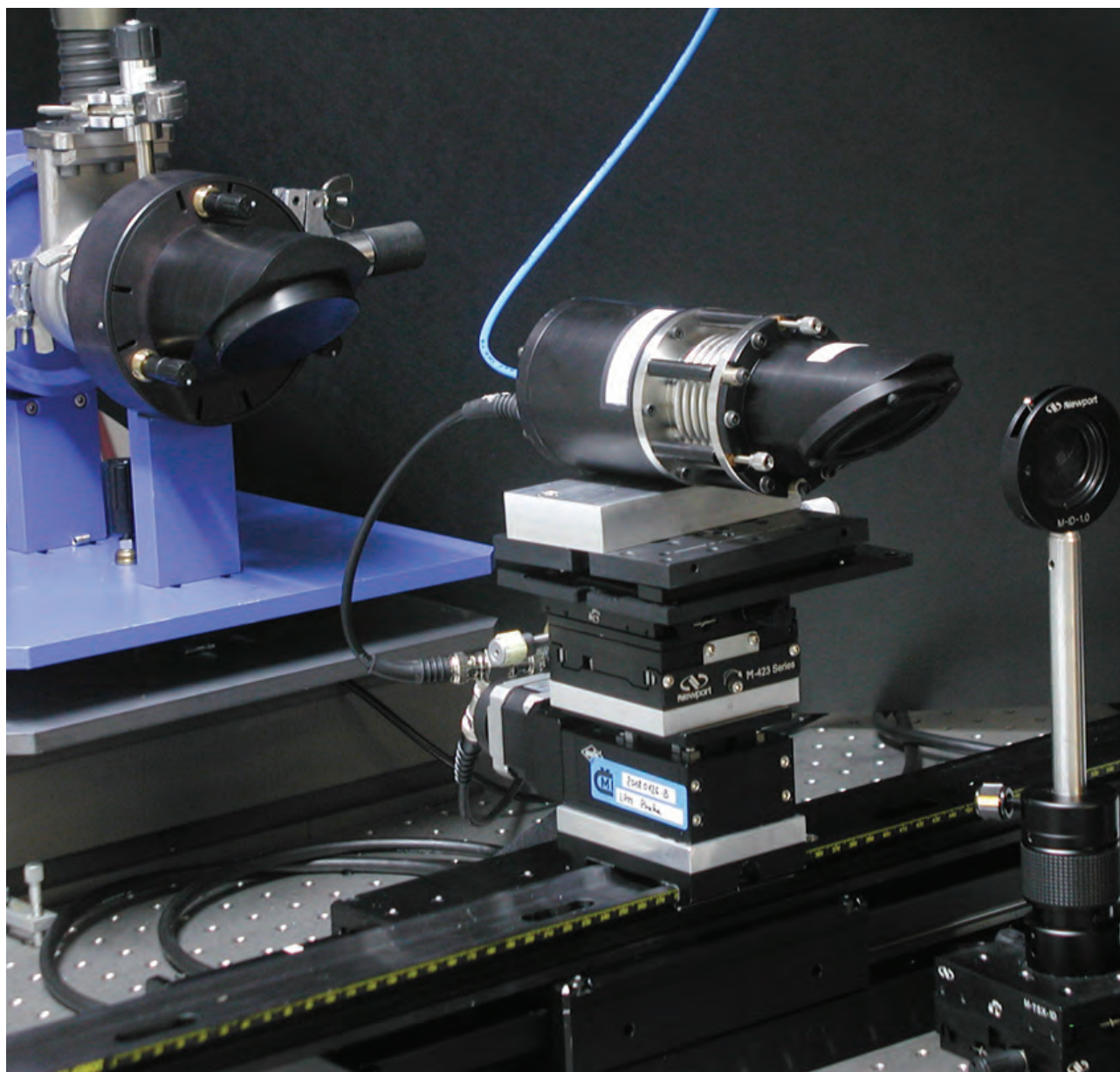


TEMATICKÁ PŘÍLOHA Č. 3/2015

Mezinárodní rok světla  
a světelné techniky

# METROLOGIE

VĚDECKÁ  
LEGÁLNÍ  
PRAKTICKÁ





**MEZINÁRODNÍ ROK SVĚTLA  
A SVĚTELNÉ TECHNIKY**

**Dr. Ing. Marek Šmíd, Ing. Vladimír Dvořáček,  
Ing. Petr Kliment, Ing. Alžběta Rossi**

*Český metrologický institut*

Předmluva .....	2
Optické záření .....	2
Radiometrie a fotometrie .....	3
Jednotka svítivosti – kandela, základní jednotka SI .....	3
Jednotka světelného toku – lumen .....	5
Jednotka osvětlenosti – lux .....	6
Měření jasu .....	6
Metrologická návaznost optické radiometrie a fotometrie v ČMI .....	6
Světelné zdroje .....	14
Lasery .....	25
Optická vlákna .....	26
Mezinárodní komise pro osvětlování CIE .....	26
Účast ČMI v Evropských výzkumných projektech v oblasti radiometrie a fotometrie .....	27
Závěr .....	30
Literatura .....	31

**THE INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT  
AND LIGHT-BASED TECHNOLOGIES**

**Dr. Ing. Marek Šmíd, Ing. Vladimír Dvořáček,  
Ing. Petr Kliment, Ing. Alžběta Rossi**

*Czech Metrology Institute*

Introduction .....	2
Optical Radiation .....	2
Radiometry and Photometry .....	3
Luminous Intensity Unit – candela, SI base unit .....	3
Unit of Luminous Flux .....	5
Unit of Illuminance .....	6
Measurement of Luminance .....	6
Metrological Traceability in Optical Radiometry and Photometry at CMI .....	6
Light Sources .....	14
Lasers .....	25
Optical Fibres .....	26
International Commission on Illumination CIE .....	26
Participation of CMI in European Research Projects in the field of Radiometry and Photometry .....	27
Conclusion .....	30
References .....	31

### MEZINÁRODNÍ ROK SVĚTLA A SVĚTELNÉ TECHNIKY

#### PŘEDMLUVA

Letošní rok byl vyhlášen Organizací spojených národů za **Mezinárodní rok světla a světelné techniky**. Cílem tohoto kroku je připomenout občanům celého světa výraznou roli světla a světelné techniky v jejich každodenním životě a při budoucím rozvoji společnosti.

Optikou se řídí široká škála důležitých technologií a aplikací: ve výrobním průmyslu, ve zdravotnictví, pro pozorování Země, informační a komunikační technologie, osvětlení a displeje, bezpečnostní a zabezpečovací zařízení. Pro rozvoj a využití všech těchto aplikací nabízených optickými technologiemi se logicky vyžaduje i přesné «oko» ke kvantifikaci světla. Přesná měření světelného záření a jejich metrologická návaznost se proto stávají rovněž nepostradatelnými.

#### OPTICKÉ ZÁŘENÍ

##### Viditelné záření a světlo

Pod pojmem světlo se ve světelné technice rozumí viditelné záření, v rozmezí vlnových délek asi od 380 nm do 770 nm. Uvedené hranice však nejsou absolutní – závisí zejména na vnímavosti každého jedince, na velikosti zorného pole a na intenzitě světla příp. na adaptačním jasu. Protože ani za stejných podmínek není spektrální citlivost lidského oka u všech osob stejná, přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) dohodu o hodnotách spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele, které se používají ve všech světelně technických výpočtech a úvahách. Průběh poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele znázorňuje křivka  $V(\lambda)$  pro fotopické vidění, s maximální hodnotou na vlnové délce  $\lambda = 555$  nm.

