giallo). Il mix di blu e giallo viene percepito dall'occhio umano come luce bianca e una attenta miscelazione dei fosfori permette di ottenere temperature di colore su tutta la curva planckiana. I fosfori maggiormente utilizzati sono gli YAG:Ce (Yttrium Aluminium

Garnet dopati con Cerio). Rispetto al metodo RGB, il metodo a conversione di fosfori ha un notevole vantaggio legato alla necessità di pilotare un unico emettitore di luce, con notevoli semplificazioni e risparmi in termini di elettronica di controllo. Anche dal punto di vista ottico il controllo è estremamente semplificato in quanto non ci sono grossi problemi di miscelazione del colore (a parte il fenomeno del cosiddetto "yellow ring" dovuto ad una differente distribuzione nello spazio della luce blu e della luce gialla). Per ottenere indici di resa cromatica elevati vengono usati due differenti tipi di fosfori: uno che converte in luce verde-gialla e l'altro che converte in luce ambra-rossa. Con il metodo a conversione di fosfori è possibile raggiungere elevatissimi valori di indice di resa cromatica, anche se questa è ottenuta a scapito dell'efficienza.

Un terzo metodo di recente sviluppo utilizza un approccio intermedio tra i due precedenti. La luce bianca viene ottenuta attraverso il mix di due tipi di sorgenti: LED Blu e fosfori verdi per ottenere un'emissione spettrale spostata nella regione verde poco sopra la planckiana e LED rossi o ambra.

## **LA CONVERSIONE DEI FOSFORI**

La metodologia ad oggi di gran lunga più utilizzata per la generazione della luce bianca è quindi quella che utilizza la conversione dei fosfori. Il fosforo pertanto diventa uno dei materiali chiave nell'illuminazione allo stato solido. Come abbiamo illustrato sopra, il fosforo assorbe la luce blu (ma anche UV) e la converte in luce con lunghezze d'onda maggiori. I fosfori pertanto giocano un ruolo importante nella definizione delle performances dei LED bianchi quali l'efficienza luminosa, la resa dei colori, la temperatura colore, la vita utile, la stabilità del colore ecc. I fosfori utilizzati in applicazione SSL devono avere le seguenti caratteristiche:

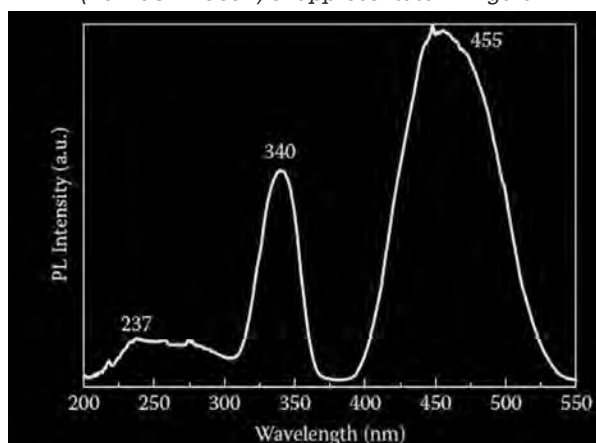
- Forte capacità di assorbimento dello spettro emesso dai LED blu.

\* Dip. INDACO  
Politecnico di Milano

- Alta efficienza di conversione alle lunghezze d'onda desiderate.
- Bassa dipendenza delle caratteristiche di emissione in funzione della temperatura.

Ad oggi numerosissimi tipi di fosfori sono stati sperimentati per l'utilizzo con i LED (alluminati, nitruri e solfuri). Tra le principali caratteristiche è opportuno citare la stabilità termica in relazione alle caratteristiche di emissione spettrale.

Il principio fisico di funzionamento dei fosfori è denominato fosforescenza, un fenomeno che consiste nell'emissione di fotoni di luce visibile da parte di materiali eccitati da cause diverse dall'aumento di temperatura. La fosforescenza nasce dalla proprietà di alcuni materiali di assorbire quantità discrete di energia, successivamente restituita sotto forma di fotoni. Generalmente i fosfori più efficienti e stabili sono basati su un materiale inorganico che funge da "host" e che viene dopato da ioni attivatori. Nel corso degli ultimi anni gli attivatori  $\text{Eu}^{2+}$  e  $\text{Ce}^{3+}$  sono stati quelli più utilizzati. Lo spettro di eccitazione di un fosforo tipicamente usato per White LED ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ ) è rappresentato in Figura 1.



