

Světelné zdroje – světelné diody

Ing. Vladimír Dvořáček, S Lamp s. r. o. Panenské Břežany

Elektroluminiscenční dioda neboli světelná dioda, zkratka LED (z anglického Light Emitting Diode), je polovodičová součástka obsahující přechod PN, který emituje optické záření, je-li buzen průchodem elektrického proudu [1].

Světelné diody v posledním desetiletí zaznamenávají nesmírně dynamický rozvoj a všechny významné světelnotechnické firmy je mají ve svém výrobním programu. Přestože jejich princip byl objeven již ve 20. letech minulého století, první diody použitelné v praxi se objevily teprve v roce 1962. Od jejich uvedení na trh jsou však soustavně vyvíjeny nové základní materiály a zdokonalovány technologické procesy vedoucí k postupnému rozšíření sortimentu o další barvy vyzařovaného světla, ke zvýšení jejich účinnosti (obr. 1) a prodloužení života a stability světelných parametrů během svícení. Diody LED zaznamenávají podobně rychlé zlepšování svých vlastností a snižování ceny jako svého času mikroprocesory. Vzhledem ke zcela jinému principu generování světla a zcela odlišné technologii se LED, na rozdíl od ostatních světelných zdrojů, vyrábějí ve firmách produkujících polovodičové čipy. Hlavním limitujícím faktorem dosažení příznivého poměru světlo a cena je v současné době cena krystalu základního polovodiče. Další rozvoj této skupiny světelných zdrojů závisí na výši investic do rozvoje polovodičové techniky. Teoretické možnosti zvyšování účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou (charakterizované hodnotami přibližně 60 lm/W u modrých diod, více než 200 lm/W u bílých diod, asi 260 lm/W u červených, více než 500 lm/W u žlutých a téměř 590 lm/W u zelených diod) předurčují světelné diody k obsazení velmi významného místa mezi základními skupinami světelných zdrojů.

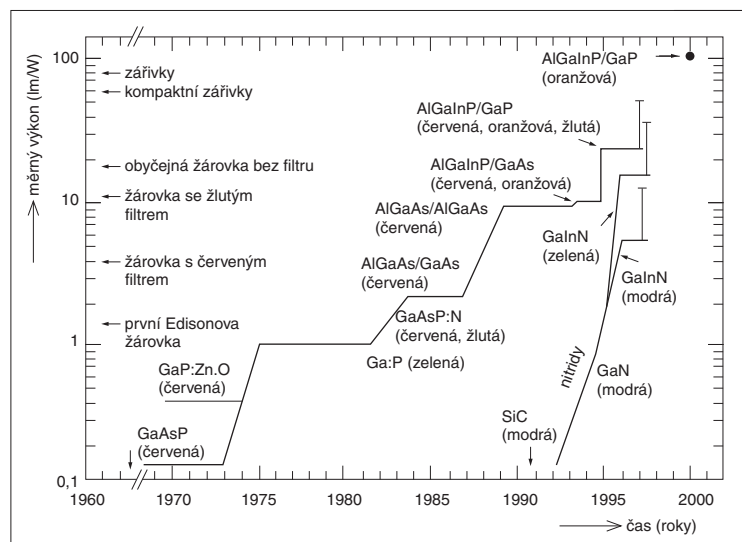
Poznámka: O důležitosti této skupiny světelných zdrojů svědčí např. skutečnost, že v Japonsku je vývoj bílých LED zahrnut do vládního programu zaměřeného na snižování emisí skleníkových plynů, včetně CO₂, k němuž se japonská vláda zavázala v Kjótském protokolu v roce 1998. Cílem je dosáhnout měrného výkonu LED přibližně 120 lm/W již v nejbližší budoucnosti, přičemž do roku 2025 je plánováno dosáhnout hodnoty až 200 lm/W. Rovněž Kongres USA schválil významnou spolupráci státu na finančně

velmi náročných investičních akcích zaměřených na zavedení světelných diod v komplexním osvětlení mnoha amerických velkoměst. Obdobné programy probíhají i v dalších zemích (např. Čína, Tchaj-wan a Korea).

