

Laserem excitované luminofory

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

Cílem této práce je charakterizace a optimalizace parametrů monokrystalických a polykystalických luminoforů z hlediska světelných parametrů. Součástí práce je navržení a sestavení měřicí sestavy pro charakterizaci světelných a výkonových charakteristik. V průběhu práce byly měřeny světelné vlastnosti yttrito a lutecito hlinitých granátů dopovaných ionty Ce^{3+} v závislosti na vybraných sedmi parametrech, jež byly zkoumány. Mezi zkoumané parametry patří např. tloušťka, typ materiálu či absorpční koeficient.

Klíčová slova: Luminofor, vysokovýkonné osvětlení, světelná účinnost, monokrystal

Úvod

Objev modré InGaN LED, který se povedl japonsko-americkému vědci Shuji Nakamurovi nastartoval éru osvětlení pomocí bílých LED, jež využívají kombinace modré LED a světlo-konvertujícího luminoforu. Bílé osvětlení se stalo každodenní záležitostí v osvětlovacím průmyslu. S vývojem LED průmyslu docházelo také k čím dál tím větší miniaturizaci a zvyšování proudových hustot uvnitř polovodičů. Tento fakt vedl k tomu, že bílé LED začaly narážet na svoje fyzikální limity a začala se hledat alternativa či nástupce. Jeví se, že by tímto nástupcem mohl být právě laserem buzený luminofor, který by umožňoval další miniaturizaci a zvyšování výkonu, které žádají vysokovýkonné aplikace.

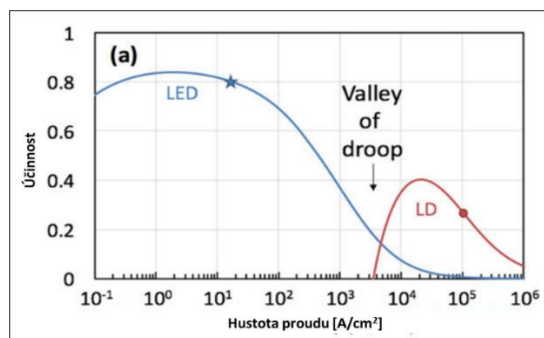
Metodika

Modré LED mají jedno známé a důležité omezení – pokles účinnosti, který není teplotně závislý tzv. efficiency droop. Tento pokles účinnosti je jev, který odkazuje na pokles EQE – externí kvantové účinnosti (případně IQE – interní kvantové účinnosti) při stoupající proudové hustotě a je závislý na vlastním materiálu diod, jeho čistotě a koncentraci defektů. V současné době nastává pokles účinnosti při hustotách proudu v rozmezí mezi 10^1 – 10^2 A/cm^2 .

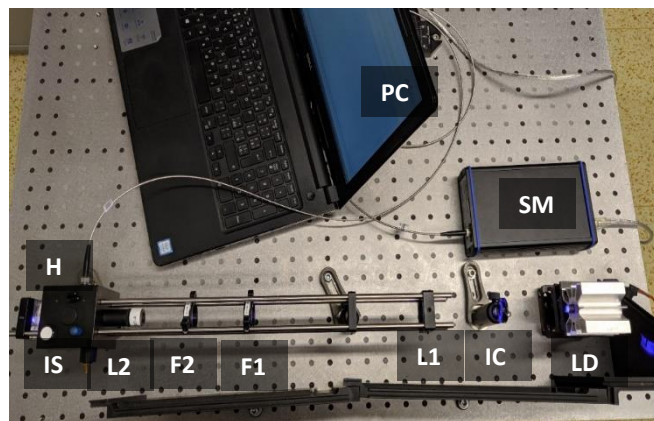
Na obrázku 1 je vidět, že proudové hustoty LED zasahují napříč několika řády a postupně, se zvyšující se proudovou hustotou, ztrácí na účinnosti. Oproti tomu proudová hustota LD začíná až u vyšších řádů, kde účinnost LD výrazně převyšuje účinnost LED, a dělá je z tohoto důvodu atraktivním řešením pro vysokovýkonné aplikace. [1-2]

Bílého světla lze dosáhnout kombinací modré laserové diody a příslušného luminoforu. Zde existuje velká řada parametrů, které ovlivňují výsledné

vlastnosti bílého světla, jako je například tloušťka, absorpční koeficient, chemické složení či úprava povrchu. Těmto parametrům je věnována praktická část této práce.



Obrázek 1: Valley of droop



Obrázek 2: sestavená měřicí soustava

Na rozdíl od LED má LD výrazně užší distribuci emitovaného světla. To je vidět při porovnání typických spekter bílého světla, které je tvořeno luminoforem a modrou LED nebo modrou LD. Od tvaru těchto spekter je pak odvozováno barevné podání zdrojů světla.

Na obrázku 2 je vidět sestavená měřicí soustava pro vyhodnocování spektroskopických veličin. Zprava je laserová dioda LD Osram PLPT9 450D_E A01 se zabudovanou soustavou čoček, irisová clona IC, a kolimační čočka L1. Následně svazek prochází dvěma