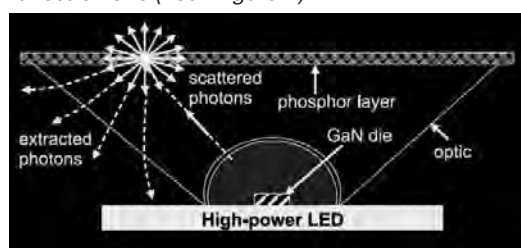
**Figura 1** Spettro di eccitazione di un fosforo  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$

Come si vede ci sono due ampie bande di eccitazione centrate sui 340 e 455 nm. Tale spettro è dovuto in gran parte al dopante (Ce) in quanto il solo YAG non dopato presenta un picco di assorbimento solo a circa 190 nm. Il picco di assorbimento estremamente elevato a 455 nm si combina molto bene con l'emissione dei LED a base GaN, conferendo allo  $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$  ottime caratteristiche di conversione in luce visibile a lunghezze d'onda maggiori in termini di efficienza. Ciò che occorre tenere sicuramente in considerazione è l'efficienza di emissione in funzione della temperatura; alle temperature tipiche di funzionamento dei LED si ha una riduzione del flusso di circa il 10-15%.

#### FOSFORI REMOTI

Nei LED dicromatici i fosfori possono essere disposti a diretto contatto con il die (conformal phosphor distribution) oppure distribuiti uniformemente nel materiale incapsulante contenuto nel riflettore primario (phosphor-in-cup). Queste due tipologie di deposizione limitano l'efficienza dei LED per il seguente motivo: a causa della riemissione isotropica dei fotoni, una gran parte della luce emessa dai fosfori tornerà sul die dove verrà riassorbita. Questa problematica è

maggiormente evidente nella configurazione "conformal phosphor" a causa del diretto contatto dei fosfori con il die. Se i fosfori vengono invece posizionati ad una distanza sufficientemente ampia dal LED chip, configurazione cosiddetta a fosfori remoti, la probabilità di un raggio di luce emesso dal fosforo di essere riassorbito si riduce notevolmente; inoltre la configurazione a fosfori remoti riduce la temperatura operativa dei fosfori incrementando la vita e l'affidabilità del sistema. Nel 2005 al Lighting Research Center (LRC) del Rensselaer Polytechnic Institute (NY) è stata messa a punto una tecnica basata sui fosfori remoti denominata Scattered Photon Extraction (SPE) al fine di incrementare in modo significativo l'efficienza di estrazione dei LED [1]. La tecnica si basa sullo spostamento dei fosfori lontano dal die e sulla progettazione di una camera di miscelazione in grado di estrarre una quantità significativa di luce proveniente dal "back scattering". Il concetto dei fosfori remoti era già stato preso in considerazione precedentemente ma l'SPE è il primo metodo in grado di dimostrare l'efficienza di estrazione della luce "back scattered" con risultati notevoli in termini incremento di efficienza di estrazione (vedi Figura 2).

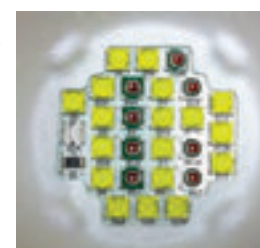


**Figura 2** - Principio di funzionamento dei fosfori remoti

#### IL METODO IBRIDO

Recentemente sono stati introdotti sul mercato alcuni moduli LED basati sul metodo ibrido (Figura 3). La combinazione di LED a conversione di fosfori che emettono nella regione bianco/verde e di LED rossi permette di ottenere luce bianca ad elevato indice di resa cromatica senza penalizzarne l'efficienza.

Il led "bianco-verde" viene realizzato utilizzando un led blu e dei fosfori verdi (le perdite di efficienza nella conversione sono molto ridotte in quanto lo spostamento delle lunghezze d'onda è minore rispetto ai fosfori gialli o rossi). L'utilizzo di un LED che emette direttamente e non per conversione nella regione dei rossi comporta un notevole vantaggio in termini di efficienza e di resa cromatica, soprattutto a basse temperature colore. Questo approccio è in grado di produrre luce bianca con una maggiore efficienza quantificabile attorno al 20-30%. Per contro l'utilizzo di due tecnologie LED differenti (InGaN e AlInGaP) per la generazione del blu e del rosso comportano un livello di complicazione maggiore per il controllo elettronico dell'alimentazione.