Konstrukce světelné diody je naznačena na obr. 2. Pro vytvoření polovodičových přechodů PN se používají zejména polovodiče typu A^{III}B^V vysoké čistoty, legované malým množstvím vhodných příměsí, které vytvářejí buď přebytek elektronů (materiál typu N), nebo jejich nedostatek, a tedy přebytek děr (materiály typu

serových diod činí tento interval dokonce pouze několik jednotek nanometrů). Doplnění sortimentu o modrou barvu umožnilo vyvinout i diody barvy bílé, zářící v celé viditelné oblasti spektra. Tím se významně rozšířila oblast jejich použití, včetně všeobecného osvětlení. Kromě uvedených typů LED se vyrábějí rovněž diody zářící v ultrafialové anebo infračervené oblasti spektra.

Moderní polovodičové materiály používané v současné době hlavními výrobci se skládají z velmi složitých kombinací epitaxně vypěstovaných vrstev. Nové materiály na bázi fosfidů india, galia a hliní-



Obr. 1. Zvyšování měrného výkonu barevných LED v průběhu posledních desetiletí

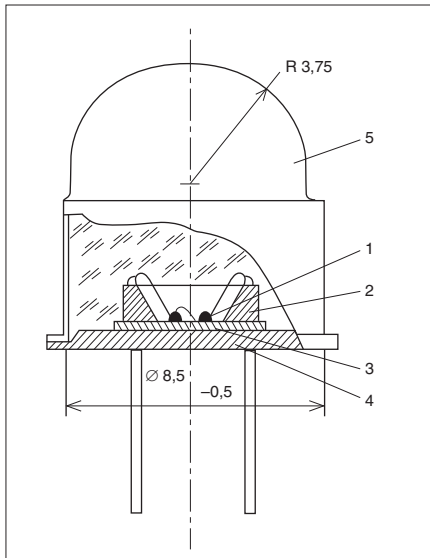
P). V místě, kde se stýkají polovodiče obou typů, vzniká tzv. přechod PN. Přiložením stejnosměrného napětí správné polaritě na tento přechod dojde ke vzájemnému přibližování elektronů a děr k místu kontaktu a k jejich rekombinaci. Při rekombinaci každého páru elektron-děra se uvolní určité kvantum energie, které se může vyžářit mimo krystal. Elektrická energie se tak mění přímo na světlo určité barvy. U diod LED jde o nekoherentní světlo, na rozdíl od laserových diod, kde nastává stimulovaná emise optického záření, využívaná k zesilování světla.

První diody vyzařovaly světlo červené barvy, po nich se objevily diody se zelenou, oranžovou, žlutou a nakonec modrou barvou. Všechny tyto typy se vyznačují velmi úzkou křivkou spektrálního složení zahrnující interval vlnových délek do několika desítek nanometrů (u la-

ku (InP, GaP, AlP), dokonalejší a velmi náročné technologické postupy zajišťující vysokou čistotu výsledného produktu, zvýšily účinnost LED, zlepšily jejich odolnost proti působení vyšší teploty a vlhkosti. Dále umožnily zvýšit flexibilitu výrobního procesu, takže žluté, červené a oranžové LED lze vyrábět stejnou technologií a výslednou barvu řídit pouze úpravou velikosti zakázaného pásu. Typická spektra vybraných barevných LED jsou uvedena na obr. 3.

