

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jan Valenta

Modrá je dobrá. Díl 2. Svítivé diody jako základ nové generace osvětlovací techniky

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 60 (2015), No. 2, 89–104

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/144402>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2015

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

# Modrá je dobrá

## Díl 2. Svítivé diody jako základ nové generace osvětlovací techniky

Jan Valenta, Praha

V prvním díle tohoto pojednání [12] jsme si pověděli o stoletém zkoumání elektroluminiscence, vývoji svítivých diod (LED) a dlouhém úsilí o výrobu účinné modré LED, které bylo roku 2014 odměněno Nobelovou cenou za fyziku pro tři japonské vědce: I. Akasakiho, H. Amana a Š. Nakamuru. Nyní nám zbývá osvětlit druhou část zdůvodnění udělení této ceny, které zní *za vynález účinných diod emitujících modré světlo, které umožnily vznik jasných a energeticky úsporných zdrojů bílého světla* [15]. Jak tedy souvisí modré LED a nové *energeticky úsporné zdroje bílého světla*?

### 1. Vnímání světla — objektivní popis subjektivního vjemu

Je všeobecně známo, že v lidském oku jsou dva typy „detektorů“ světla — *tyčinky* a *čípky*. Tyčinky odpovídají za *nebarevné* vidění za nízkých intenzit osvětlení, kdežto čípky umožňují barevný vjem díky tomu, že existují tři typy čípků citlivých buď na modré, zelené nebo červené světlo. Dále se budeme věnovat pouze barevnému vidění.

Aby bylo možné jednoznačně charakterizovat barevný vjem, dohodla se roku 1931 Mezinárodní komise pro osvětlování (Commission Internationale d’Eclairage — CIE) na definici *normálního pozorovatele CIE 1931*. To jsou vlastně tři spektra (obr. 1a), která popisují intenzitu vjemu v závislosti na vlnové délce světla pro všechny tři typy čípků. Když pak jakékoliv spektrum porovnáme s těmito charakteristikami, dostaneme relativní odezvu červeného, zeleného a modrého čípku, tedy tři čísla  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Tato čísla znormujeme tak, aby dohromady dala jedničku:  $x + y + z = 1$ . Každou barvu (tedy přesněji, odezvu oka na ní) nyní popisují tři čísla  $(x, y, z)$ , podobně jako tři souřadnice určují bod v prostoru, proto se jím říká *trichromatické souřadnice*. Hezké na tomto systému je, že můžeme všechny barevné tóny (vjemy) vynést do *plochého* diagramu s osami  $x$ ,  $y$  (protože souřadnici  $z$  dopočítáme jako  $z = 1 - x - y$ ). Tento diagram se nazývá *kolorimetrický trojúhelník*, ale má spíše tvar podkovy. Okraj tvoří spektrálně čisté, monochromatické barvy<sup>1</sup> (obr. 1b). Dolní hrana je „přímka purpurů“ — purpurová (fialová) barva je vlastně kombinací vjemů na opačných pólech spektra (červené a modré), způsobená tím, že červený čípek má výběžek citlivosti u 440 nm (viz obr. 1a). Uprostřed na souřadnici  $(x, y, z) = (1/3, 1/3, 1/3)$  je dokonale vyvážené bílé, *achromatické* světlo. Můžeme zde také vynést zahnutou křivku popisující souřadnice emise dokonale černého tělesa o různých teplotách (viz např. [9]).

<sup>1</sup>Pozn. redakce: Barevný obrázek bude během roku 2016 dostupný na [www.dml.cz](http://www.dml.cz).

Dále si musíme blíže povšimnout spektra citlivosti „zelených“ čípků. Jeho průběh totiž určuje tzv. *světelnou účinnost záření*  $K(\lambda)$  (dříve zvanou *viditelnost*) v jednotkách lumen na watt [lm/W] a je tak vlastně spojnicí mezi subjektivními *fotometrickými* veličinami a energetickými, tedy *radiometrickými* veličinami. Zde je nutné zdůraznit, že volba trojice spekter CIE 1931 z obr. 1a není jednoznačná a z praktických důvodů byla provedena právě tak, aby spektrum pro zelenou barvu bylo totožné se světelnou účinností záření.

Světelné zdroje a jejich záření popisují *radiometrické (energetické) veličiny* (jednotky jsou zvedeny v hranatých závorkách): *zářivý tok* [W] — energie vyzářená ze světelného zdroje za 1 sekundu, *zářivost* [W/sr] — zářivý tok vyslaný zdrojem do jednotkového prostorového úhlu, *zář* (*radiance*) [W/(sr·m<sup>2</sup>)] — energie vyzářená z jednotkové plochy do jednotkového prostorového úhlu za jednotku času a *ozáření (ozářenost)* [W/m<sup>2</sup>] — zářivá energie dopadající na jednotkovou plochou za jednotku času. Odpovídající *fotometrické veličiny* (odrážející „subjektivní“ vjem člověka) jsou: *světelný tok* [lumen lm], *svítivost* světelného zdroje [candela cd = lm/sr], *jas* [nit nt = lm/(sr·m<sup>2</sup>)] a *osvětlení* [lux lx = lm/m<sup>2</sup>].

Pokud některou z uvedených veličin vyjadřujeme nikoli v integrální, ale *spektrální formě*, pak vlastně uvádíme „spektrální hustotu“, tedy množství dané veličiny na jednotkový interval vlnové délky, frekvence nebo jiné spektrální veličiny. Například *spektrální hustota ozáření* je nejčastěji uváděna v jednotkách W/(m<sup>2</sup>·nm) (jednotka je tedy W/m<sup>3</sup>, ale tento zápis autor nedoporučuje, protože to svádí ke klamnému dojmu, že se jedná o výkon z jednotkového objemu).

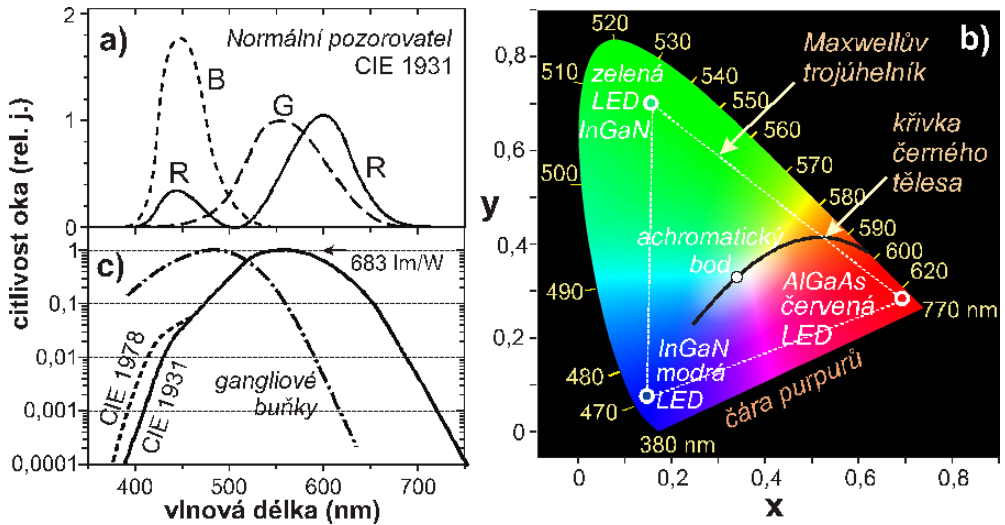
Z porovnání radiometrických a fotometrických jednotek vidíme, že lumen vystupuje v roli „světelného výkonu“. Proto stačí definovat převod mezi lumenem a wattem, tedy výše zmíněnou *světelnou účinnost záření*  $K$ , a můžeme převádět libovolnou radiometrickou veličinu  $Q_r$  na příslušnou fotometrickou  $Q_f$  pomocí vztahu

$$Q_f = \int Q_r(\lambda) \cdot K(\lambda) \cdot d\lambda.$$

Zde je evidentní, že musíme znát *spektrální průběh* příslušné radiometrické veličiny (např. *spektrální hustotu ozáření*). Integraci pak provádíme přes celou spektrální oblast citlivosti lidského oka, zhruba od 380 nm do 780 nm.