Ve spektru slunečního záření může oko člověka rozeznat asi 128 barevných tónů. Záření ve viditelné oblasti spektra jsou většinou důležitá pro život organismů, u rostlin spolupůsobí při tvorbě chlorofylu a mají praktický význam ve všech oborech lidské činnosti.

S viditelným zářením sousedí v oblasti kratších vlnových délek záření ultrafialové (UV) a v oblasti delších vlnových délek záření infračervené (IR). Záření UV, viditelné a IR tvoří tzv. **optické** záření. [1]

##### Ultrafialové záření

Spektrální rozsah ultrafialového (UV) záření je přibližně od 400 nm až asi do 1 nm.

Podle mezinárodního doporučení CIE se ve zmíněném spektrálním rozsahu rozeznávají tři druhy UV záření: UV-A (315 nm až 400 nm), UV-B (280 nm až 315 nm), UV-C (100 nm až 280 nm). Zdrojem UV paprsků je jednak sluneční záření a jednak umělé zdroje, zejména LED zdroje a výbojky speciální konstrukce využívající různé svítící příměsi (nejčastěji rtuť, železo, olovo, kobalt, ga-

lium, indium aj.) vnášené do výbojové trubice v čisté formě anebo ve formě příslušných halogenidů. Vysoká vrstva vzduchu v atmosféře UV záření pohlcuje, sluneční paprsky UV-A záření jsou proto silnější na horách vzhledem k vyšší nadmořské výšce a UV-C záření se prakticky díky atmosféře na povrch země nedostane. UV záření má výrazné účinky fotochemické, čehož se využívá při chemických rozborech a k urychlení chemických reakcí v průmyslových procesech, např. k fotoanalýze, fotooxidaci, izomerizaci, polymerizaci, v polygrafii při různých metodách kopírování, při vytvrzování laků aj. UV záření je také využíváno v nízkotlakých výbojových světelných zdrojích pro všeobecné a speciální osvětlování, zejména v zářivkách a kompaktních zářivkách, v nichž je UV záření rtuťového výboje transformováno pomocí luminoforu na viditelné záření požadovaného spektrálního složení.

UV záření vzbuzuje luminiscenci luminoforů. Tento jev nachází široké uplatnění v celé řadě oblastí vědy a techniky. Na základě luminiscenčního účinku je založena tzv. fluorescenční analýza, umožňující vizuální rozlišení různých materiálů, které se při osvětlení ve viditelné oblasti spektra od sebe vzhledově neliší. Pod UV zářením lze rozlišit více barevných odstínů. Pro fluorescenční analýzu se užívají hlavně dvě čary rtuťového výboje, a to 365 nm (tzv. Woodovo světlo) a 253,7 nm; v některých případech též celá oblast záření UV-A. Zmíněná analýza je rozšířena nejen v mnoha vědních oborech, ale i v lékařství, v řadě průmyslových odvětví, v zemědělství (např. k výběru obilí k setbě, při výběru vajec z líhně apod.), kriminalistice, aj.

Již odedávna jsou známy fotobiologické účinky UV záření na člověka, zvířata, mikroorganismy a rostliny. Paprsky v intervalu vlnových délek 240 nm až 280 nm s maximem okolo 255 nm mají biologicky negativní (germicidní) účinky, působí trvalé změny v mikroorganismech vedoucí k jejich zahubení či alespoň k jejich degeneraci. Germicidních účinků se využívá jak k přímému ničení virů, bakterií, plísní, kvasinek apod., tak ke sterilizaci vzduchu, kapalin i pevných látek. Ve zdravotnictví se těchto zdrojů používá ke sterilizaci operačních sálů, pokojů, čekáren, sociálních zařízení, laboratoří, apod. Ve farmaceutickém průmyslu se nejen sterilizuje prostředí (např. skříně pro plnění injekčních ampulí), ale i některé kapaliny a obaly před naplněním. V potravinářském průmyslu se kromě běžné sterilizace ovzduší a kapalin využívá UV záření k ochraně před plísní v chladírnách. Rovněž v zemědělství se UV záření uplatňuje jako prostředek sterilizační, preventivní a léčebný (např. v boji proti kožním plísním) při odchovu mláďat a drůbeže hlavně v prostorech bez přímého slunečního světla. V rostlinné výrobě jde pak nejen o ochranu např. obilí před plísněmi, ale ozařují se i osiva, čímž se docílí jakostnější a vyšší produkce. V případech, kdy je vyžadována vysoká hladina ozáření, např. v zařízeních na úpravu vody, lze použít vysokotlaké rtuťové, příp. halogenidové výbojky s vyšším příkonem.



UV záření okolo 280 nm podporuje v podkožních buňkách tvorbu vitamínu D, urychlujícího ukládání vápníku v kostech, sekundárně pozitivně ovlivňuje i další biologické procesy mající blahodárný vliv na lidský organizmus. UV záření zejména v intervalu vlnových délek (290 až 300) nm s maximem při  $\lambda = 297$  nm vyvolává v pokožce fotochemické reakce a rozšíření cév, projevující se zánětlivým krátkodobým zčervenáním pokožky, tzv. erytémou, která není provázána ochranným zhnědnutím (pigmentací) pokožky. Erytemální účinky jsou zvláště nebezpečné při působení UV záření na sliznice. Optimální pigmentační účinky co do intenzity a trvanlivosti opálení má UV záření s vlnovou délkou 320 nm až 370 nm.

UV záření má negativní účinky na oči, vyvolává zánět spojivek (v intervalu 340 nm – 400 nm s maximem citlivosti při  $\lambda = 390$  nm) a zánět oční rohovky (prakticky v celé oblasti UV-A s maximem při  $\lambda = 360$  nm).

Záření v pásmu UV-C ionizuje vzduch a vytváří ozón. Až na výjimečné případy však tyto ozonizační účinky UV záření jsou s ohledem na toxické vlastnosti ozónu při nepřiměřené koncentraci nežádoucí (vyvolává silné dráždění očí, horních cest dýchacích a bolesti hlavy).

### Infračervené záření

Spektrální rozsah infračerveného (IR) záření je přibližně od 780 nm až asi do 1 mm. Podle mezinárodního doporučení CIE se v tomto spektrálním rozsahu rozeznávají tři druhy IR záření: IR-A (780 nm až 1400 nm), IR-B (1400 nm až 3000 nm), IR-C (3000 nm až  $10^6$  nm).

Infračervené záření se projevuje tepelnými účinky. Jeho základním zdrojem je slunce, ale rovněž každé teplé těleso, elektrický oblouk, infračervené zářiče (např. klasické reflektorové žárovky s podžhaveným vláknem, lineární halogenové infražárovky, keramické zářiče aj.). IR paprsky prostupují snadno vzduchem, mlhou, krystaly křivce (fluoritu, který je typický svou vysokou propustností v celém rozsahu optického záření a představuje tak velmi cenný optický materiál), tenkými vrstvami kovů, vodou a tepelnými izolanty.