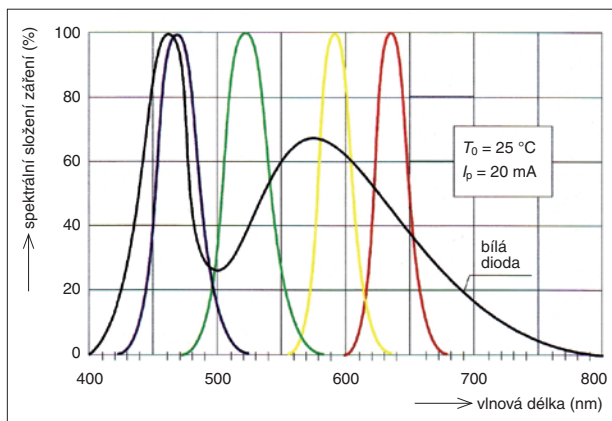
Z principu funkce světelné diody však nelze získat bílé světlo. Teprve doplnění sortimentu o modré LED na bázi nitridu galia a india (InGaN), s podstatně odlišnou výrobní technologií, umožnilo nakonec vyvinout i diody se světlem bílé barvy. Bílé světlo LED lze získat dvěma způsoby. První spočívá v klasickém přímém míšení světla červené, zelené a modré LED,

kde je však zapotřebí využívat náročný hardware a software. Výsledný jas je nižší a v důsledku nerovnoměrné degradace jednotlivých druhů čipů může v průběhu života docházet k nežádoucím posunům barvy vyzařovaného světla. Druhý způsob



Obr. 2. Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly
1 – polovodič s přechodem PN, 2 – reflektor,
3 – keramická destička odvádějící teplo,
4 – podložka, 5 – polokulová čočka

využívá fosforescenci luminoforů. Vhodným luminoforem je yttrio-hliníkový granát aktivovaný cerem ($Y_3Al_5O_{12}:Ce$), který je buzen světlem modré diody InGaN (výsledné spektrum je na obr. 4), anebo třípásmový luminofor buzený zářením ultrafialové diody (obr. 5). Tento způsob je obdobný principu vzniku světla v klasických zářivkách. Spektrum na obr. 4 ve viditelné oblasti obsahuje přímé světlo modré LED



Obr. 3. Emisní spektrum vybraných barevných LED

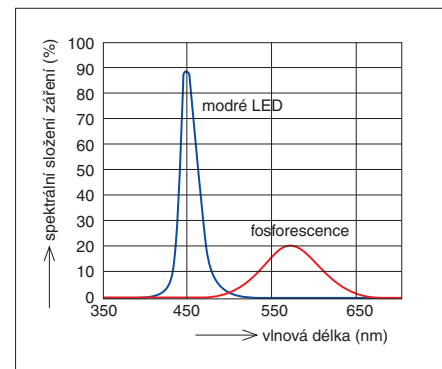
i spojitě spektrum použitého luminoforu. Tato varianta je energeticky úspornější a v porovnání s LED se třemi čipy i rozměrově menší, avšak ve výsledném modro-žlutém spektru je potlačena zelená a červená složka, což se projevuje horším podáním barev osvětlovaných předmětů. U diod s třípásmovým luminoforem se UV záření vlastní diody ve spektru neprojevuje a výsledný index podání barev R_a dosahuje hodnot nad 80. Bílé LED se vyrábějí ve velmi širokém rozsahu náhradní teploty chromatičnosti – od 2 500 do 4 000 K u teplých odstínů a 5 000 až 8 000 K u chladnějších odstínů. Výrobci nabízejí LED odstupňova-

né po 1 000 K. Další informace lze nalézt např. v [2] a [3].

Vlastní světelný zdroj – polovodičový čip, má velmi malé rozměry. První LED měly čip o ploše $0,05 \text{ mm}^2$, postupem doby se plocha čipu zvětšovala na jednotky milimetrů čtverečných. Také proud (resp. příkon) byl velmi malý (jednotky miliampérů, příkon desetin wattů, světelný tok v řádu jednotek lumenů). Během dalšího vývoje bylo možné zvětšit proud na desítky miliampérů, přičemž světelný tok postupně narůstal na jednotky až desítky lumenů. V poslední době se průmyslově vyrábějí diody již s proudem řádově několika set miliampérů o příkonu do 5 W, takže při současných hodnotách měrného výkonu až 100 lm/W dosahuje světelný tok diod předních výrobců již několika set lumenů. Z pohledu uživatele lze dosud vyráběný sortiment orientačně rozdělit do tří skupin: diody o malém výkonu s proudem 1 až 2 mA, standardní diody s proudem větším než 20 mA a výkonné (speciální – v odborné literatuře označované jako high power) s proudem větším než 350 mA. Světlo vydávané čipem je třeba usměrnit pomocí vhodných optických prvků a krytu z epoxidové pryskyřice, jehož barva je zpravidla shodná s barvou vyzařovaného světla. Kryt se používá již při výrobním pro-

na oblast použití nejdůležitějším parametrem jas, postupem času nabývá stále většího významu celkový světelný tok a měrný výkon.