**Figura 3** – Modulo LED basato sul metodo ibrido

#### MISURAZIONI

Sulla base di quanto esposto in precedenza, si è deciso di mettere a confronto le prestazioni delle tre soluzioni tecnologiche descritte (LED a conversione di fosfori, fosfori remoti, sistemi ibridi)

con particolare interesse per l'efficienza luminosa e la "qualità" cromatica della luce emessa. Sono stati pertanto misurati il flusso luminoso e la distribuzione spettrale, a differenti valori della corrente di alimentazione, di alcuni sistemi LED a fosfori remoti, LED a conversione di tipo COB (Chip On Board) a temperatura di colore variabile e moduli LED ibridi. I flussi luminosi emessi dalla camera di miscelazione accoppiata a due differenti tipologie di fosfori remoti, sono stati misurati sia sul goniofotometro (alla corrente di 350mA-550mA-700mA) sia in sfera integratrice (tra 50mA e 700mA a passi di 50mA).

Per la dissipazione termica del sistema a fosfori remoti è stato impiegato un dissipatore in alluminio con resistenza termica pari a 0.48 °C/W, in modo tale che l'emissione dei LED blu fosse poco influenzata dalla temperatura di giunzione.

I moduli ibridi sono stati misurati sia con goniofotometro sia in sfera integratrice a correnti differenti: 350 mA e alla corrente tipica di funzionamento definita dal produttore. Per quanto riguarda il COB a temperatura colore variabile, le misure di flusso sono state effettuate in sfera integratrice; le correnti nominali impiegate sono comprese in un intervallo tra 50 mA e 700 mA, con incremento di 50 mA: per il raggiungimento del regime termico dopo la variazione della corrente è stato atteso un intervallo di tempo pari a 20 min.

**Tabella 1** Sintesi dei risultati di misura sistema fosfori remoti

#### Efficienze fosfori remoti

	Corrente (mA)	Flusso (lm)	Potenza el. Assorbita(W)	Efficienza lm/W
FR 830	0.347	563.15	5.81	96.77
FR 830	0.694	1047.34	12.00	87.28
FR 930	0.347	464.66	5.82	79.75
FR 930	0.694	863.96	12.01	71.96

I dati di efficienza dei sistemi ibridi sono riportati nella seguente tabella.

**Tabella 2** Sintesi dei risultati di misura sistema ibrido  
**Efficienze moduli ibridi**

	Corrente (mA)	Flusso (lm)	Potenza el. Assorbita(W)	Efficienza lm/W
930-1250 lm	440	1293,94	13,323	97,12
930-1250 lm	350	1062,42	10,418	101,98
940-1250 lm	440	1187,24	13,133	90,40
940-1250 lm	350	984,71	10,271	95,87
930-2000 lm	900	2000,81	21,579	92,72
930-2000 lm	350	901,99	7,823	115,30
930-3000 lm	900	2804,86	30,445	92,13
930-3000 lm	350	1274,73	11,083	115,02

Per quanto riguarda i COB a temperatura di colore variabile, limitatamente al solo canale caldo i risultati in termini di efficienza sono i seguenti

**Tabella 3** Sintesi risultati di misura COB  
Efficienze COB warm white

#### Efficienze moduli ibridi

	Corrente (mA)	Flusso (lm)	Potenza el. Assorbita(W)	Efficienza lm/W
Warm (2700 K)	347	1049.09	11,86	88.38
	697	1853.184	25,09	73.86

I dati riassuntivi del confronto sono disponibili nella Tabella 4, in cui è stato aggiunto un parametro importante, il LER (luminous efficacy of optical radiation)[2] che rappresenta il rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza ottica totale emessa.

$$LER = 683 \frac{\int_{380}^{780} P_{white}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} P_{white}(\lambda) d\lambda}$$

**Tabella 4** Confronto tra le diverse soluzioni esaminate

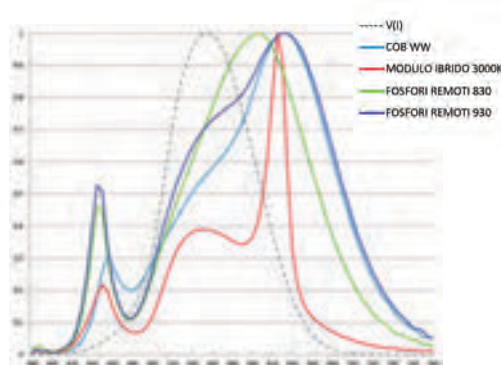
#### Efficienze moduli ibridi

	Modulo ibrido 930	Modulo ibrido 940	COB WW	COB CW	Fosfori remoti 830	Fosfori remoti 930
CCT:	2981	3748	2673	5260	2899	2947
Duv:	0,003	0,004	0,000	0,004	0,002	0,000
CRI Ra:	92	91	97	91	78	89
R(9-12):	78	73	91	76	50	75
R9:	77	70	81	63	6	68
CQS	90	90	94	90	79	87
LER(lm/W):	345	339	265	288	323	275