IR paprsky jsou nosiči sálavého tepla a slouží k vytápění, ohřívání a sušení. V lékařství se uplatňují při diathermii, pro níž jsou vhodné paprsky z oblasti vlnových délek  $\lambda = 800$  nm až 900 nm, které nejlépe pronikají tělem. IR část spektra se využívá např. v IR multispektrálních zobrazovacích detektorech (využívaných zejména ve vojenském oboru). Obor termografie se rozvinul společně s rozšířením infračervených kamer, s jejichž pomocí lze bezkontaktním způsobem stanovit teplotu povrchu. Dále se IR záření využívá při fotografování předmětů v blízké IR oblasti, které odrážejí IR záření v různé míře a tak lze získat obraz v různých odstínech šedé barvy, které korespondují s odrazivostí předmětů pomocí podstatně jednodušších přijímačů. IR záření se využívá při pozorování v noci, kdy se IR záření v infradalekohledu převede na viditelné záření. Na základě měření intenzity charakteristické absorpce IR záření molekul látek lze pomocí infračerveného analyzátoru stanovit jednotlivé složky (např. škodlivé plyny) v ovzdu-

ší. Široké uplatnění našlo IR záření v informatice, kde umožňuje bezdrátový přenos informací a dovolilo výrazně zvýšit kapacitu přenosových kanálů v optických vláknech.

### RADIOMETRIE A FOTOMETRIE

**Radiometrie** je metrologický obor zabývající se měřením optického záření, to jest obecněji vyjádřeno elektromagnetického záření v rozsahu frekvencí od  $3 \cdot 10^{11}$  Hz až  $3 \cdot 10^{16}$  Hz. Tento rozsah odpovídá vlnovým délkám od 10 nm až po 1000  $\mu\text{m}$  a zahrnuje oblasti běžně nazývané ultrafialová, viditelná a infračervená spektrální oblast. Typické radiometrické jednotky jsou watt, [W] (zářivý tok), watt na steradián (zářivost), watt na metr čtvereční (ozáření) a watt na metr čtvereční na steradián (zář).

Pro vlastní vidění ale není důležité celkové množství světelné energie vyzářené zdroji za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a zejména jeho prostorové rozdělení. Ve světelné technice se při hodnocení kvality osvětlení sledují důsledky působení záření na zrakový orgán a zrakový vjem. Proto se ve světelné technice neposuzují energetické veličiny (např. zářivý tok, zářivost apod.), ale pracuje se s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují proměnlivou citlivost oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. Pro zajištění jednotnosti světelné technických výpočtů a měření se v praxi pracuje s hodnotami spektrální citlivosti oka tzv. normálního fotometrického pozorovatele.

**Fotometrie** se zabývá měřením světla, které je definováno jako elektromagnetické záření vnímatelné lidským okem. Je tak omezena výlučně na viditelnou oblast (vlnové délky od 380 nm do 770 nm) a všechny veličiny jsou integrálně vázány spektrální odezvou lidského oka. Fotometrie používá buď optické detektory záření konstruované tak, aby napodobily spektrální odezvu oka, nebo spektrometry v kombinaci s širokopásmovými absolutními detektory viditelného záření, kde je vážení na citlivost lidského oka provedeno výpočtem. Typickými fotometrickými jednotkami jsou lumen [lm] (světelný tok), kandela [cd] (svítivost), lux [lx] (osvětlenost), a kandela na metr čtvereční [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ] (jas).

Rozdíl mezi radiometrií a fotometrií tedy je, že radiometrie zahrnuje celé spektrum optického záření a často zahrnuje spektrálně rozlišená měření, zatímco fotometrie se zabývá výlučně viditelnou oblastí spektra váženou spektrální citlivostí lidského oka.

### JEDNOTKA SVÍTIVOSTI – KANDELA, ZÁKLADNÍ JEDNOTKA SI

Současná definice základní jednotky svítivosti – kandelly – tvoří pevný základ pro přesná měření v metrologických oblastech optické radiometrie, fotometrie a jejich odvozených oborech. Ta jsou dnes nepostradatelná pro širokou škálu aplikací vyžadujících přesnou kvantifikaci zářivého toku elektromagnetického záření, zejména pak záření, které je vnímáno lidským okem (světlo). Kandela byla jednou ze

základních veličin Mezinárodní metrické soustavy jednotek SI od roku 1954 [2] a je jedinou základní jednotkou, která kvantifikuje fundamentální fotobiologický proces – lidské vidění. V několika posledních desetiletích probíhal vskutku revoluční rozvoj zdrojů optického záření, detektorů, měřicích přístrojů i technik, který přinesl výrazný pokrok a zpřesnění radiometrických a fotometrických měření v klasických aplikacích, jako jsou vývoj svítidel, výrobní technologie vyžadující optické zdroje, detektory a optické materiály a ochrana zdraví a životního prostředí. Všechny tyto nedávné změny z velké části podporují současnou definici jednotky z roku 1979. Nicméně v posledních letech dochází k prudkému vývoji také ve zcela nové oblasti optických technologií založených na principech kvantové optiky, např. jednofotonové detektory a jednofotonové zdroje, které umožňují rozvoj nových technologií jako například kvantové kryptografie. Globální rozšíření těchto kvantových technologií vyžaduje zvýšení přesnosti měření a zajištění metrologické návaznosti na úrovni několika fotonů. To může vést v budoucnu k nové re-formulaci kandely ve smyslu kvantových jednotek – fotonů.

### Historie jednotky

Historie fotometrických etalonů sahá až do počátku devatenáctého století, kdy se intenzita světelných zdrojů měřila srovnáním s etalonovou svíčkou pomocí vizuálního fotometru. V té době byl tedy jako etalon svítivosti používán plamen svíčky a podle toho byla jednotka také tak nazvána – Candle – v anglickém překladu svíčka. Etalonové svíčky byly postupně nahrazovány plamenem etalonové olejové lampy.

Na počátku dvacátého století započal v některých národních metrologických laboratořích výzkum záření černého tělesa na teplotě tání platiny – jedné z realizací tzv. Planckovského zářiče. V roce 1860 zjistil Kirchhoff, že ideální černé těleso v termodynamické rovnováze emituje záření, jehož spektrum je funkcí pouze vlnové délky a jeho termodynamické teploty a je zcela nezávislé na druhu a povrchu materiálu tohoto černého tělesa. Teoretická interpretace tohoto jevu se stala poté jedním z nejsledovanějších úkolů teoretické fyziky na následujících 30 let, neboť přesný matematický popis měřeného spektra nebyl na půdě klasické statistické mechaniky ani termodynamiky dosažitelný. Na základě spektrálních dat naměřených v roce 1899 Lummerem a Pringsheimem formuloval v roce 1900 Planck svůj zákon o vyzařování černého tělesa, známý jako Planckův zákon, založený na kvantové hypotéze [3, 4]. Tak byl položen základní kámen kvantové fyzice, ale také optické radiometrii jako nové oblasti metrologie, protože řešení problému černého tělesa zajistilo také řešení mnohaletého výzkumu referenčních zdrojů pro měření optického záření [5-7]. Veličinou popisovanou původním Planckovým zákonem byla spektrální hustota vyzářené energie. Nicméně vhodnější veličinou z hlediska využití v optické radiometrii je spektrální zář,  $L(\lambda, T)$ . Protože jsou si tyto dvě veličiny velmi blízké, dnes se Planckův

zákon vyjadřuje více ve tvaru vyjadřujícím spektrální zář černého tělesa. V této formě nabývá Planckův vztah pro spektrální zář absolutně černého tělesa o teplotě  $T$  ve vakuu tvar:

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \right) \quad (1)$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ) a teplota  $T$  je vyjádřena v absolutní stupnici v kelvinech.

Černé těleso nebo Planckův zářič je tak realizací absolutního primárního etalonového zdroje fotonů, jehož spektrum vyzařování může být stanoveno absolutně na základě měření jeho teploty a aplikace Planckova zákona. Černé těleso navíc emituje zcela nepolarizované záření.