Světelná účinnost záření je základem definice *candely* [cd], jedné ze sedmi základních veličin soustavy SI. Definice z roku 1979, která nahradila předchozí definici (založenou na emisi z tepelného zářiče tvořeného roztavenou platinou) a pravděpodobně přežije i současnou revizi základních veličin, říká: *Svítivost 1 cd má světelný zdroj, který emituje monochromatické záření o frekvenci  $540 \times 10^{12}$  Hz a jehož zářivost v daném směru je 1/683 W/sr*. Je zajímavé, že tato veličina stále dobře odpovídá původním definicím „svíčky“ (latinsky *candela*), která byla odvozena od svítivosti „klasické“ svíčky. Výše uvedená definice *candely* je vlastně normovací podmínkou pro maximum *světelné účinnosti záření* na 555 nm, které nastavuje na 683 lm/W. Poznamenejme, že spektrální průběh „standardního pozorovatele CIE 1931“ byl později revidován na základě práce Judda a Vose, kteří navrhli upřesnění funkce  $K(\lambda)$  ve fialové oblasti spektra, kde byla citlivost lidského oka původně podceněna. Tato funkce je známa jako CIE 1978 a je znázorněna na obr. 1c [10].

Nedávné výzkumy ukazují, že v oku existují ještě další „detektory“ světla, které sice nevytváří obraz, ale „měří“ celkovou intenzitu světla [2]. Jsou to *gangliové (nervové)*



Obr. 1. (a) Spektra relativní citlivosti tří typů čípků lidského oka, která tvoří základ popisu barevných vjemů v soustavě CIE 1931. (b) Kolorimetrický diagram znázorňující všechny vnímatelné barvy v souřadnicích  $x$  (červená),  $y$  (zelená) a  $z = 1 - x - y$  (modrá); barvy reprodukovatelné RGB diodami jsou vymezeny tzv. Maxwellovým trojúhelníkem. Také je znázorněn bílý (achromatický) bod, kterým prochází křivka barev tepelného záření z dokonale černého tělesa — při zvyšování teploty se bude barva posouvat zprava doleva od červené, „teple“ bílé, vyvážené bílé až k „studené“ bílé. (c) Křivka  $G$  z panelu (a) je vynesena v log měřítku spolu s revizí CIE 1978 (koriguje UV hranu citlivosti) — tato funkce po znormování na 683 lm/W určuje světelnou účinnost záření. Čerchovanou čarou je vyznačen průběh citlivosti gangliových buněk obsahujících melanopsin (upraveno podle [10], [2]).

*buňky* umístěné v horní vrstvě sítnice oka nad tyčinkami a čípků. Asi 1 až 3% těchto buněk obsahují barvivo melanopsin a dávají signály pro nastavení našeho denního biorytmu, tzv. cirkadiánní rytmus. Na obr. 1c je vynesena spektrální průběh jejich citlivosti ukazující maximum pro modré světlo kolem 485 nm a velmi slabou citlivost v žluto-červené oblasti, proto se těmito buňkám také říká „detektory modré oblohy“. Z uvedených výzkumů plyne důležité doporučení, že v době minima bioaktivity, tedy v noci, bychom si měli svítit pouze slabým načervenalým světlem, aby případně nedošlo k narušení našeho cirkadiánního rytmu.

## 2. Získání bílého světla pomocí svítivých diod — diody všech barev spojte se

Z výše uvedeného popisu plyne, že vjem bílé barvy dostaneme vyváženým „podrážděním“ tří typů čípků. Pokud pro tento účel chceme použít LED, je logické vzít modrou, zelenou a červenou LED, které jsou spektrálně vyladěné na maximum citlivosti příslušných čípků, a spojit je v jeden celek. Tak dostaneme tzv. RGB LED (zkratka z anglických slov Red, Green, Blue, obr. 2a), které mohou nejen vytvářet jednu požadovanou barvu, ale za využití příslušných elektronických obvodů bude možné vyladit barvu dle libosti — to je možnost u dřívějších osvětlovacích zdrojů nevídaná (jedině bylo možné dávat před lampy různé barevné filtry). Množinu všech barev, které

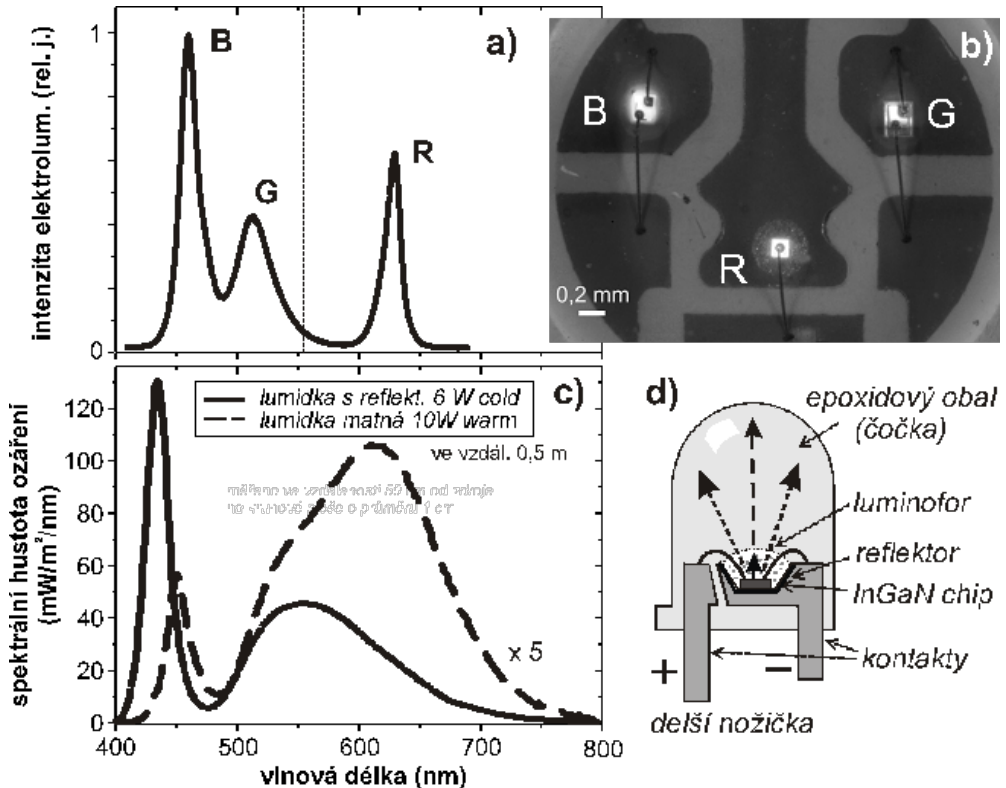
lze RGB systémem reprodukovat (v technickém popisu monitorů apod. se nazývá tato množina *gamut*), lze zobrazit v kolorimetrickém diagramu jako tzv. *Maxwellův trojúhelník*, jehož vrcholy jsou dány trichromatickými souřadnicemi tří použitých barev. Aby byl tento trojúhelník co největší, je žádoucí, aby vrcholy ležely co nejvíce na hraně a v rozích „podkovy“, aby tedy elementární barvy byly co nejvíce monochromatické. Oproti luminoforům či filtrům barevných (CRT, resp. LCD) obrazovek nebo chemickým barvivům mají LED tu výhodu, že jejich spektrum je poměrně úzké (typicky 20 nm, obr. 2a), tedy blízké monochromatickému, a tak je rozsah reprodukováných barev (*gamut*) skoro maximální možný.