Dall'esame dei risultati della tabella 4, si osserva che il sistema che offre una maggiore efficienza in termini di LER è rappresentato dai moduli a tecnologia ibrida. Ciò significa che è la distribuzione della potenza emessa all'interno della banda del visibile, a parità di potenza ottica emessa, a determinare la maggiore quantità di flusso luminoso emesso. Il valore del LER è strettamente legato all'indice di resa cromatica: al crescere della resa cromatica il LER diminuisce in relazione al fatto che è necessario distribuire la potenza radiata su tutto lo spettro del visibile; ad esempio il passaggio da un valore del CRI da 80 a 90 nella tecnologia a fosfori remoti determina un decremento del LER da 323 a 275 lm/W.

La Figura 4 mostra le differenti distribuzioni spettrali delle soluzioni considerate; si individua chiaramente la differenza tra le tecnologie a conversione di fosfori (sia prossimali che remoti) e la tecnologia ibrida.

Per ottenere alti indici di resa cromatica nel caso della tecnologia ibrida si utilizzano LED rossi che hanno una banda di emissione molto più stretta rispetto ai fosfori utilizzati nella tecnologia a conversione; essendo ai margini della curva di visibilità questo si traduce in una ottimizzazione dell'emissione spettrale con un conseguente vantaggio in termini di efficienze luminose (lm/W).



**Figura 4** Distribuzioni spettrali delle diverse soluzioni messe a confronto



L'utilizzo di un picco di emissione più stretto nella zona dei rossi non comporta, contrariamente a quello che si potrebbe immaginare, una diminuzione della qualità cromatica. Nei grafici successivi vengono confrontati i valori dei singoli indici del CRI (Figura 5) e del CQS [3] (Figura 6) relativi alle tecnologie esaminate. I fosfori remoti con minore indice di resa cromatica che hanno un valore del LER comparabile a quello delle soluzioni ibride presentano valori estremamente bassi degli indici parziali soprattutto nella zona dei rossi. Le soluzioni ibride sono invece perfettamente confrontabili in termini sia di CRI che di CQS con le soluzioni a conversione dei fosfori ad elevati indici di resa cromatica.

