

Světlo-konvertující kompozitní fosfor s vysokým CRI

Vojtěch Miller vojtech.miller@tul.cz, RNDr. Ing. Jan Kubát Ph.D.

Cílem této práce je vyvinout bílý zdroj světla s vysokým indexem podání barev skládající se z modré 450 nm diody a kompozitního světlo-konvertujícího fosforu. Existuje mnoho možností, jak dosáhnout bílého zdroje světla s vysokým indexem podání barev. V této práci jsem využil světlo-konvertující kompozitní fosfor složený z destičky monokrystalického YAGu dopovaného cerem a vrstvy práškového červeně konvertujícího nitridového fosforu zalitého v silikonu. Součástí výzkumu je příprava vrstev s práškovým nitridovým fosforem, výběr monokrystalického YAGu se správnými vlastnostmi a odladění obou částí na základě vyhodnocení průběžně získaných dat.

Klíčová slova: fosfor, vysoké CRI, WLED, CIE

Úvod

V posledních letech vidíme na trhu obrovský nárůst sortimentu LED osvětlení a jeho neustálý vývoj. Cílem této práce je vytvořit světlo-konvertující kompozitní fosfor, který umožní konverzi modrého 450 nm světla na žluté/červené světlo tak, aby výsledné složené světlo bylo bílé a zároveň mělo vysokou věrnost podání barev (vysoké CRI). Cílem je umožnit vznik bílých LED (WLED) zdrojů světla, které budou mít vysoké CRI. Zároveň monokrystalické fosfory vydrží pracovat při vyšších teplotách než ostatní druhy fosforů (práškové a keramické).

Jednou z největších výzev této problematiky je nalezení správných poměrů jednotlivých složek kompozitního fosforu a optimalizování dalších vlastností, které mají vliv na výslednou intenzitu a barvu světla. Stejnou tematikou se zabývá řada výzkumných institutů či firem po celém světě. Jako příklad lze uvést práci z univerzity Wenzhou, kde se pokoušeli dosáhnout vysokého CRI pomocí dvou monokrystalů sesátých dohromady, nebo článek z časopisu *Ceramics International*, který se věnuje vlivu tloušťky keramického YAG:Ce fosforu na emisi světla. [1, 2]

Metodika

Existují dva velké směry, kterým se současný vývoj LED osvětlení věnuje. Zlepšení věrnosti podání barev, což přímo určuje hodnota CRI, a zvýšení výkonu pro výkonnější osvětlení. WLED jsou ve valné většině založeny na In-Ga-N polovodičové modré diodě, která je spojena s konvertujícím fosforem (nejběžněji YAG:Ce), ve kterém dochází k down-konverzi z modrého světla na žluté. Žluté světlo z fosforu a modré světlo, které částečně fosforem projde

(v krystalu nedojde k úplné absorpci) se dohromady smíchají za vzniku bílého světla.

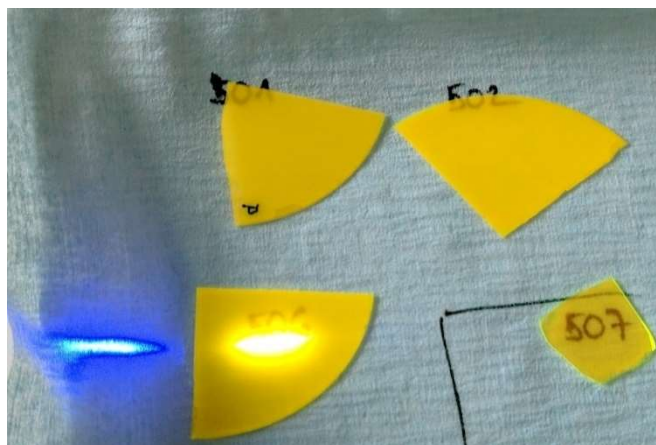
Bílé světlo je definováno na základě vyzařování černého tělesa. Pokud je dané světlo dostatečně blízko křivky vyzařování černého tělesa, tak se definuje pomocí barevné teploty (CCT). Barevná teplota světla WLED se pohybuje od hodnot 2700 K pro velmi teplou bílou až po 7000 K pro velmi studenou bílou. Určujícím faktorem pro věrné podání barev je CRI Ra, které je průměrem ze 14 podsložek. CRI Ra nabývá hodnot od 0 do 100, kde 100 odpovídá stejnému podání barev, jako kdyby byl předmět osvětlen černým tělesem se stejnou barevnou teplotou (tedy např. slunečním zářením či žárovkou).

U standardních WLED se vyskytuje zásadní problém kterým je nedostatek červené složky spektra, což způsobuje špatné podání červené barvy – parametr R9. Proto je nutné u WLED s vysokým CRI kombinovat světlo-konvertující fosfory minimálně dva, a to jeden žlutý (standardně používaný YAG:Ce) a jeden červeně emitující fosfor, který dodá chybějící červenou část spektra.