Jako výsledek těchto prací byla v roce 1909 uzavřena dohoda mezi několika národními metrologickými laboratořemi o používání takového černého tělesa jako nového etalonu jednotky svítivosti a nová jednotka byla nazvána „international candle“. Nová realizace byla pak přijata Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) v roce 1921. Takto realizovaná jednotka svítivosti byla konečně přijata CIPGM v roce 1948 [8] pod novým, latinským jménem „candela“ (cd), česky kandela, s následnou definicí:

**„Kandela je svítivost v kolmém směru vyzářená z plochy 1/600 000 čtverečního metru černého tělesa o teplotě tuhnutí platiny za okolního tlaku 101 325 newtonů na metr čtvereční.“**

Díky této definici se podařilo poprvé v historii ustavit základ pro celosvětově ekvivalentní fotometrická měření, to byl její hlavní záměr a byl bezezbytku naplněn.

Nicméně již v průběhu třicátých let se objevovaly práce, které poukazovaly na řadu technických i fyzikálních úskalí spojených s výrobou velmi přesných černých těles a na praktickou nemožnost zvýšení přesnosti definice touto cestou. V praxi není totiž žádná realizace černého tělesa ideálním černým tělesem, tedy absolutním absorbérem s konstantní emisivitou rovnou jedné, nýbrž tato spektrálně závislá emisivita musí být přesně měřena a stanovena a zavádí tak významnou korekci při realizaci primární stupnice spektrální záře. To samozřejmě tuto realizaci primárního etalonu výrazně diskvalifikovalo.

### Současný stav realizace jednotky

Současně se již v padesátých letech začaly objevovat názory na možnou změnu definice jednotky svítivosti svázanou s jednotkou optického výkonu watt tak, aby komplikovaný etalonový zdroj už dále nebyl potřeba. V této době se již začaly objevovat možnosti nabízené optickou radiometrií na měření výkonu optického záření s větší přesností a nižší nejistotou. Tato měření byla hlavním argumentem pro následnou a dodnes platnou změnu definice jednotky kandela, která byla přijata na 16. CGPM (Resoluce 3) v roce 1979 [9] v následujícím tvaru:

„Kandela je svítivost zdroje emitujícího v daném směru monochromatické záření o frekvenci  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, který má v tomto směru zářivost  $1/683$  wattů na steradián.“

Tato definice je vyjádřena pro monochromatické záření na rozdíl od té předcházející pracující s širokopásmovým zdrojem ve formě černého tělesa. To byl základní posun v definici kandely. Hodnota  $K_m$  (683 lm/W) byla stanovena tak, aby zajistila konzistenci nové definice s tou předchozí, a byla stanovena na základě řady měření prováděných předními laboratořemi té doby. Takto se kandela vyvinula z velice úzce vymezené definice založené na, ve skutečnosti, hmotném artefaktu – specifickém zdroji záření – v mnohem obecnější definici, která umožňuje mnoho různých metod realizace – fotometrické i radiometrické – s přesně známou hodnotou poměru lumen/watt na jedné definované vlnové délce optického záření. Nicméně je nutné připomenout, že samotné fotometrické veličiny jsou spektrálně integrovány přes poměrně široký spektrální rozsah a abychom mohli odvodit fotometrické jednotky z radiometrických spektrálních měření, je nutné spektrální radiometrická data spektrálně integrovat přes celé viditelné spektrum s normovanou váhovou funkcí – fotopickou spektrální citlivostí lidského oka [10].

Takto začaly být optická radiometrie a fotometrie velmi úzce provázány v tom smyslu, že fotometrické veličiny mohou být přímo odvozovány od radiometrických měření. Ve snaze poskytnout praktický návod na implementaci nové definice jednotky a na její možné praktické realizace, CCPR (Konsultativní výbor pro fotometrii a radiometrii BIPM) schválil v roce 1983 monografii „Principles of Governing Photometry“ [11] shrnující definice a tabulky numerických hodnot, které byly doposud přijaté jak na půdě CPGM CIPM, tak také CIE. Mimořádně, je z historie patrné, že tyto dvě organizace zásadně přispívaly k budování základů fyzikální fotometrie bok po boku po dobu celých 75 let, často i personálně úzce provázány. Tato spolupráce byla oficiálně stvrzena v roce 2007 podepsáním Memoranda o porozumění a Dohody o spolupráci mezi CIPM a CIE, kde je potvrzeno, že CIPM je zodpovědné za definici a návaznost jednotky v rámci systému SI a CIE je zodpovědné za vývoj a zpřesňování spektrálních závislostí citlivosti lidského oka.

## JEDNOTKA SVĚTELNÉHO TOKU – LUMEN

Světelnotechnická veličina, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem, se nazývá světelný tok. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

Světelný tok  $\Phi$  monofrekvenčního záření vlnové délky  $\lambda$ , jehož zářivý tok je  $\Phi_e$ , se určí ze vztahu:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; -, \text{W}) \quad (2.1)$$

Kde  $K(\lambda)$  je **světelný účinek monochromatického záření** ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ) při denním vidění rovný poměru světelného toku  $\Phi(\lambda)$  a jemu odpovídajícího zářivého toku  $\Phi_e(\lambda)$ ,  $K(\lambda) = \Phi(\lambda) / \Phi_e(\lambda)$  ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ ; lm, W)

$K_m$  je obecně maximum spektrálního průběhu světelného účinku záření, tj. funkce  $K(\lambda)$ ; [běžně při denním vidění],

$V(\lambda)$  je **poměrná světelná účinnost záření** definovaná obecně vztahem

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (2.2)$$

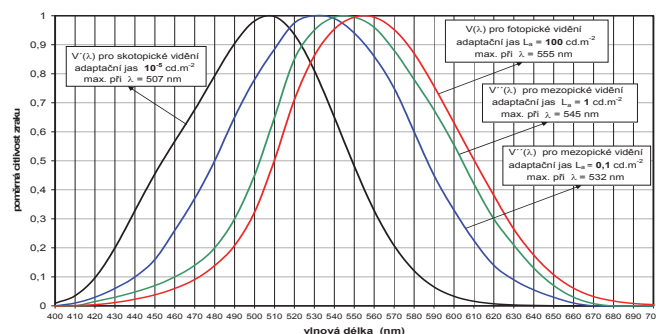
Mezinárodní orgány CIE a ISO v souladu s definicí kandely schválily, že maximum  $K_m$  světelného účinku záření  $K(\lambda)$  odpovídající monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky  $\lambda = \lambda_m = 555$  nm dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém (denním) vidění hodnoty  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ .

Uvedená konstanta představovala v dané době (1979) nejlepší odhad maxima  $K_m$  světelného účinku záření pro fotopické vidění, který zachovával předchozí úroveň fotopické kandely. Jde o důležitou konstantu, která spojuje fyzikální fotometrii a optickou radiometrii.

Stejně jako se pro fotopické vidění (adaptační jasy asi  $100 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) definovaly veličiny  $K(\lambda)$ ,  $K_m$  a  $V(\lambda)$  definují se pro **skotopické (noční) vidění** (adaptační jasy menší než asi  $0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ) veličiny  $K'(\lambda)$ ,  $K'_m = 1700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  při  $\lambda = 507$  nm a  $V'(\lambda)$ . Světelný tok při skotopickém vidění se pak pro monochromatické záření určuje z rovnice (2.1), v níž se ovšem veličiny  $K(\lambda)$ ,  $K_m$  a  $V(\lambda)$  nahradí veličinami  $K'(\lambda)$ ,  $K'_m$  a  $V'(\lambda)$ .

Zcela obdobně lze postupovat i v oblasti tzv. **mezopického vidění** (oblast mezi krajními stavy fotopického a skotopického vidění), kdy pro určitý adaptační jas lze určit veličiny  $K''(\lambda)$ ,  $K''_m$  a  $V''(\lambda)$ .