Ovšem RGB LED jsou zbytečně drahé pro běžné použití, kdy třeba při osvětlení pracovního stolu nepotřebujeme barevné hrátky, ale konstantní bílé osvětlení. Naštěstí existuje druhá, více využívaná možnost získání LED diod s přibližně bílým spektrem. Je to kombinace modře svítící LED s vhodným *luminoforem* svítícím žlutě (studeně bílá LED) nebo kombinací luminoforů žlutých a červených (teple bílá LED). Modré světlo (nejčastěji kolem 470 nm) je částečně pohlceno luminoforem a vyzářeno na delších vlnových délkách a částečně prochází, takže výsledný vjem je kombinací spektra LED a luminoforu. Je to zcela stejný princip jako v zářivkách, kde ovšem primárním zdrojem je světlo výboje ve rtuťových parách. Nepřekvapuje, že takovouto bílou LED realizoval Šuji Nakamura v roce 1995, když už Nichia sériově vyráběla účinné modré LED a na skladě měla vhodné luminofory, na jejichž výrobu se tradičně specializovala. Schéma této bílé diody a její spektrum jsou na obr. 2c,d. Prášek luminoforu je obvykle „nasypán“ přímo na čip diody, i když se v poslední době objevují i zdroje, které mají luminofor zabudován dále od primárních diod — třeba až na vnějším obalu, jako u zářivky (obr. 4a). Žlutým luminoforem v bílých LED býval nejčastěji yttrito-hlinitý granát s příměsí iontů ceru (YAG:Ce), oranžovým např. CaS:Eu, ale dochází k neustálým inovacím a složení současných luminoforů většinou není uváděno. Zde je nutné poznamenat, že není principiální problém vytvořit libovolně „barevné“ LED světlo. Zpočátku se ale výrobci neradi pouštěli do „teplých“ barev zřejmě proto, že taková světla mají nižší účinnost (protože světelná účinnost červených fotonů je horší než těch zelených a žlutých), a tak nebylo možné dosáhnout špičkových parametrů.

### 3. Tepelné záření versus luminiscence — lumidky

Lidské oko je dlouhou evolucí přizpůsobené světlu našeho hlavního — dříve výhradního — zdroje světla, tedy Slunci. Sluneční fotony vychází z vnější vrstvy Slunce zvané *fotosféra*, která má teplotu asi 5780 K. Spektrum je dobře popsáno *Planckovým zákonem* popisujícím *rovnovážné spektrální rozložení fotonů vyzařovaných tělesem o teplotě T*. Toto záření nazýváme *tepelné záření* a je společné všem tělesům. Tepelným zdrojem světla jsou také žárovky, v nichž dochází k zahřátí kovového vlákna procházejícím proudem. Nejvyšší teplotu tání přes 3400 °C, má z dostupných materiálů wolfram, proto se z něj dělají vlákna žárovek (dříve to byly také tantal a osmium). Důležité je, že celková intenzita tepelného záření rychle roste s teplotou (jako čtvrtá mocnina, viz Stefanův–Boltzmannův zákon) a maximum se posouvá ke kratším vlnovým délkám (jako 1/T, viz Wienův zákon).

V kontrastu s tepelnými zdroji světla jsou LED založeny na elektroluminiscenci.



Obr. 2. (a) Elektroluminiscenční spektrum RGB diody, jejíž struktura je ukázána na makrofotografii v panelu (b). Pověšměte si, že čip červené diody (R) je menší než ostatní dva, a také toho, že spektrum zelené diody (G) je výrazně posunuto od maxima spektrální účinnosti na 555 nm (přerušovaná čára). (c) Absolutně kalibrovaná spektra teple a studeně bílé lumidky měřená ve vzdálenosti 50 cm. (d) Schéma jednoduché levné bílé diody s luminoforem umístěným přímo na čipu modré LED.

Jako luminiscenci obecně označujeme „nerovnovážné“ záření vyvolané vybuzením (excitací) vhodného materiálu do vyšších elektronových energetických stavů — luminiscence je tedy záření navíc nad tepelným zářením společným pro všechna tělesa s jistou teplotou. Účinná luminiscence existuje pouze v některých speciálních materiálech, má velmi specifické spektrum a obvykle klesá s rostoucí teplotou — prakticky se tedy ve všech ohledech odlišuje od tepelného záření.

Přesto se u nás světelné zdroje založené na LED — tedy na elektroluminiscenci a případně fotoluminiscenci luminoforu — ve většině případů označují jako *LED žárovky*. To zní jak oxymoron typu „strhané struny zvuk, slitého zvonu hlas“. Důvodem tohoto nevhodného pojmenování je — jako dnes často — otročský překlad z angličtiny. Tam se „žárovka“ řekne „bulb“, což je označení vystihující baňkovitý tvar tradičních žárovek, který bývá často zachovávan i u LED zdrojů. Oproti tomu „žárovka“ je nádherné české slovo vystihující tepelnou podstatu jejího záření. Měli bychom tedy nalézt příhodnější český název pro LED světelné zdroje, který bude vystihovat jejich

fyzikální podstatu. Jelikož je základním principem elektro- a foto-luminiscence, mohl by krátký a jednoduchý název znít *lumidka*, jak jsme navrhli nedávno [13]. V odborné literatuře se pak nová technologie osvětlování označuje jako *solid-state lighting* (SSL), tedy *pevnolátkové osvětlování*.

#### 4. Porovnání elektricky napájených zdrojů osvětlení — vítězné polovodiče

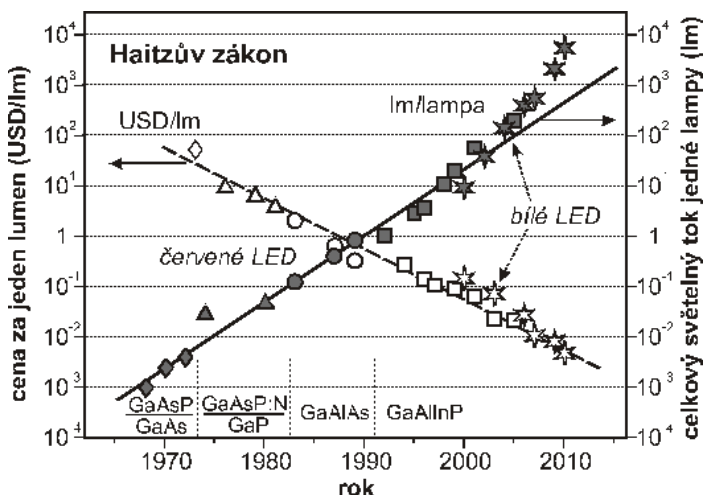
Elektricky napájené zdroje světla prokázaly své praktické výhody velmi rychle, a proto dominují osvětlovací technice již téměř sto let. (Řadu zajímavostí čtenář najde v nedávném článku J. Hubeňáka [4].) Mezi nimi se kdysi už objevily i zdroje založené na elektroluminiscenci. Bylo to v 60. a 70. letech minulého století, kdy vzbudily živý zájem elektroluminiscenční panely založené na práškovém ZnS obsahujícím vhodné dopanty. Podrobně se jim věnoval významný český vědec *Karel Pátek* (1927–1967, mimo jiné autor prvního československého laseru [14]) ve své knize *Elektroluminiscence — světlo budoucnosti*, vyšlé v roce 1965 [6] (jak prorocký název!). Principem činnosti těchto panelů ovšem nebyla injekční elektroluminiscence, ale elektroluminiscence ve vysokých střídavých polích (neboli Destriaův jev, viz [7]). Tyto panely se jistou dobu vyráběly v Tesle Holešovice, ale trvale se neprosadily — podobně jako jinde ve světě — hlavně kvůli problémům se stabilitou (ovšem i nízké účinnosti, která by ale v některých aplikacích nemusela být zásadním problémem).