K napájení LED se používají měniče s výstupním napětím přizpůsobeným použité kombinaci a jejich počtu. Jsou to vlastně zdroje konstantního proudu, který zajišťuje i jejich optimální pracovní teplotu (mezní teploty se pohybují mezi 85 a 100 °C). Jejich překročení má velmi negativní vliv na život diody i na rychlost poklesu jejího světelného toku (obr. 7) [4]. Tuto skutečnost je nutné vzít v úvahu jak při konstrukci a vý-



Obr. 4. Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody)

robě vlastní diody, tak při jejím použití v konkrétních podmínkách provozu. Použití jednotlivých LED je v současné době poměrně omezené, v praxi se nejčastěji sestavují do větších celků, nabízejících nepřehledné množství nejrůznějších způsobů použití.

Hlavní přednosti LED

a) Geometrické parametry:

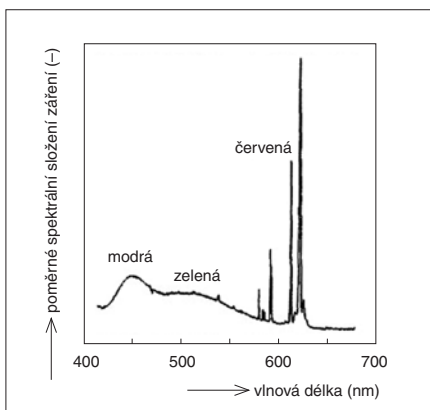
- umožňují konstruktérům vytvářet velké množství světelných přístrojů a svítidel nejrůznějších tvarů, výkonů a rozměrů;
- malé rozměry dovolují navrhovat světelné přístroje s vysoce koncentrovaným svazkem světelné (resp. zářivé) energie. To je výhodné např. v oblasti přenosu informací.

b) Elektrické a světelné parametry:

- malé napájecí napětí nevyžaduje ochranu před nebezpečným dotykem;
- lze je spojovat do série, a tím dosáhnout vyšších hodnot světelného toku;
- stejnosměrný provoz umožňuje snadnou regulaci pomocí stávajících prostředků řízení a ovládání osvětlení;
- lze modulovat záření napájecím napětím, minimální doba náběhu (kratší než u žárovek) a rychlá odezva (nanosekundy). Mohou pracovat v impulzním režimu bez negativního vlivu

na život a spolehlivost. Lze je snadno zapínat a vypínat;

- plná stmívatelnost bez změny barvy, stmívací moduly jsou kompatibilní s nyní používanými standardními systémy pro žárovky, zářivky nebo halogenové žárovky;
- lze je napájet solárními články;
- lze jimi zajistit energeticky úsporné osvětlení;
- lze vytvářet osvětlovací soustavy s dynamickým řízením intenzity a barvy světla;
- mohou svítit v libovolné poloze;
- mají vysoký jas;
- barevné LED mají velkou účinnost, protože k dosažení požadované barvy se nepoužívají filtry způsobující u jiných světelných zdrojů nežádoucí ztráty;
- teoretické možnosti dalšího zvyšování měrného výkonu nejsou ani zdaleka vyčerpány. Již v současné době reálně dosažované hodnoty 50 lm/W a špičkové hodnoty 100 lm/W budou jistě překonány. V odborné literatuře se hovoří o reálném cíli až 200 lm/W v roce 2025.