Podrobné tabulky hodnot funkcí  $V(\lambda)$  a  $V'(\lambda)$  jsou uvedeny v [12] a rovněž v normě ČSN 011710. Grafy funkcí  $V(\lambda)$ ,  $V'(\lambda)$  a dvou průběhů funkcí  $V''(\lambda)$  z mezopické oblasti vidění pro adaptační jasy  $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  a  $0,1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  jsou zobrazeny na **obr. 1**.



**Obr. 1:** Průběhy poměrné světelné účinnosti záření v závislosti na vlnové délce zářivého toku pro vybrané hodnoty adaptačních jasů



Důležitým důsledkem definice kandely je, že pro uvažovanou základní vlnovou délku  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$  jsou hodnoty všech světelných účinků záření  $K(\lambda)$ ,  $K'(\lambda)$ ,  $K''(\lambda)$  shodné a rovné hodnotě  $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ . Proto lze ve všech těchto stavech vidění pracovat se světelnými toky udávanými v lumenech.

### JEDNOTKA OSVĚTLENOSTI – LUX

Osvětlenost (intenzita osvětlení)  $E$  rovinné plošky  $dA$ , tj. plošná hustota světelného toku  $d\Phi$  dopadajícího na plošku  $dA$  je určena vztahem

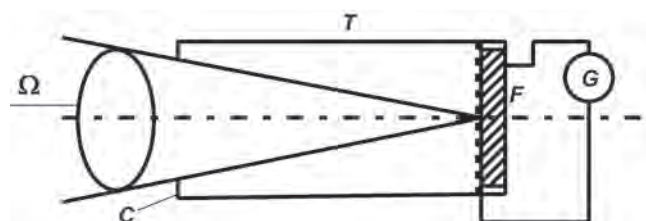
$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{lx; lm, m}^2) \quad (3)$$

Osvětlenost plošky  $dA$  se často nazývá i osvětleností v bodě, jehož elementární okolí v uvažované rovině tvoří ploška  $dA$ . Jednotkou osvětlenosti je lux (lx);  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Měření osvětlenosti je v praxi nejčastějším úkolem, a to jak ve fotometrických laboratořích, tak i při objektivním ověřování rozložení hladin osvětlenosti v různých osvětlovacích soustavách. K měření osvětlenosti se používají objektivní přístroje, luxmetry, které se skládají z přijímače s korigovaným (nejčastěji křemíkovým) fotočlánkem, opatřeným kosinusovým nástavcem, a z měřicího a vyhodnocovacího systému s digitálním nebo analogovým indikátorem.

### MĚŘENÍ JASU

Nejjednodušší princip řešení objektivního jasoměru je načrtnut na **obr. 2**.



**Obr. 2:** Princip řešení objektivního jasoměru T – černý tubus, F – fonotka, G – galvanoměr, C – clona,  $\Omega$  – prostorový úhel

Na přijímač je nasazena trubka T, uvnitř černá, opatřená vpředu clonkou C s kruhovým otvorem. Takto je vymezen prostorový úhel  $\Omega$ , v němž dopadají paprsky z měřené plochy na přijímač (fotočlánek) F. V popsaném uspořádání se fotočlánkem F změří normálová osvětlenost  $E_N$  přijímací plochy čidla. Střední jas  $L$  plochy vymezené prostorovým úhlem  $\Omega$  na sledovaném povrchu se pak určí ze vztahu

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lx, sr}) \quad (4)$$

Při měření jasů je třeba mít vždy na zřeteli, že se jasoměrem zjišťuje střední hodnota jasů měřené plochy, kterou

vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu. Proto je nutné dbát na to, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož jas se hodnotí. U běžných objektivních jasoměrů toto není problém, neboť se okolí měřené plochy pozoruje v okuláru a měřená oblast je v zorném poli vyznačena např. tmavým kroužkem.

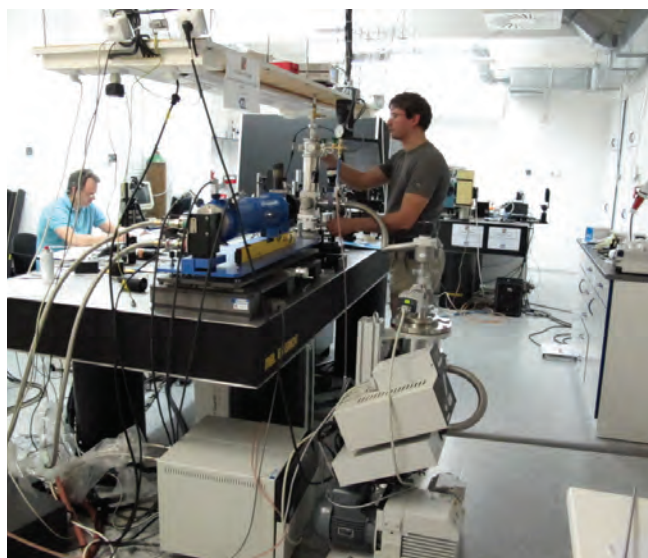
### METROLOGICKÁ NÁVAZNOST OPTICKÉ RADIOMETRIE A FOTOMETRIE V ČMI

Velkým problémem moderní radiometrie je, jak zajistit metrologickou návaznost širokého dynamického rozsahu radiometrických měření. Pro fotometrii dosahuje tento dynamický rozsah přes více než 15 dekad. Problém dynamického rozsahu ve fotometrii „řeší“ lidské oko samotím, že požívá různé typy receptorů na různých úrovních jasu. Pro fotometrické měření a pro fotometrické jednotky je návaznost na SI tedy uspokojivě řešena současnou definicí jednotky svítivosti a fotometrickým systémem CIE. Jiná je situace u radiometrie, protože tady jsou používány velmi různé typy detektorů, založené na velmi odlišných a vzájemně vzdálených fyzikálních principech pro různé úrovně celkových zářivých toků. Proto je pro radiometrická měření a radiometrické jednotky mnohem složitější realizovat návaznost na SI v celém dynamickém rozsahu měření. V klasickém světě radiometrie na úrovni vysokých toků je návaznost optických detektorů a zdrojů optického záření na SI systém realizována většinou kryogenním radiometrem navázáním na elektrické veličiny. Ve viditelném spektrálním rozsahu lze dosáhnout na diskretních vlnových délkách na výkonech od  $0,1 \text{ mW}$  do  $1 \text{ mW}$  standardní nejistoty kolem  $0,005 \%$  relativně. Posuneme-li se se zářivými toky do velmi nízkých úrovní zářivého toku, do světa kvantové radiometrie, zde jsou používány detektory na bázi fotonových čítačů a to je nevyhnutelně spojeno s výraznou degradací v přesnosti měření. Nutnost zajištění přesných absolutních radiometrických měření na těchto úrovních vyvolává potřebu po vývoji přesných modelem předpověditelných quasi-jednofotonových zdrojů a detektorů založených na technikách a metodách kvantové optiky.

Významný krok tímto směrem byl vykonán konsorciem 7 evropských národních metrologických institutů, včetně ČMI, v rámci společného výzkumného programu „Kvantová kandela“ uskutečněného díky programu iMERA PLUS v letech 2008 – 2011 [13]. Projekt jednak na klasických úrovních fotonových toků zkoumal možnou alternativu k současným primárním absolutním kryogenním radiometrům. Výzkum se týkal nového absolutního kvantového detektoru s předpověditelnou kvantovou účinností (PQED, Predictable Quantum Efficiency Detector) s teoretickým potenciálem nejistoty měření celkového zářivého toku na diskretní vlnové délce ve viditelném spektrálním rozsahu  $1\cdot 10^{-6}$  relativně [14, 15]. Po tříletém vývoji prokázala měření prováděná formou porovnání PQED se současným nejpřesnějším ra-



diometrickým systémem, kryogenním radiometrem, paralelně v ČMI LPM Praha a PTB Berlín na různých vlnových délkách (obr. 3), shodu výsledků výrazně v rámci nejistoty měření [16].