Aby nový světelný zdroj uspěl, musí nabízet různé výhody — u *lumidek* je to vysoká účinnost, trvanlivost a odolnost — a především musí být cenově dostupný a provozně výhodný. Z ekonomického hlediska nemá žádná novinka jednoduchou pozici, protože vývoj a zavedení výroby bývají nákladné. Nejinak tomu bylo u lumidek, kterým trvalo téměř dvě desetiletí, než se jejich pořizovací cena snížila natolik, že se při uvážení provozních úspor a dlouhé životnosti vyplatí nahrazovat jimi vysloužilé žárovky a zářivky.

Velkou výhodou lumidek je, že jsou založeny na polovodičích a polovodičový průmysl prokazuje „kouzelnou“ schopnost neustále inovovat technologie, zpřesňovat (miniaturizovat) strukturu součástek a hlavně vyrábět velké množství součástek najednou, paralelně na čím dál větších substrátech — tím je možné stále snižovat cenu jednotlivých součástek. U integrovaných obvodů je pokrok technologie popsán známým Mooreovým zákonem: „*Množství komponent na čipu roste přibližně dvakrát každý rok*“ — po 10 letech opraveno na zdvojnásobení za 18 měsíců, viz [11]. Pro vývoj LED byl navržen podobný „zákon“, který se nazývá *Haitzův* (podle R. Haitze z firmy Agilent, který jej vyslovil roku 2000). Ten říká: „*Za deset let vzroste světelný výkon diod asi dvacetkrát a přitom skoro desetkrát klesne cena za jeden lumen*“ a zatím dobře platí (obr. 3).<sup>2</sup>

Samozřejmě i lumidky mají některé nevýhody — LED jsou velmi malé součástky pracující se stejnosměrným napětím. Když jimi chceme nahradit žárovku nebo zářivku, musíme zkombinovat řádově desítky jednotlivých LEDek do vhodného obalu a přidat nějaké ty obvody (obr. 4a). To vše, pochopitelně, komplikuje výrobu a zvyšuje cenu. Můžete se zeptat: Proč jsou vlastně LED tak malé (přibližně krychlové o délce strany

<sup>2</sup>Je třeba si uvědomit, že oba zmíněné „zákony“ — Mooreův a Heitzův — nejsou nějakými „přírodními“ zákony, ale jen vystižením rychlosti inovací polovodičové technologie, které po svém vyslovení slouží jako jistý cíl pro manažery plánující budoucí vývoj (tzv. road maps) — tím se „zákon“ jakoby „samonaplňuje“.



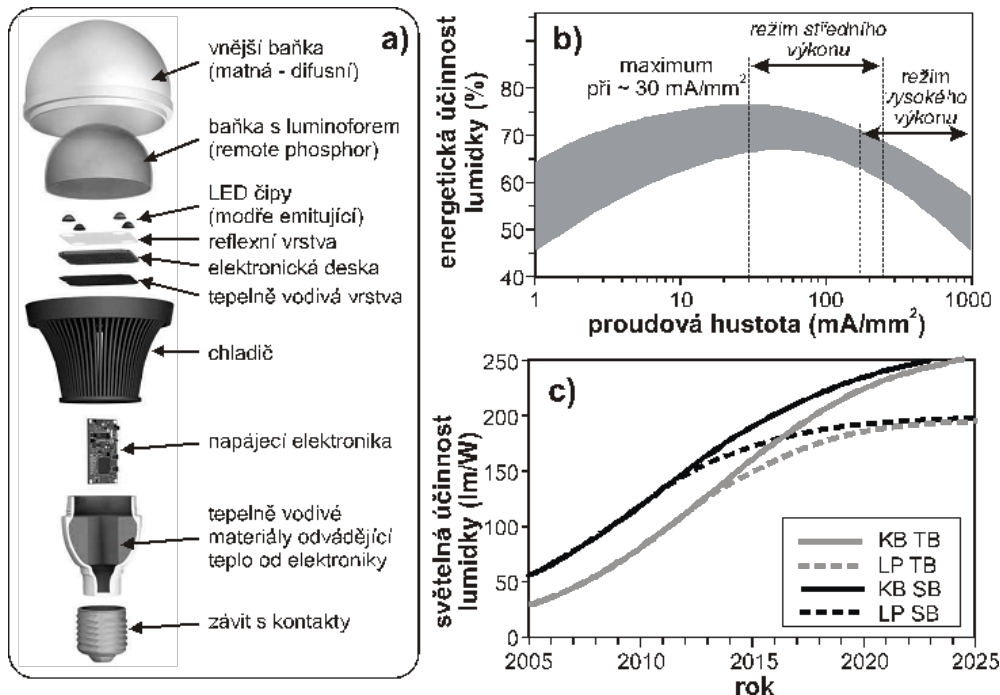
Obr. 3. Zobrazení Haitzova zákona, který říká, že maximální světelný tok z jedné LED lampičky se zvýší dvacetkrát za deset let a přitom se sníží cena za jeden lumen desetkrát. Jsou zobrazena data pro červené a bílé LED.

jen několik desetin milimetru), nešlo by udělat je větší? Bohužel to (zatím) nejde, problémem je rozložit proud rovnoměrně na větší plochu. Pokud se to nepodaří, bude se soustřeďovat do určitých míst a hrozí nevratné poškození polovodiče. Větší plocha součástky také zvyšuje pravděpodobnost, že se v ní objeví fatální defekt a procento „zmetků“ naroste (při uvažované konstantní hustotě takových defektů). A co tedy zvýšit proud jednotlivými LED a tak zvýšit výkon? To také nejde, od určité hranice proudu je hustota nábojů tak velká, že dochází k vzájemnému nepružnému rozptylu elektronů či děr (tzv. Augerova rekombinace) — tedy ke ztrátě energie na teplo a poklesu světelné účinnosti (obr. 4b). Zahřívání lumidky je vůbec samostatným problémem, protože každá LED trochu „topí“ — část dodané energie přeměňuje v teplo, a když jich je natěsnaných více vedle sebe, musí se řešit i jejich efektivní chlazení. Velké zahřátí (přes 80°C) nedělá LED a luminoforům dobře.

Některé uvedené „nevýhody“ lumidek však otevírají zcela nové možnosti pro osvětlovací techniku: Malé LED lze snadno uspořádat do zcela neobvyklých světelných zdrojů, nepodobných dosavadním lampám. Zachovávat tvar žárovek a zářivek u lumidek má smysl, jen pokud chceme zachovat původní svítidlo s příslušnou patičí a prostě jen „přešroubovat“ starý zdroj za nový. Nové lampy umožňují namísto centrálního osvětlení distribuovat světlo na všechna místa, kde je potřeba. Běžně už můžeme vidět svítící pásy, ploché panely, světlovodné struktury a pod. Změny ovšem probíhají pomalu, protože naráží na pevně zakořeněné zvyklosti uživatelů (někdy i designérů) a finanční možnosti.