V našem případě byla zvolena kombinace monokrystalického YAG:Ce a práškového červeného nitridového fosforu zalitého v silikonu, který byl na broušený YAG:Ce nanesen pomocí spincoatingu. U našeho měření bylo využito integrační koule ISP80, modré excitační LED diody Cree s maximem emise na 450 nm a CCD spektrometru Avaspec-2048L od firmy Avantes. Za využití set-upu skládajícího se z výše uvedených komponent byly měřeny CIE souřadnice, včetně barevné teploty a hodnoty CRI. [3]

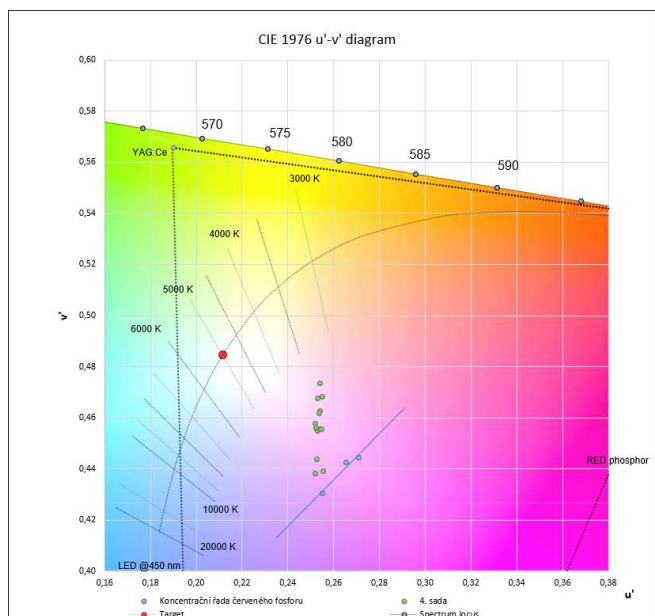
Výsledky a diskuze

Nejprve bylo nutné zvolit správnou kombinaci žlutého a červeného světlo-konvertujícího fosforu. Zvolen byl žlutě konvertující YAG dopovaný cerem ve formě tenkého broušeného monokrystalického waferu v kombinaci s práškovým červeně konvertujícím fosforem, který se nanášel rozmíchaný v silikonu na YAGový wafer pomocí spincoatingu.



Obrázek 1: Vzorek z 5. sady excitovaným modrým 450 nm laserem

V grafu níže je vidět výřez z CIE 1976 u' - v' diagramu. V grafu je vidět koncentrační řada červeného fosforu složená z různě koncentrované vrstvy červeného fosforu a žlutého krystalu (YAG:Ce). Uvedená koncentrační řada je v rozsahu od 466 mg/ml do 600 mg/ml prášku v silikonu.



Graf 1: Výřez z CIE diagramu s naměřenými hodnotami

Po vytvoření této závislosti byla vybrána nejnižší koncentrace červeného fosforu a tato vrstva byla

nanesena na několik waferů o různých tloušťkách a koncentracích ceru. Tloušťky testovaných waferů se pohybovaly v rozmezí 200–300 μm . Koncentrace ceru v použitých krystalech se pohybovaly v rozmezí 0,1 až 0,3 %. Očekávaným trendem měla být lineární závislost od výchozího bodu koncentrační řady směrem k barevné koordinátě čistého YAG:Ce, nicméně jak je vidět, tak závislost má podobný sklon jako spojnice barevných koordinát modré LED a YAGu bez dopantu. Proto bude nutné v dalších testech upravit koncentraci červeného fosforu tak, aby se výsledné barevné koordináty posunuly v x-ové souřadnici u' .

Závěr

Do této chvíle bylo provedeno několik testů s monokrystalickými wafery a různými silikony ve směsi s červeným fosforem. Dále byly provedeny testy kombinací různě koncentrovaných červených vrstev s monokrystalickými YAG:Ce wafery o různých vlastnostech (tloušťka, koncentrace dopantu v krystalu, drsnost povrchu). Emise současných vzorků je příliš posunutá do červené oblasti a nikoliv bílá. Nicméně je očekáváno, že v další sérii testů se již dostaneme na požadovanou bílou barvu a budeme schopni zjistit, zdali hodnota CRI splňuje parametry vysokého CRI $R_a > 80$.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svým kolegům z firmy Crytur spol. s r.o. za pomoc při realizaci tohoto projektu. Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2019.

Reference

- [1] XU, T., YUAN, L., CHEN, Y., ZHAO, Y., DING, L., LIU, J., LIANG, X. (2019). *Y3Al5O12:Ce3+ single crystal and red-emitting Y3Al5O12:Cr3+ single crystal for high power W-LEDs*. *Optical Materials*, 91, 30–34. doi:10.1016/j.optmat.2019.03.010
- [2] HU, S., LU, C., ZHOU, G., LIU, X., QIN, X., LIU, G., XU, Z. (2016). *Transparent YAG:Ce ceramics for WLEDs with high CRI: Ce 3+ concentration and sample thickness effects*. *Ceramics International*, 42(6), 6935–6941. doi:10.1016/j.ceramint.2016.01.079
- [3] LESHORN, Günther a Richard YOUNG. *Handbook of LED and SSL Metrology*. Berlin, 2017. ISBN 978-3-86460-643-4.