Obr. 3: Porovnání absolutních detektorů PQED a kryogenního radiometru v ČMI v květnu 2011

Na kvantové úrovni byly vyvíjeny nové techniky pro fyzikální a metrologickou charakterizaci jednofotonových zdrojů. Významnou třetí oblastí projektu byl vývoj technik zajištění metrologické návaznosti mezi klasickou a kvantovou radiometrií [17].

Vedle toho proběhl výrazný pozitivní posun v oblasti vývoje jednofotonových zdrojů záření [18], který staví vizi jednofotonových kvantových zdrojů záření emitujících foton na zasláný požadavek s účinností blížící se 99 % na reálnější základy. Tyto výsledky dnes přirozeně obracejí pozornost radiometrických laboratoří tímto směrem.

Vývoj přesného měření byl v oblasti optické radiometrie a fotometrie po dobu posledních více než sta let poháněn vpřed zásadními objevy dosaženými ve výzkumu jak detektorů, tak i zdrojů optického záření. Nejvyšší úroveň přesnosti měření dosahované v současné době na základě současné definice a současné špičkové technologie ve velké většině vyhovuje požadavkům velice různorodé skupiny uživatelů „klasické radiometrie a fotometrie“ z průmyslu, telekomunikací, dopravy, ochrany zdraví a životního prostředí. Nicméně nedávný prudký vývoj v oblasti jednofotonových detektorů a jednofotonových zdrojů, který se pomalu stává katalyzátorem vývoje řady nových perspektivních průmyslových odvětví, si může v budoucnu vyžadovat zcela nový pohled jak na definici jednotky tak i na její nové, přesnější realizace.

## Optická radiometrie v ČMI

### • Státní etalon celkového zářivého toku viditelného záření

Rok vyhlášení: 2007

Základní metrologické parametry:

Teplota referenčního bloku	$(14 \pm 1)$ K
Teplota měřicí dutiny	$(12 \pm 1)$ K
Citlivost měřicí dutiny	5 nW/digit
Absorbance měřicí dutiny	$0,99990 \pm 0,00002$
Časová konstanta	70 s
Aplikované vlnové délky laserového záření:	356,2 nm
	406,7 nm
	413,1 nm
	476,2 nm
	568,2 nm
	647,1 nm
	799,3 nm
úroveň potlačení rozptýleného záření	$\leq 1 \times 10^{-5}$ rel.
celková časová nestabilita optického výkonu měřicího svazku aparatury	$\leq 5 \times 10^{-5}$ rel
Celková kombinovaná rozšířená nejistota	$1 \times 10^{-4}$ rel.*

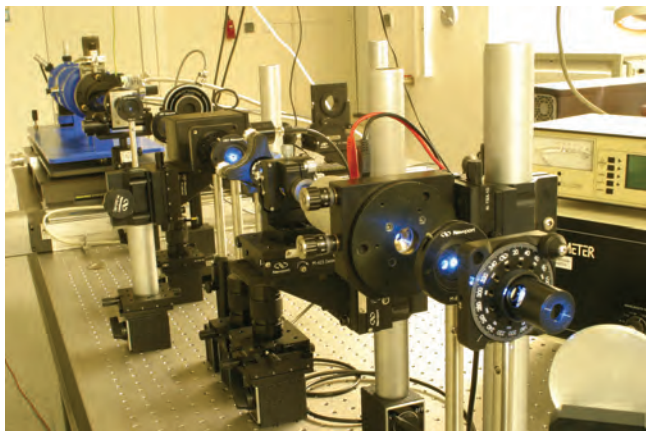
\*Udaná nejistota je rozšířená nejistota stanovená při úrovni pravděpodobnosti 95 %

Jako přesný absolutní primární radiometr je zde použit v současné době nejpřesnější radiometrický měřicí systém – absolutní kryogenní radiometr [19, 20].

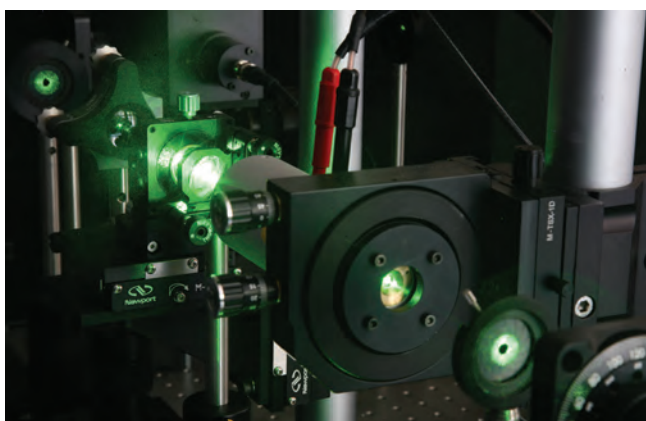
V Českém metrologickém institutu byl ve spolupráci s pracovištěm National Physical Laboratory ve Velké Británii vybudován systém založený na mechanicky chlazeném radiometru pracujícím na teplotě přibližně 12 K a aplikaci laserového záření o vysokém stupni lineární polarizace na škále až 12 vlnových délek ve spektrálním rozsahu od 330 nm do 800 nm. Časová konstanta měření kryogenního radiometru je přibližně 70 s, externí výkonová stabilizace laserového svazky využívající elektro-optickou modulaci dosahuje stability celkového zářivého toku na úrovni  $2 \cdot 10^{-6}$  relativně na úrovni přibližně 1 mW po dobu cca 1000 s.

Citlivost tohoto systému se pohybuje zhruba na úrovni 5 nW. Nejistota měření samotného kryogenního radiometru dosahuje hodnoty 0,005 % relativně. Jako interpolační prvek v systému metrologické návaznosti jsou používány past'ové detektory [21, 22], jejichž model externí kvantové účinnosti (ref) je absolutně kalibrován porovnáním s kryogenním radiometrem na diskretních vlnových délkách laserového záření. Nejistota spektrální responsivity těchto past'ových detektorů ve viditelném spektrálním pásmu dosahuje hodnoty 0,02 % relativně, což bylo potvrzeno výsledky mezinárodního porovnání kryogenních radiometrů CCPR BIPM uvedeného pod označením CCPR-S3 v roce 2008 [23].

Nehledě na finanční náročnost realizace takového radiometru, jeho měření samotné vyžaduje velké časové a materiální nároky a zejména velmi zkušený a odborně kvalifikovaný tým. To jsou důvody proč je v současné době tento systém provozovaný v Evropě pouze 7 národními metrologickými instituty včetně ČMI, celosvětově pak počet takových NMI rozhodně nepřesahuje číslo 20.