Výhodou lumidek je i jejich snadné napájení z akumulátorů, takže jsou základem podsvětlení většiny displejů z kapalných krystalů v dnešních mobilních zařízeních, telefonech, tabletech, laptotech a pod. (existuje jen jeden vážný konkurent a to OLED — organické LED z vodivých polymerů). Baterie ve spojení se solárním dobíjením pomocí fotovoltaických panelů umožňují vytvářet autonomní osvětlovací systémy, např. osvět-



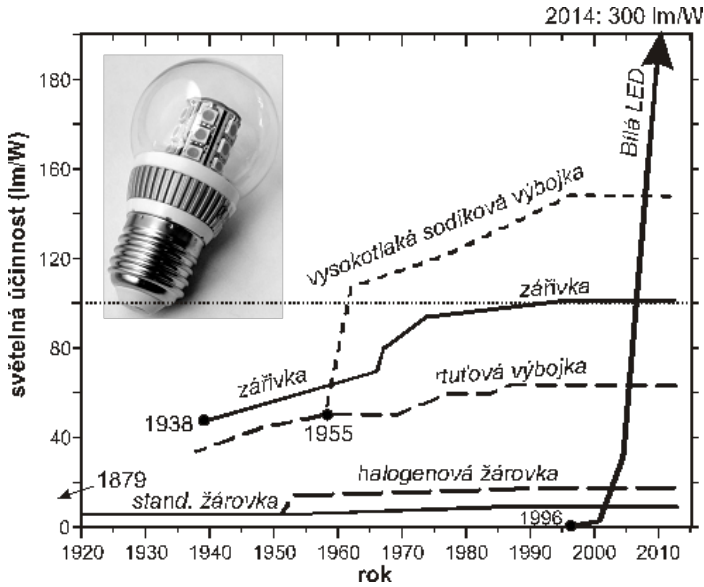


Obr. 4. (a) Schéma jednoho možného provedení lumidky s lumínoforem pod vnější baňkou. (b) Závislost energetické účinnosti (vyzářená energie ku příkonu) lumidky v závislosti na proudové hustotě (šedá plocha naznačuje možný rozptyl parametrů u vyráběných lumidek) — optimum leží kolem  $30 \text{ mA/mm}^2$ , následující pokles se označuje jako „droop“. Pro dosažení většího výkonu se často lumidky provozují při větší proudové hustotě i za cenu poklesu účinnosti (podle dat z časopisu LED Magazine). (c) Současná a předpokládaná budoucí světelná účinnost lumidek v provedení teple nebo studeně bílé (TB resp. SB) a realizované buď s lumínofory (LP), nebo jako kombinace LED různých barev (KB) — do budoucna se předpokládá, že druhá uvedená možnost umožní dosahovat větší světelné účinnosti.

lení komunikací bez nutnosti přivádět k nim napájecí kabely, ale zejména v oblastech daleko od jakýchkoliv elektrických sítí, tedy v chudých oblastech světa (uvádí se, že asi 1,3 miliardy lidí nemá přístup k elektrické síti). V těchto oblastech se ještě stále svítí především petrolejkami. Petrolej má ale řadu nevýhod — je relativně drahý, musí se na opuštěná místa donášet v kanystrech, může způsobit zdravotní potíže nebo požár. Proto zde lumidkové osvětlení může sehrát významnou roli pro zlepšení kvality života. Tohoto úkolu se chopily různé neziskové organizace, např. iniciativa Light Up the World Foundation (nadace Osvětli svět), která dodává a instaluje autonomní osvětlovací systémy za dotované ceny.

Jednoduchost spínání a změny intenzity světla nabízí možnost vybavit LED osvětlení „chytrou“ elektronikou, která umožní naprogramování, snadné dálkové ovládání nebo bude sama hlídat optimální zapínání a vypínání. Například je už možné narazit na pouliční osvětlení, které sleduje pohyb chodce či automobilu a zapíná (nebo zesiluje) světlo jen v jeho okolí.

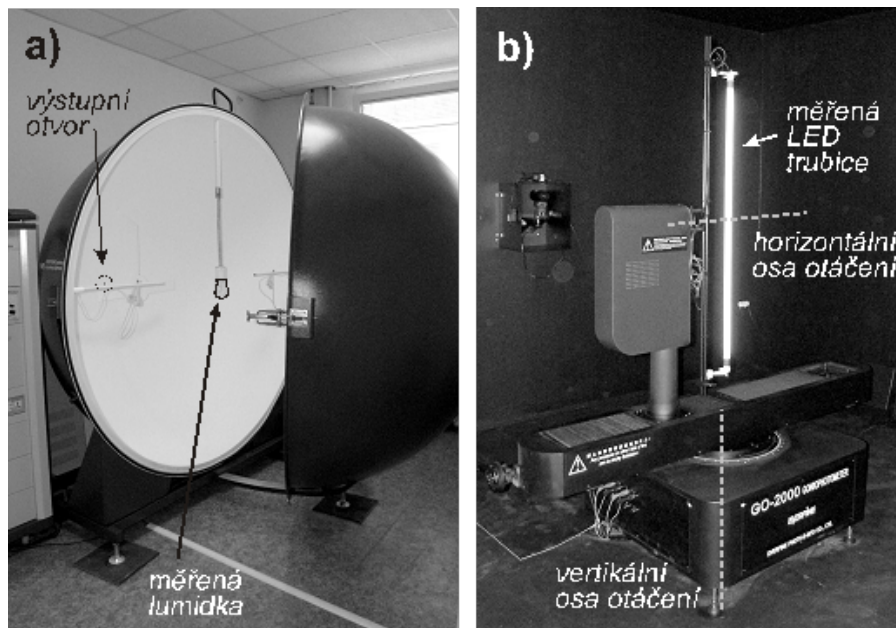
A jak jsou na tom lumidky s účinností v porovnání s ostatními zdroji? Skvěle;



Obr. 5. Vývoj elektricky napájených světelných zdrojů a jejich účinnosti. Bílé LED udivují dynamikou zlepšení světelné účinnosti. V roce 2014 firma Cree ohlásila překonání hranice 300 lm/W. Vložená fotografie ukazuje lumidku imitující tvarem klasickou žárovku. Upraveno podle [8].

jsou nejlepší! Na obr. 5 vidíme vývoj světelné účinnosti hlavních používaných zdrojů světla. Nejhorší jsou žárovky s účinností kolem 10 lm/W. Halogenka je asi dvakrát lepší, zato zářivka s luminoforem může jít až na 100 lm/W. Vysokotlaké sodíkové výbojky používané v pouličním osvětlení jdou sice až na 150 lm/W, ale jsou velké, mají komplikovaný elektrický obvod a pomalu startují, takže se nedají v menších aplikacích, třeba v domácnosti, použít. U lumidek byla za zásadní hranici účinnosti považována hodnota 100 lm/W, která byla překonána již před pár lety a dnes se někteří výrobci chlubí hodnotami kolem 300 lm/W. Ovšem pozor! Běžně prodávané lumidky se mohou velmi lišit a některé jsou výrazně pod 100 lm/W.

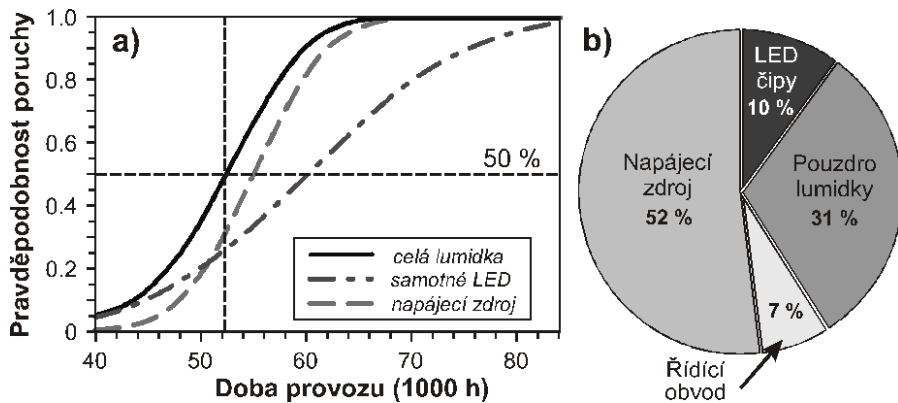
Pokud má čtenář k dispozici wattmetr a luxmetr, může snadno zjistit přibližnou hodnotu světelné účinnosti svého zdroje podle tohoto postupu: Lampu zapojíme do sítě přes wattmetr a nastavíme na měření příkonu. Luxmetrem pak měříme kolmé osvětlení vytvořené měřeným zdrojem (ostatní zdroje světla musíme vypnout či odstínit) ve vzdálenosti 1 m — pokud citlivost luxmetru nestačí, měříme osvětlení v bližší vzdálenosti a přepočteme je na vzdálenost 1 m (osvětlení ubývá s kvadrátem vzdálenosti). Posoudíme také prostorové rozložení, protože potřebujeme zjistit celkový světelný tok v lm. Osvětlení je v jednotkách  $\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$ , takže průměrné osvětlení musíme vynásobit celkovou osvětlenou plochou (nebo prostorovým úhlem ve sr, pokud máme osvětlení pro vzdálenost 1 m, a ještě přesnější výsledek dostaneme, když proměříme celé prostorové rozložení osvětlení a zintegrujeme přes celou plochu). Autor zjistil typické hodnoty světelné účinnosti 11 lm/W pro matnou žárovku o příkonu 60,5 W a 71 lm/W pro srovnatelnou lumidku ve tvaru matné žárovky o příkonu 7,6 W. Nejlepší měřená lumidka měla 123 lm/W.