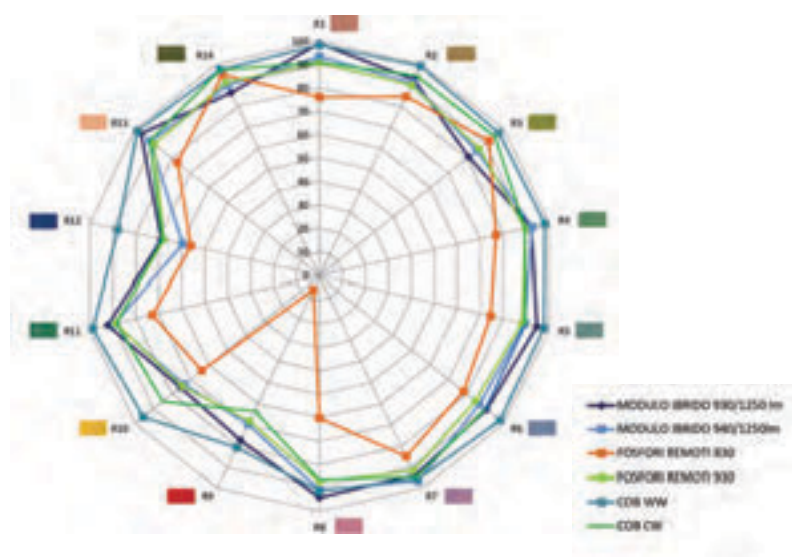


Figura 5 Indici CRI

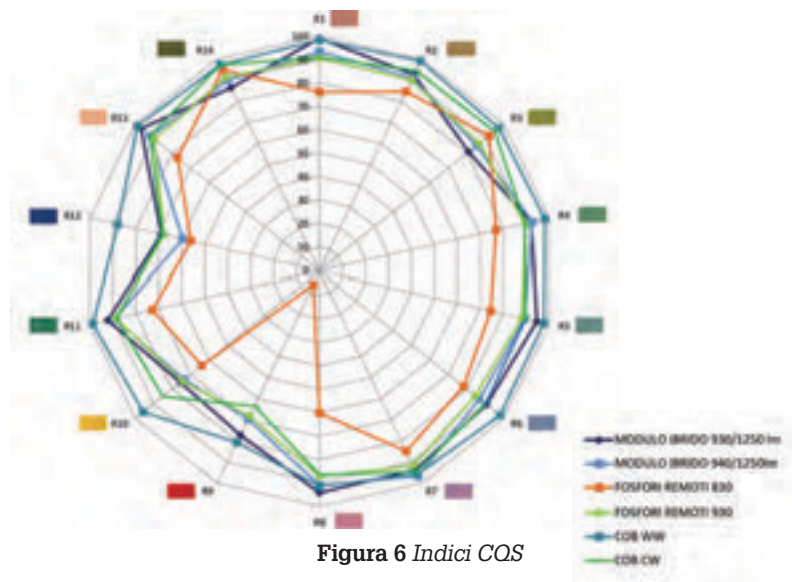


Figura 6 Indici CQS

## CONCLUSIONI

Sono state individuate tre differenti tecnologie per la generazione di luce bianca con LED, con "pacchetti" di flusso luminoso consistente:

- COB
- Fosfori remoti
- Moduli a tecnologia ibrida (bianco a conversioni di fosfori e led rossi)

Per i fosfori remoti si sono riscontrati dei vantaggi rispetto ai COB per quanto riguarda il flusso emesso per basse temperature di colore e elevati indici di resa cromatica, dove la ridotta temperatura di funzionamento dei fosfori e una riduzione del back-scatter consente una migliore efficienza. Il sistema offre una gestione più flessibile del pro-

dotto (per cambiare indice di resa cromatica o tonalità della luce emessa è sufficiente sostituire il disco su cui sono depositi i fosfori, operazione che potrebbe essere fatta anche in esercizio). Per contro si registrano degli aumenti di costo del prodotto (acquisto del fosforo) e la dipendenza da un solo fornitore per l'approvvigionamento, la necessità di creare un camera di miscelazione che se non correttamente progettata potrebbe andare a ridurre il vantaggio competitivo rispetto ai sistemi tradizionali. La qualità della luce emessa risulta sostanzialmente insensibile alle variazioni di temperatura, a differenza di altre soluzioni progettuali. Occorre anche osservare che i sistemi basati su fosforo remoto potrebbero non eliminare la necessità di un sistema ottico secondario, la camera potrebbe essere progettata per realizzare aperture del fascio minori, nell'intorno di 41°-42° di semi-apertura rispetto a quella lambertiana, ma difficilmente si otterrebbero fasci molto stretti e uniformi.

I COB rappresentano invece la soluzione più semplice, dal punto di vista costruttivo, per ottenere elevati indici di resa cromatica a discapito però di un'efficienza luminosa non ottimale.

I moduli a tecnologia ibrida consentono di ottenere efficienze superiori laddove è richiesto un indice di resa cromatica elevato (non vi è molta convenienza a realizzare tale sistema per indice di resa cromatica 80) a scapito di una complicazione elettronica nella gestione delle correnti di pilotaggio delle diverse tipologie di LED impiegati.

Anche in questo caso occorre considerare un incremento dei costi dovuti alla presenza di una camera di miscelazione, il cui progetto rappresenta un fattore critico per non erodere il vantaggio in termini di efficienza fornito dalla tecnologia ibrida, le dimensioni devono essere contenute, sia ha necessità di ottiche aggiuntive per la realizzazione di fasci stretti, i materiali impiegati devono avere elevata riflettanza e costi compatibili con il tipo di prodotto realizzato.

Le prove effettuate hanno rilevato una criticità in uno dei due moduli ibridi analizzati e questo fatto ha suggerito la possibilità di nuove linee di ricerca per approfondire alcuni aspetti:

- Dipendenza della distribuzione cromatica dalla temperatura: la presenza di due diverse tecnologie LED mette a dura prova il sistema di controllo delle correnti nei diversi rami, che deve compensare in modo differente la deriva termica dei LED per mantenere costante la cromaticità emessa infatti la qualità del fascio emesso si misura anche dalla variazione del  $\Delta uv$  sul diagramma cromatico, al variare delle condizioni di dissipazione termica.
- Valutazione delle possibili complicazioni circuitali, come per esempio una retroazione non solo di temperatura, ma anche cromatica, comporta l'adozione di questa nuova tecnologia rispetto a quelle dei fosfori remoti o dei COB

## BIBLIOGRAFIA:

- [1] Narendran, N., Y. Gu, J.P. Freyssinier-Nova, and Y. Zhu. 2005. Extracting phosphor-scattered photons to improve white LED efficiency. *phys. stat. sol.*
- [2] Ohno, Y, Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra. *Proc. of SPIE Vol. 5530*
- [3] Davis, W and Ohno, Y, Toward an improved color rendering metric, *Proc. Of SPIE, Vol. 5941*