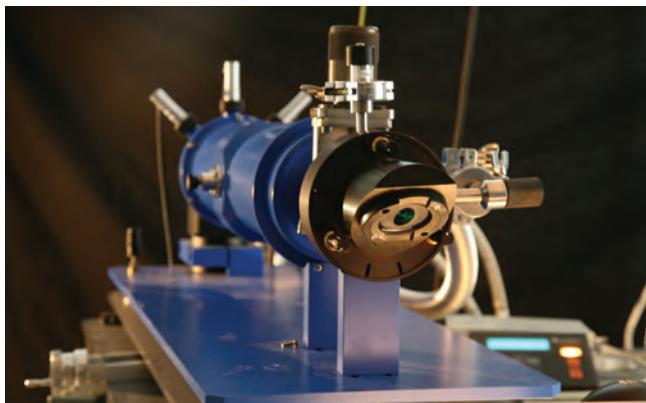
Obr. 4: Aparatura absolutního kryogenního radiometru ČMI



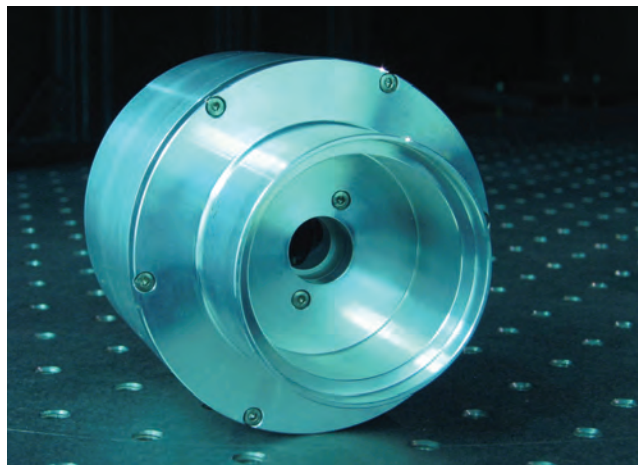
Obr. 5: Systém externí stabilizace výkonu laserového svazku aparatury kryogenního radiometru

Státní etalon celkového zářivého toku viditelného záření (VIS) – absolutní kryogenní radiometr – má klíčový význam pro zajištění přesnosti a jednotnosti měření veličin optické radiometrie a fotometrie. Kryogenní radiometr je dále aplikován jako základ stupnice spektrální responsivity optických detektorů, který následovně zajišťuje přímou návaznost pro měření optického záření v radiometrii a fotometrii, spektro-fotometrii, vláknové optice a v oblasti radiačního měření teploty.

Etalon sestává z vlastního kryogenního radiometru realizujícího veličinu celkového zářivého toku (obr. 6) a sady křemíkových pasťových detektorů ČMI1, ČMI2, ČMI3 sloužící jako přenosový etalon celkového zářivého toku, obr. 7.



Obr. 6: Primární etalon celkového zářivého toku absolutní kryogenní radiometru



Obr. 7: Křemíkový pasťový detektor CMI 1 ze sady tvořící přenosový etalon celkového zářivého toku viditelného záření

Aparatura absolutního kryogenního radiometru využívá záření plynového iontového Kr laseru, jehož emitované záření je stabilizováno systémem externí stabilizace optického výkonu laserového svazku.

Kryogenní radiometr je speciální typ radiometru: **Electrical-Substitution Radiometer (ESR)**. ESR porovnává tepelné účinky měřeného optického záření vyvolané absorpcí v měřicí dutině s tepelnými účinky elektrického proudu. Měření optického výkonu se zde převádí na přesněji realizovatelné měření ekvivalentního elektrického výkonu.

Detektor v konkrétním případě kryogenního radiometru je chlazen na kryogenní teplotu okolo 14 K. V těchto podmínkách lze využít supravodivosti elektrických propojení a dojde tedy k podstatnému zpřesnění měření elektrické substituce, dále je dosaženo výrazného nárůstu citlivosti z důvodů snížení charakteristické teplotní kapacity materiálu. Teplota komory je monitorována za použití přesného odporového můstku, který u měřené teploty má rozlišení přibližně 4 mK.

Etalon je umístěn v bezprašné klimatizované laboratoři ČMI LPM Praha, kde jsou dodržovány referenční podmínky: teplota ( $20 \pm 1$ ) °C, vlhkost vzduchu ( $50 \pm 20$ ) %.

• **Státní etalon celkového zářivého toku infračerveného záření**

Rok vyhlášení: 2009

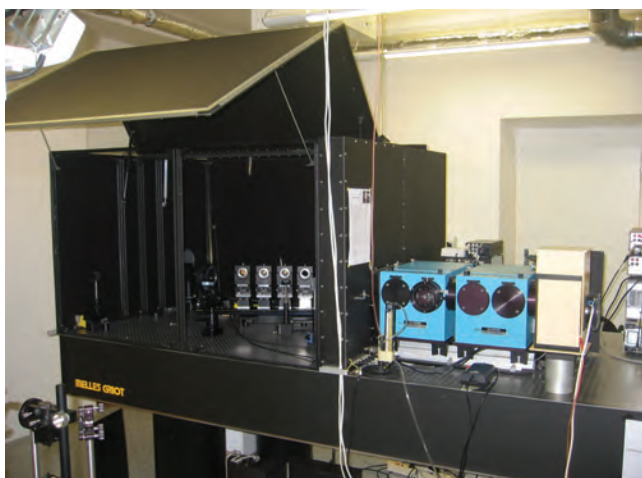
Základní metrologické parametry:

spektrální rozsah	900 nm – 1650 nm
spektrální pološířka měřicího svazku FWHM	6 nm nominální
nejistota stupnice vlnové délky*	0,1 nm – 0,3 nm dle nastavené $\lambda$
<b>Celková kombinovaná rozšířená nejistota pro uvedený spektrální rozsah:</b>	
900 nm < $\lambda$ < 960 nm	0,76 %
960 nm < $\lambda$ < 1000 nm	0,41 %
1000 nm < $\lambda$ < 1650 nm	0,42 %

\*Udaná nejistota je rozšířená nejistota stanovená při úrovni pravděpodobnosti 95 %

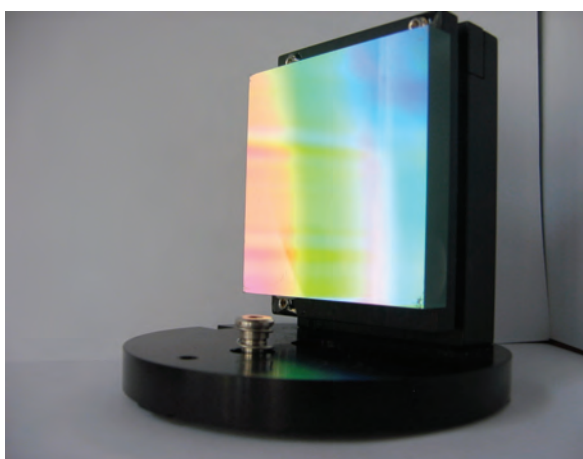


Primární etalon celkového zářivého toku infračerveného záření (IR) představuje v současnosti v České republice vrchol metrologické návaznosti veličin optické radiometrie širokém spektrálním oboru infračerveného záření. Tento etalon vznikl na pracovišti oddělení optické radiometrie a fotometrie ČMI pod vedením Dr. Ing. Marka Šmída v letech 2005 – 2009. Měřicí systém, díky aplikaci vyvinutých sofistikovaných metod měření, využití špičkové optické technologie a dosažení vysokého stupně automatizace měření, dosahuje špičkově rozšířené ( $k=2$ ) nejistoty měření na úrovni 0,4 % ve spektrální oblasti 960 nm – 1650 nm.



**Obr. 8:** Monochromátorová aparatura realizující veličinu celkového zářivého toku infračerveného záření

Sestava je tvořena z monochromátorové aparatury, pyroelektrického detektoru a sady tří velkoplošných detektorů na bázi InGaAs. Dále se aparatura skládá ze zdroje IR záření, spektrální neonové výbojky (etalon vlnových délek), optických a mechanických prvků, světlotěsných krytí, voštinového optického stolu, řídicího a měřicího zařízení a počítače s programovým vybavením.