Obr. 6. Zařízení pro radiometrickou a fotometrickou charakterizaci světelných zdrojů v laboratoři firmy Tesla Lighting v Řeži u Prahy: (a) integrační koule o průměru 2 m v otevřené konfiguraci, (b) goniometr pro studium prostorového rozložení světla (foto: Jan Valenta, 2015).

V technické praxi se celkový světelný tok ze zdrojů měří pomocí integrační koule, což je kulová dutina s vysoce odrazivým bílým povrchem, která by měla být několikrát větší (typicky desetkrát) než měřený zdroj. Světlo ze zdroje se rovnoměrně rozptýlí bez ohledu na směr vyzařování a pak vystupuje malým otvorem do detekční části. Pomocí kalibrace celého zařízení měřením standardních lamp pak lze měření přepočítat na radiometrické či fotometrické veličiny. Prostorové rozložení emise se měří pomocí goniometru, který otáčí zdroj v různých osách a emisi v jistém směru měří pevný detektor (obr. 6). Takové moderní zařízení pro testování světelných zdrojů bylo nedávno zřízeno firmou Tesla Lighting (nástupcem Tesly Holešovice) v Řeži u Prahy za spolufinancování EU fondy (<http://www.tesla-lighting.cz/sluzby/fotometricka-laborator-tesla/>). Radiometrické zařízení pro měření malých zdrojů (jednotlivých LED) existuje také v naší laboratoři na Matematicko-fyzikální fakultě UK v Praze.

Vedle ceny a účinnosti lumidek je důležitým faktorem ještě životnost. V tomto ohledu mají uživatelé špatné zkušenosti s kompaktními zářivkami (tzv. úsporkami), které obvykle nevydržely deklarovanou životnost kolem 10 000 hodin (a to nejen v důsledku častějšího zapínání a vypínání). U lumidek byla provedena řada studií, které uvádí obdivuhodnou životnost kolem 50 000 hodin. Je zajímavé podívat se na důvody selhání lumidek podle studie amerického ministerstva energetiky (obr. 7) — převážná část defektů souvisí s integrovaným napájecím zdrojem a řídicí elektronikou. Vlastní LED čipy při správném napájení jsou téměř „nesmrtelné“. Z toho jasně plyne doporučení: používat LED světla s vnějším zdrojem, který v případě poruchy lze vyměnit samostatně.



Obr. 7. (a) Praviděpodobnost poruchy lumidky jako funkce provozní doby, střední doba funkčnosti je 50 tisíc hodin. (Podle studií U.S. Department of Energy provedených na velkém souboru prodávaných lumidek.) (b) Rozdělení příčin selhání jednoho typu venkovní lumidky (celkem měřeno 5 400 lamp, celková doba provozu 34 Mhodin, selhalo 29 lamp); téměř 60% poruch způsobil napájecí či řídicí obvod, vlastní LED pouze 10% (pramen: U.S. DOE).

Nakonec by autor rád reagoval na různé stížnosti a fámy ohledně zdravotní závadnosti lumidek. Lidé si často stěžují, že jejich světlo je příliš „studené“<sup>3</sup>. To byla pravda u prvních bílých LED, ale dnes je možné si vybrat lumidky různé barevné teploty; ty „teple bílé“ mohou mít barevnou teplotu kolem 3 000 K podobně jako žárovky. V zásadě lze konstatovat, že na základě LED lze postavit lampy libovolné barvy, ovšem některé z nich budou mít relativně nižší účinnost a také mohou být velmi drahé. Například se začínají vyrábět solární simulátory z LED. To jsou lampy, které mají velmi přesně napodobovat průběh slunečního spektra a používají se pro testování nejen solárních článků, ale i mnoha dalších výrobků. Dosud byly založeny převážně na xenonových výbojkách ve spojení s filtry, ale LED dokážou poskytnout lepší spektrum. Jiný příklad je z oblasti péče o historické artefakty: Evropský projekt LED4art se úspěšně zabýval návrhem a realizací osvětlení Michelangelových fresek v Sixtinské kapli, které mělo za cíl dosáhnout co nejlepšího barevného vjemu při minimalizaci spektrálních složek způsobujících degradaci pigmentů. Námítka o zdravotní závadnosti je pak úplně lichá. Lumidky na rozdíl od zářivek či žárovek nevysílají prakticky žádné neviditelné záření (UV nebo IR) a nepříznivě tak může působit jen přebytek modré složky (s možným účinkem na cirkadiánní rytmus, jak bylo uvedeno výše) — to lze ovšem napravit správnou volbou barevné teploty lumidky při nákupu. Druhý faktor, který může působit nepříznivě je *mihotání*, poblikávání (anglicky flicker). To je ovšem způsobeno použitím nedokonale usměrňujícího zdroje a skutečně je měřitelné u „kompaktních“ lumidek, které mají integrovaný spínaný zdroj napětí.

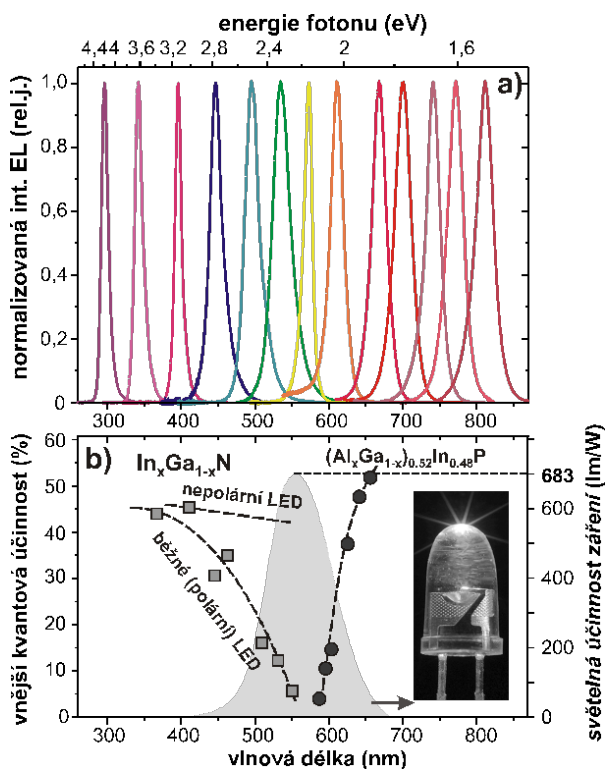
<sup>3</sup>Je třeba zdůraznit rozdíl pojmů teplá či studená barva (ve výtvarném umění) a vztahu teploty k barvě spektra tepelného zdroje. První pojmy se vztahují k „teplému pocitu“ vyvolanému určitými barvami — žluté, oranžové odstíny působí teple (připomínají barvu ohně či vyprahlé krajiny), kdežto modré a zelené odstíny působí chladně (připomínají vodu, sníh, kov odrážející modrou oblohu atd.). Naproti tomu spektrum vyzařované tepelným zdrojem se s rostoucí teplotou posouvá z červené oblasti do modré. Pojem barevná teplota se vztahuje k popisu světelných zdrojů se spektrem podobným tepelnému vyzařování dokonale černého tělesa o této teplotě.