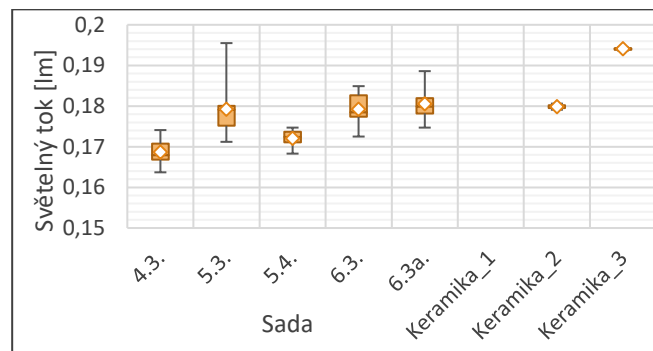
ND filtry (ND 1,0 a ND 1,3) $F1$ a $F2$ pro snížení celkové dopadající intenzity. Po zeslabení intenzity paprsek vstupuje do tubusu s fokusační čočkou $L2$ a následně prochází 2" integrační koulí Thorlabs IS236A-4 IS a dopadá na vzorek H , který je skloněn pod 8° . Na vzorku dochází ke generaci žlutého světla a skládání s modrým do výsledného bílého. Většina světla vstupuje do integrační koule, kde dochází k promíchání světla a odvedení optickým vláknem do spektroskopu AvaSpec-ULS2048L StarLine SM. Na závěr dochází ke zpracování v PC v softwaru AvaSoft.

Výsledky a diskuze

Celkový světelný tok je závislý na několika parametrech. Pokud vezmeme v úvahu, že ostatní parametry jsou u tohoto porovnání konstantní (chladič, úprava povrchu, tloušťka), pak jako proměnné zůstávají excitační a emisní píky materiálu. Překryv emisního píku (čáry) B-LD určuje kolik (a jak rychle) modrého světla se konvertuje na žluté (zelené) a emisní pík určuje energetickou distribuci konvertovaného světla, a tudíž snímanou intenzitu světla integrační koulí, jenž se přepočítá na světelný tok. Na základě těchto spekter lze usoudit, že podle vzdálenosti excitačního a emisního píku dojde ke ztrátě energie fotonu kvůli Stokesovu posuvu, a to tím víc, čím jsou od sebe tyto píky vzdáleny. Rozdíl energií těchto fotonů se transformuje na teplo. Tento fakt je vidět i na vyhodnocených datech LuAG:Ce^{3+} (5.3. a 5.4.), který má emisní pík nejbližší modrému excitačnímu píku a má vyšší světelný tok než druhé dva materiály. Při porovnání materiálů YAG:Ce^{3+} (4.3.) a GdYAG:Ce^{3+} (6.3.) je vidět, že z experimentálních dat dopadl lépe GdYAG:Ce^{3+} , protože jeho světelný tok je velmi blízko hodnotě u LuAG:Ce^{3+} (5.4.), zatímco ztráta YAG:Ce^{3+} vůči LuAG:Ce^{3+} (5.3.) je 1,9 %. Tento jev je v rozporu s předpokladem, protože přidáním gadolinia se emisní pík posouvá směrem do červené oblasti spektra a měl by tak mít vyšší tepelné ztráty. Vysvětlení zvýšeného světelného toku spočívá v tom, že vzorky z GdYAG:Ce^{3+} mají tloušťku $245\text{ }\mu\text{m}$ (důvodem je ruční broušení těchto vzorků) nikoliv $250\text{ }\mu\text{m}$ jako vzorky z LuAG:Ce^{3+} a navíc mají výrazně vyšší A.K. (62 vs 50), který způsobuje větší absorpci modrého světla (dáno omezeným výběrem pěstovaných krystalů).

U materiálu GdYAG:Ce^{3+} došlo i k porovnání vzorků, které byly celé ve šlíře (sada 6.3a) a celé mimo šlíru (sada 6.3). U vzorků, které byly ze šlíry došlo k zvýšení emise žlutého světla a zároveň snížení modrého světla,

což odpovídá faktu, že uvnitř šlíry se při růstu monokrystalu koncentruje množství dopantu (iontů Ce^{3+}), což by mělo vést právě ke zvýšení žluté složky světla. Rozdíl celkového světelného toku je ale mezi vzorky uvnitř a vně šlíry pouze pod 1 %, trochu větší změny ale dosahují výsledné hodnoty CIE souřadnic.



Graf 1: Porovnání světelného toku sad vzorků

Závěr

Postupnou analýzou výsledků bylo zjištěno, že vzorky, které mají texturovaný povrch, vykazují vyšší hodnoty světelného toku než broušené vzorky, a to přibližně o 4 %. Dále bylo zjištěno, že vzorky s nižší tloušťkou opět dosahují vyššího světelného toku daného nižšími ztrátami světla z bočních stěn luminoforů. Při porovnání materiálů mezi sebou bylo potvrzeno, že nejvyšších hodnot dosahuje LuAG:Ce^{3+} , jehož světelná účinnost dosáhla v nejlepší konfiguraci hodnot 160 lm/W.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2020.

Reference

- [1] WIERER, Jonathan J., Jeffrey Y. TSAO a Dmitry S. SIZOV. Comparison between blue lasers and light-emitting diodes for future solid-state lighting: Comparison between blue lasers and light-emitting diodes. *Laser & Photonics Reviews*. 2013, 7(6), 963–993. ISSN 18638880. Dostupné z: doi:10.1002/lpor.201300048
- [2] KURITZKY, Leah Y., Andrew C. ESPENLAUB, Benjamin P. YONKEE, Christopher D. PYNN, Steven P. DENBAARS, Shuji NAKAMURA, Claude WEISBUCH a James S. SPECK. High wall-plug efficiency blue III-nitride LEDs designed for low current density operation. *Optics Express*. 2017, 25(24), 30696. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.25.030696
- [3] SMET, Philippe F., Anthony B. PARMENTIER a Dirk POELMAN. Selecting Conversion Phosphors for White Light-Emitting Diodes. *Journal of The Electrochemical Society*. 2011, 158(6), R37. ISSN 00134651. Dostupné z: doi:10.1149/1.3568524