Obr. 5. Emisní spektrum bílé LED (třípásmový luminofor buzený zářením UV diody)

c) Kolorimetrické parametry:

- lze získat velký počet barev – červenou, oranžovou, žlutou, zelenou, zeleno-modrou, modrou a fialovou. Většina těchto barev (v těch případech, kdy pro dosažení výsledné barvy světla nejsou použity luminofory) se vyznačuje vysokou čistotou, jsou téměř monochromatické, což je důležité z hlediska jejich nezaměnitelnosti, zejména v signálních zařízeních. Současně lze jejich kombinací získat teoreticky nekonečný počet barevných odstínů a hodnot jasu v soustavách s dynamickým řízením osvětlení;
- lze vyrobit LED bílé barvy s velmi dobrou účinností, vysokým R_a a v potřebné stupnici teplot chromatičnosti;
- je možné vyrobit LED zářící v ultrafialové a infračervené oblasti.

d) Provozní parametry:

- jsou vysoce spolehlivé;
- mají extrémně dlouhý život. Údaje jednotlivých výrobců se pohybují mezi 60 až 100 tisíci hodinami, při úbytku světelného toku 30 až 40 %. Tato hodnota však do značné míry závisí na okolních – zejména teplotních – podmínkách;
- náklady na údržbu a výměnu vadných zdrojů jsou nižší;
- interval teploty okolního prostředí je široký, uváděný mezi -30 a $+60$ °C,
- povrchové teploty jsou nízké a absence UV a IR záření (kromě diod speciálně vyvinutých pro tyto oblasti spektra) umožňuje pro konstrukci přístrojů s LED používat plasty;
- konstrukce je mechanicky odolná, snášející bez vážnějších následků otřesy a vibrace;
- při sestavování osvětlovacího přístroje ze světelných diod není zapotřebí používat další optické prvky na usměrnění světelného toku v požadovaném směru.

e) Vlastnosti z hlediska životního prostředí:

- neobsahují zdraví škodlivou rtuť;
- nemají negativní vliv na životní prostředí ani během provozu, ani po ukončení jejich života, značná část používaných materiálů je recyklovatelná.

K nevýhodám světelných diod zatím patří především vysoká cena a významná závislost jejich hlavních parametrů na teplotě okolí.

Uvedené výhody LED mají za následek stále se rozšiřující oblast jejich použití a již dnes lze konstatovat, že mnoho druhů světelných zdrojů (žárovky na malé napětí, celoskleněné žárovky, doutnavky, část sortimentu běžných a halogenových žárovek, svítících trubíc i kompaktních zářivek), zejména v nových světelných přístrojích a zařízeních, nahradily nebo v nejbližší budoucnosti nahradí úplně. LED se uplatňují i tam, kde ještě dříve bylo jejich použití nepředstavitelné (např. uliční osvětlení za využití standardních stožárů).

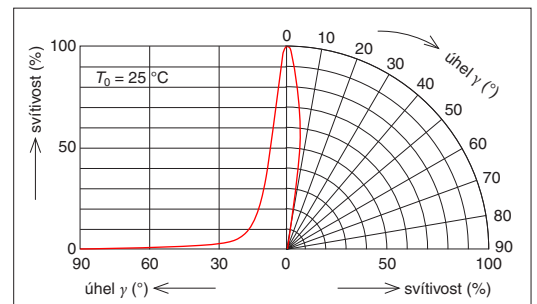
Hlavní oblasti použití

a) Signalizace:

- nahrazují trpasličí žárovky ve vypínačích a kontrolních svítílnách indikujících stav elektrického zařízení, jejichž účinnost zejména u žárovek s barevnými baňkami nebo s barevnými filtry je desetkrát až patnáctkrát menší. Rozměrově a konstrukčně se přizpůsobují trpasličím žárovkám (LED v provedení s patičkami Ba9s, E10, Ba15,

E14), celoskleněným žárovkám (patice W2×4,6, W2,1×9,5d) nebo telefonním žárovkám (patice T5,5×30, T5,5×22, T6,8×40);

- jsou vhodné pro dopravní značky v silniční, železniční a říční dopravě, semaforech;
- používají se pro palubní desky automobilů i další komponenty osvětlení automobilů, včetně vnějšího osvětlení (v současných moderních automobilech jsou použity již desítky až stovky světelných diod);
- obsahují je ukazatele v interiérech i exteriérech, prvky k vyznačení únikových cest v budovách.