Podle měření autora je toto blikání u lumidek obecně mnohem menší než u zářivek a je podobné žárovkám. U kvalitních vnějších zdrojů, třeba pro LED pásy, je mihotání téměř nulové.

## 5. Současný a budoucí vývoj elektroluminiscenčních světelných zdrojů — stále je co zlepšovat

Nakonec se ještě podíváme, jaká jsou hlavní témata současného výzkumu a vývoje účinných LED a osvětlovacích zdrojů.

Část výzkumu se zaměřuje na další rozšiřování dostupných vlnových délek a zvýšení účinnosti. Už nyní lze koupit LED s vlnovými délkami od UV-C oblasti (od 240 nm) po infračervenou (obr. 8a), ale některé z nich trpí krátkou životností (UV oblast) nebo nízkou účinností — zde se pozornost soustředí na „zelený problém“ (obr. 8b) [5]. Ano, je to tak, s výrobou velmi účinných zelených diod a tedy i laserových diod je problém — maximální účinnost LED kolem 555 nm je asi desetkrát nižší než pro modré



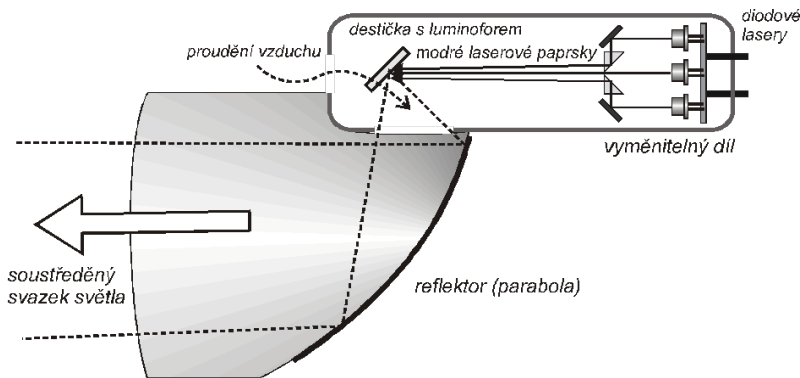
Obr. 8. Dostupnost LED různých vlnových délek: (a) Spektra některých diod ze souboru, který se používá v laboratoři autora jako budící zdroje ve spektroskopii (např. měření kvantových výtěžků fotoluminiscence). (b) Maximální vnější kvantové účinnosti současných LED využívajících kvantové jámy. Výrazné minimum (pokles asi o řád) leží, bohužel, ve žlutozelené oblasti spektra, kde je maximální citlivosti lidského oka — ta je zde reprezentována křivkou světelné účinnosti záření (šedá plocha a pravá osa) (upraveno podle [5]).

a červené LED. A přitom jde právě o oblast, kde je nejvyšší citlivost oka — maximální světelná účinnost zařízení. Příčinou zeleného problému je elektrická polarizace krystalů. LED s vysokou účinností jsou totiž založeny na heterostrukturách s velmi tenkými vrstvami — kvantovými jámami (viz 1. díl tohoto článku). Bohužel, při běžné orientaci krystalů GaN jsou hrany vrstev tvořeny převážně jedním z prvků Ga nebo N a vzniká tak elektrická polarizace čili piezoelektrické efekty. To vede k tomu, že elektrony a díry nejsou lokalizovány ve stejném místě kvantové jámy a jejich zářivá rekombinace tak má nižší účinnost, což se projevuje více u širších kvantových jam, které jsou třeba pro zelenou emisi, a také s rostoucí tloušťkou klesá kvalita deponovaných vrstev. Řešením je růst struktur v jiné krystalografické orientaci, tzv. nepolární či semipolární, ale dosažení kvalitních krystalů je pak ještě obtížnější než bylo u polární orientace GaN [3].

Stále se také hledá optimální řešení otázky nejhodnějšího substrátu pro depozici vrstev založených na GaN (InGaN, AlGaIn atd.). Nejdokonalejší vrstvy vznikají při homoepitaxi — tedy depozici na GaN podložky. Zatím je však velmi obtížné a drahé vyrobit GaN krystaly velkých rozměrů — vývoj ale jde kupředu a investují se do něj velké prostředky (např. Š. Nakamura s kolegy z univerzity v Santa Barbaře založil firmu Sora pro vývoj technologie „GaN-on-GaN“). Výhody a nevýhody různých substrátů jsou shrnuty v následující tabulce. Vyplývá z ní, že pro různé součástky (LED různé kvality, laserové diody) budou preferovány různé typy substrátů (vyšší kvalita je výrazně dražší).

	křemík Si	karbid křemíku SiC	safír Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	GaN	Semi-polární a nepolární GaN
Max. průměr substrátu (mm)	> 200	150	150	50	< 50
relativní cena za jednotku plochy	1	3	1,5	50	≫ 50
propustnost pro viditelné světlo	ne	ano	ano	ano	ano
podíl mřížkové konstanty ku GaN (0,319 nm)	1,2	0,97	0,86	1	1
zlepšení lokalizace elektronů a děr (snížení droop)	ne	ne	ne	ne	ano

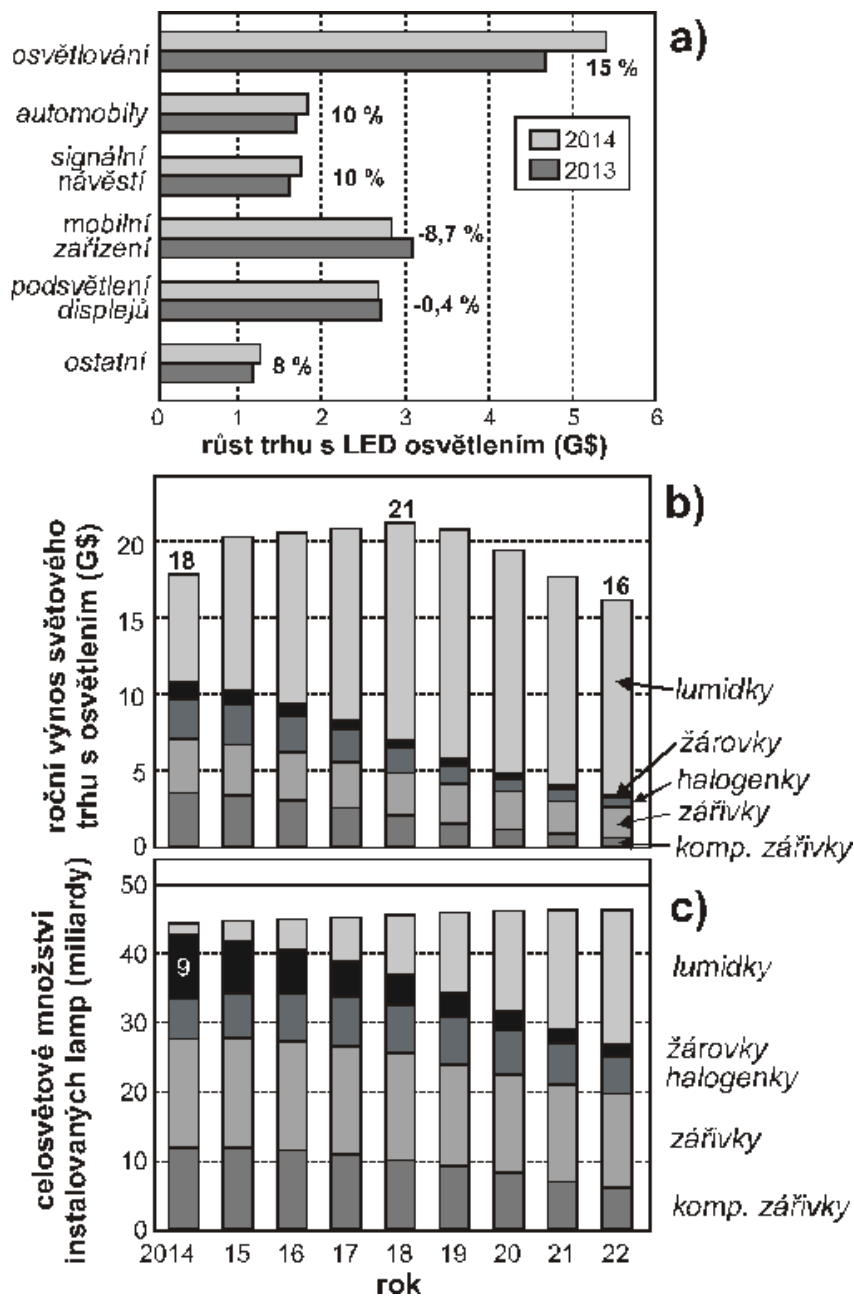
Tab. 1. Porovnání možných substrátů pro výrobu LED založených na GaN (podle materiálů LED Magazine). Nejhorší hodnoty jsou označeny šedě.