Obr. 6. Příklad rozložení svítivosti LED v pravoúhlých a polárních souřadnicích

b) Venkovní osvětlení:

- osvětlovací soustavy umístěné nízko nad vozovkou významně spoří elektrickou energii a omezují rušivé světlo;
- jsou vhodné pro zřetelné vyznačení okraje vozovky, barevné označení různých jízdních pruhů, barevné vyznačení cyklistických stezek a chodníků, pro dynamické řízení a operativní změny jízdních pruhů podle intenzity provozu na silnici s využitím svítidel zapuštěných do povrchu silnice. Usnadňuje se tak orientace účastníků provozu, snadněji lze předvídat kritické situace. Zvyšuje se tím bezpečnost silničního provozu;
- jsou vhodné pro tzv. madlové osvětlení mostů;
- mohou osvětlovat pěší zóny v architektonicky náročném prostředí;
- jsou součástí osvětlovacích soustav v tunelech;
- vybavují se jimi osvětlovací soustavy se svítidly (obsahujícími i několik set LED) instalovanými na stožárech, jejichž výška a rozteč jsou obdobné jako u konvenčních soustav uličního osvětlení;
- architekturní osvětlení budov i jiných objektů.

c) Osvětlení vnitřních prostorů:

- veřejné budovy, restaurace, prodejní místa,
- místní pracovní osvětlení,

- osvětlení exponátů v muzeích, na výstavách a v galeriích, zvýraznění určitých objektů.

d) Zobrazovací technika a reklamní osvětlení:

- soustavy dynamického řízení počítačem s možností široké změny barev a jasu, vytváření běžících řádků a vln, plnohodnotná náhrada svítících trubíc,
- velkoplošné obrazovky se speciálním uspořádáním velkého počtu modrých, zelených a červených LED, s kvalitním, vysoce kontrastním a ostrým obrazem i za denního světla a slunečního počasí s krátkou minimální pozorovací vzdáleností (již od 7 m) a extrémně dobrým rozlišením při běžných pozorovacích vzdálenostech až do několika set metrů; hodnoty jasu dosahují 5 000 až 8 000 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ s perspektivou jejich dalšího růstu.

e) Zdravotnictví:

- terapie kožních a vnitřních nemocí,
- dezinfekce vzduchu pomocí UV záření,
- vytváření hmot používaných v zubarské technice.

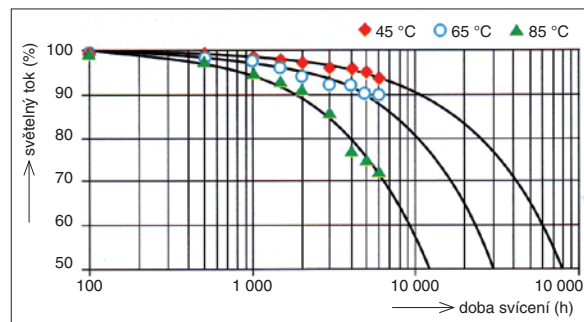
f) Další příklady:

- dálkové ovládání bytového a průmyslového zařízení,
- čtení čárových kódů,
- optické myši u počítačů,
- prosvětlování klávesnic a displejů, např. v mobilních telefonech,
- kontrola bankovek UV zářením,
- důlní svítily,
- kapesní a akumulátorové svítily,
- přístroje nočního vidění s diodami zářícími v infračervené oblasti spektra,
- dezinfekce s diodami zářícími v ultrafialové oblasti spektra,
- vytváření epoxidových pryskyřic,
- hračky,
- světelný zdroj ve vláknové optice.

Uvedený přehled oblastí použití LED není ani zdaleka úplný. Jsou vybrány pouze namátkově pro ilustraci této bouřlivě se rozvíjející skupiny světelných zdrojů. V odborné literatuře se objevují takřka denně zcela nové způsoby využití LED, kde nahrazují konvenční

zdroje. Konstrukteři svítidel a světelných přístrojů tak velmi operativně reagují na novinky, které se objevují ve výzkumných laboratořích předních světových výrobců.

Poznámka: Významné rozdíly v konstrukci běžných světelných zdrojů a LED vyvolávají nutnost respektovat jejich malé rozměry, spektrální složení světla (záření) a prostorové rozložení svítivosti i při



Obr. 7. Závislost parametru LED na teplotě okolí

měření, kdy cílem je zajistit jeho přesnost a potřebnou reprodukovatelnost. Tato problematika je předmětem Publikace CIE [5] stanovující přesné podmínky měření (přijímač s kruhovou vstupní štěrbinou o ploše 100 mm^2 , osa LED musí procházet středem štěrbiny, měří se ve vzdálenosti 316 mm – podmínka A (odpovídá rovinnému úhlu 2°) a 100 mm – podmínka B (úhel 6,5°)). Takto lze porovnávat různé LED. Je třeba vzít v úvahu, že naměřené hodnoty nepředstavují maximální hodnotu svítivosti. Ta může být podstatně vyšší, je-li vyzařovaný svazek velmi úzký.

Měřit lze na fotometrické lavici s fotometrickou hlavicí. Pro cejchování se používá etalon svítivosti LED s podobným spektrálním a prostorovým rozložením svítivosti. Lze rovněž použít cejchovaný fotometr s luxmetrem. Pro dokonalější charakterizaci světelného svazku je však zapotřebí znát maximální svítivost a prostorové rozložení svítivosti. K tomuto účelu byl vyvinut speciální malý goniofotometr, který na rozdíl od konvenčních goniofotometrů taková měření umožňuje. Z rozložení svítivosti lze následně vypočítat světelný tok. Problematikou mě-

ření a hodnocení světelných diod se zabývají rovněž další publikace CIE [6] a [7].

Závěr

Vedle zde popsaných světelných diod, jejichž základní stavební jednotka je tvořena anorganickými materiály, se objevují další propracované typy LED, především organické LED (OLED aj.), které obsahují mnoho amorfních nekrytalických materiálů, umožňujících na rozdíl od bodového zdroje vytvořit co do plochy podstatně větší a rozměrnější světelné zdroje. Tyto světlo emitující soustavy jsou vytvořeny na bázi organických materiálů, mají však obdobný princip využití materiálů p- a n-typu, na jejichž rozhraní nastává rekombinace elektronů a děr, při které vzniká světlo. Přestože v současnosti dosahované hodnoty účinnosti OLED

jsou zatím zřetelně nižší než u běžných světelných diod, mnoho jejich dalších předností předurčuje dále rozšířit oblast použití tohoto moderního světelného zdroje.

Literatura:

- [1] ČSN IEC 50(845) *Mezinárodní elektrotechnický slovník, Kapitola 845: Osvětlení.*
- [2] BAER, R.: *Grundlagen Beleuchtungstechnik.* 3. Auflage. Huss-Medien GmbH, 10400 Berlin, 2006.
- [3] HEINZ, R.: *Grundlage der Lichterzeugung – von der Glühlampe bis zum Laser.* 2. Auflage. HIGHLIGHT Verlagsges. mbH, Rütten, 2006.
- [4] NARENDHAN, N. – GU, Y. – HOSSEIN-ZADEH, R.: *Estimating junction temperature of high-flux white LEDs in Lighting emitting diodes. Research, manufacturing and applications VII.* Proceedings of SPIE 5366, 2004.
- [5] Publikace CIE 127-1997 *Measurements of LEDs.*
- [6] Publikace CIE 177-2007 *Colour Rendering of White LEDs.*
- [7] Publikace CIE x026-2004 *Proceedings of the CIE Symposium '04 on LED Lighting Sources.* Physical Measurements and Visual and Photobiological Assessment, Tokyo, Japan 2004.

www.svetlo.info

nové webové stránky
s vylepšeným vyhledávačem
a možností stahovat články v PDF