Obr. 9. Laserová dálková světla automobilu: Trojice modrých diodových laserů excituje malý bod na destičce s luminoforem. Vyzářené „bílé“ světlo je soustředěno parabolou do velmi kolimovaného svazku. (Rekonstruováno podle materiálů firmy BMW.)

Významným faktorem určujícím účinnost LED je efektivita extrakce světla ze součástky. Při vysokém indexu lomu použitých polovodičů je zřejmé, že velká část EL fotonů se na rozhraní odrazí zpět. Řešením je např. vyleptání „jehlanovité“ struktury na povrchu součástky nebo využití fotonických či plazmonických struktur pro „nasměrování“ fotonů vhodným směrem. Navrhnout takové účinné struktury pomocí numerických simulací už není velký problém, ale hlavní otázkou zůstává, jak takové struktury vyrobit levně.

Nakonec zmíníme zajímavou otázku využití laserových diod pro osvětlovací účely. Zní to jako šílený nápad — lasery přece mohou být nebezpečné, jelikož vytváří úzký paprsek a mohou se po odrazu do oka koncentrovat na malou plochu sítnice a způsobit její nenávratné poškození. O to více mohly v nedávné době překvapit články hlásající, že přední automobilové firmy montují do svých luxusních modelů laserové světlomety, které dosvítí více než dvakrát tak daleko jako dnešní dálková světla. Ve skutečnosti z takových reflektorů žádný laserový paprsek ven nevychází. Jde v zásadě o speciální lumidku, jež je tvořena destičkou luminoforu, který je excitován několika modrými laserovými diodami. Jejich paprsky se dají dobře soustředit do malého bodu, který pak svítí jasným bílým světlem. Čím je svítící bod menší, tím lépe se dá optickou soustavou (v zásadě parabolickým zrcadlem) soustředit do rovnoběžného světelného svazku (obr. 9). Podobný princip se používá i v moderních lampách pro projektory do kinosálů. Největším úskalím těchto laserových lumidek je nejspíš výroba luminoforové destičky, která bude dostatečně stabilní i při tak silné excitaci (běžně se uvádí, že luminofory v lumidkách degradují při teplotách nad 80 °C). Pravděpodobně se využívá speciálních luminoforů a silného proudění vzduchu na chlazení této destičky. Vývoj tak po padesáti letech dospěl k naplnění předpovědi citované v prvním díle článku, kde jsme při popisu historie vzniku svítivých diod jako „vedlejšího produktu“ vývoje polovodičových injekčních laserů citovali článek z roku 1963: „Nejnovější vzrušující vynález laseru ve firmě General Electric může jednou poslat elektrickou žárovku do výslužby. Zatímco záření předchozích [polovodičových] laserů bylo neviditelné, tento vyzářuje v červené oblasti spektra. Výzkum pokračuje a inženýři z GE doufají v sestrojení laseru, který bude přeměňovat běžný elektrický proud na bílé světlo s velkou účinností.“



Obr. 10. Světový trh s osvětlením (podle materiálů LED Magazine): (a) Rozdělení trhu s lumidkami podle aplikací a jeho změna mezi léty 2013 a 2014. (b) Předpověď vývoje trhu s osvětlovací technikou (pokles po roce 2018 je důsledkem delší životnosti lumidek) a (c) celkového počtu instalovaných světelných zdrojů podle typu.



## 6. Závěr

V této druhé části článku inspirovaného udělením Nobelovy ceny za fyziku v roce 2014 za vývoj modré LED jsme si ukázali, jaký význam tyto součástky mají pro zásadní obměnu osvětlovací techniky a tím pro zvyšování kvality života. Zatímco v chudých oblastech světa pomáhají „svítit více“, v bohaté části světa „svítit méně“ — přesněji řečeno účelněji a kvalitněji ve smyslu spektrálního složení, rozmístění, nasměrování a důmyslného spínání světelných zdrojů. Při deklarované špičkové světelné účinnosti lumidek nad 300 lm/W už je prakticky dosažena hranice fyzikálních možností. Nyní musí pokračovat snižování výrobních cen, hledání nových principů návrhu inteligentního osvětlení a jeho postupné pronikání do všech oblastí osvětlovací techniky. Kvalifikovaná předpověď budoucího vývoje je uvedena na závěrečném obrázku (obr. 10).

## L i t e r a t u r a

- [1] BERSON, D. M., a kol.: *Science* 295 (2002), 1070.
- [2] HATTAR, S., a kol.: *Science* 295 (2002), 1065.
- [3] HOSPODKOVÁ, A.: *Čs. čas. fyz. (1)* (2015), 53–54.
- [4] HUBEŇÁK, J.: *Od uhlíkové žárovky k moderním zdrojům světla*. PMFA 55 (2010), 111–124.
- [5] NAKAMURA, S.: *MRS Bulletin* 34 (2009), 101.
- [6] PÁTEK, K., NEUMANOVÁ, M.: *Elektroluminiscence — světlo budoucnosti*. Nakladatelství ČSAV, Praha, 1965.
- [7] PELANT, I., VALENTA, J.: *Luminiscenční spektroskopie II*. Academia, Praha, 2010.
- [8] PELANT, I., VALENTA, J.: *Luminiscence doma, v přírodě a v laboratoři*. Academia, Praha, 2014, kapitola 6.
- [9] SCHRÖDER, G.: *Technická optika*. SNTL, Praha, 1981.
- [10] SHUBERT, E. F.: *Light-emitting diodes*. 2<sup>nd</sup> edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- [11] VALENTA, J.: *Integrovaný obvod — základní kámen informační revoluce*. *Vesmír (1)* (2001), 24–31.
- [12] VALENTA, J.: *Modrá je dobrá, díl 1. Stoletá cesta svítivých diod od kuriozity k Nobelově ceně*. PMFA 60 (2015), 3–18.
- [13] VALENTA, J., PELANT, I.: *Doba LEDová*. *Vesmír 92 (11)* (2013), 612.
- [14] VYŠÍN, L., JUHA, L.: *Čs. čas. fyz. 60* (2010), 316–319.
- [15] Na oficiální stránce [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org) najde čtenář mnoho dokumentů o Nobelových cenách a laureátech.