**Obr. 9:** Snímek optické mřížky 600gr@1280 optimalizované pro maximální účinnost na vlnové délce 1280 nm (mřížka má 600 vrypů/mm)

Jako zdroj optického záření pro infračervenou spektrální oblast bylo použito halogenové žárovky 400 W, 36 V. Základem monochromátorové aparatury (**obr. 8**) je dvo-

jítý mřížkový monochromátor McPherson 2035D v subtraktivním uspořádání. Pro pokrytí infračervené spektrální oblasti je monochromátor vybaven sadou difrakčních mřížek. Vzhledem k uvažovanému spektrálnímu rozsahu 900 nm – 1650 nm, byly zvoleny mřížky s maximální účinností ve střední části tohoto pásma – konkrétně na vlnové délce 1280 nm. Mřížky mají 600 vrypů/mm, tak je v kombinaci s optickým systémem monochromátoru dosažena disperze 4 nm/mm. Pro ilustraci je na **obr. 9** znázorněn snímek jedné ze sady dvou optických difrakčních mřížek pro spektrální oblast IR.

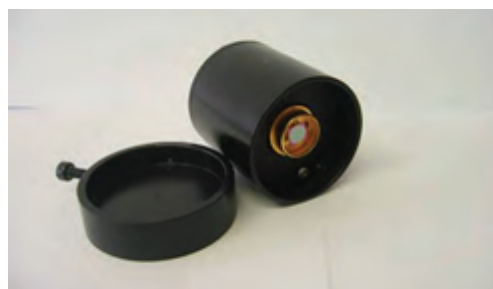
Základem pyroelektrického detektoru (**obr. 10**) je 50  $\mu\text{m}$  silný pyroelektrický  $\text{LiTaO}_3$  krystal o průměru 10 mm. Po obou stranách jsou nanášeny kovové elektrody. Jedna strana je pokryta zlatou černí a tvoří tak aktivní plochu detektoru o průměru 8 mm. Optické záření dopadající na pyroelektrický detektor je absorbováno vrstvou zlaté černě.

Tím dojde ke změně teploty krystalu. Pyroelektrický krystal má vlastní elektrickou polarizaci, která se mění s dynamickou změnou jeho teploty. Buzením přerušovaným optickým svazkem vzniká na výstupu detektoru velmi slabý střídavý elektrický signál s periodou shodnou s periodou buzení optického signálu.



**Obr. 10:** Pyroelektrický detektor s demontovanou reflexní hemisférou

Pro realizaci prvků zajišťujících přenos nízké nejistoty měření z aparatury kryogenního radiometru do průmyslových a vědeckých aplikací ve spektrální oblasti IR nejlépe vyhovují detektory založené na polovodičových substrátech Ge a InGaAs. Přenosový etalon celkového zářivého toku infračerveného záření (900 nm – 1650 nm) je tvořen sadou tří polovodičových detektorů na bázi InGaAs značených CMI-SRNIR-01, CMI-SRNIR-02, CMI-SRNIR-03. Velkoplošná polovodičová fotodioda firmy GPD Optoelectronics typ GAP 5000 je umístěna v kovovém pouzdře, které zajišťuje dobré elektromagnetické stínění (**obr. 11**). Aktivní plocha tohoto detektoru je kruhového tvaru o průměru 5 mm.



**Obr. 11:** Velkoplošný detektor InGaAs CMI-SRNIR-01 z trojice detektorů tvořící přenosový etalon celkového zářivého toku infračerveného záření

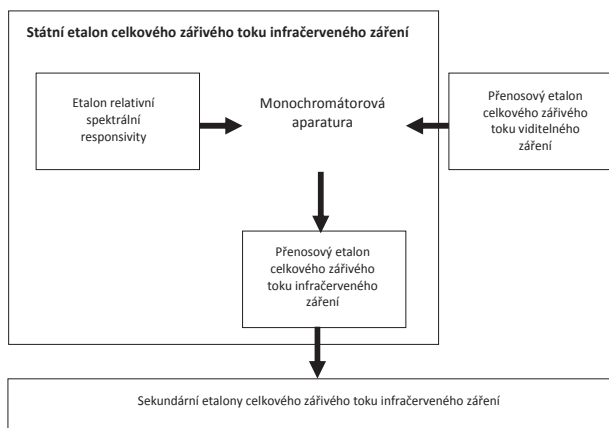
Mezinárodní porovnání usnadňují výměnu informací, které umožní uznání nových hodnot CMC pro spektrální oblast 1000 nm – 1650 nm využívanou především v telekomunikacích.

Již v roce 2004 se ČMI zúčastnil klíčového porovnání EUROMET PR Key Comparison K-2.b „Spectral Responsivity 300 nm to 1000 nm“, které také částečně pokrývá infračervenou spektrální oblast v pásmu vlnových délek 900 nm až 1000 nm. Jako přenosový etalon pro účely porovnání byla použita sada přenosových etalonů celkového zářivého toku (dva velkoplošné křemíkové detektory a dva tříprvkové pasťové detektory). Porovnání spočívalo v měření absolutní spektrální responsivity přenosových etalonů.

V roce 2010 se laboratoř ČMI zúčastnila klíčového porovnání EURAMET.PR-K2.a „Spectral responsivity 900 nm to 1600 nm“. Jako přenosový etalon pro účely porovnání byl použit polovodičový detektor na bázi Ge a InGaAs.

V roce 2007 se laboratoř ČMI účastnila mezinárodního bilaterálního porovnání spektrální responsivity detektorů v infračervené spektrální oblasti s laboratoří SMU – Slovensko. Porovnání prokázalo shodu výsledků v rámci nejistoty měření v celém spektrálním pásmu 900 nm – 1650 nm.

Etalon je umístěn v bezprašné klimatizované laboratoři ČMI LPM Praha, kde jsou dodržovány referenční podmínky: teplota ( $20 \pm 1$ ) °C, vlhkost vzduchu ( $50 \pm 20$ ) %.



Obr. 12: Schéma návaznosti měřidel na primární etalon celkového zářivého toku infračerveného záření

## • Státní etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření

Rok vyhlášení: 2008

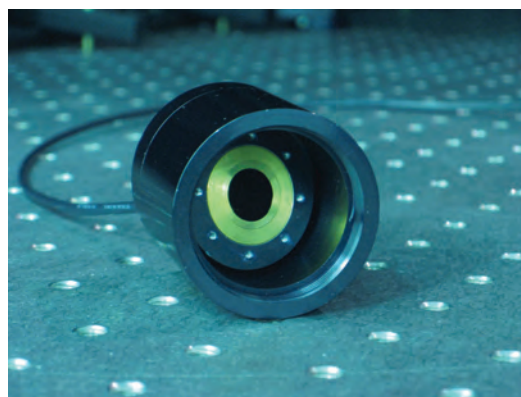
Základní metrologické parametry:

spektrální rozsah	220 nm – 400 nm
spektrální pološířka měřicího svazku FWHM	6 nm nominální
nejistota stupnice vlnové délky	0,1 nm
Celková kombinovaná rozšířená nejistota*	
220 nm < l < 230 nm	2,43 % rel.
230 nm < l < 250 nm	0,61 % rel.
260 nm < l < 400 nm	0,33 % rel.

\*Udaná nejistota je rozšířená nejistota stanovená při úrovni pravděpodobnosti 95 %

Státní etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření byl vyvinut na pracovišti oddělení optické radiometrie a fotometrie v letech 2002 – 2006. Tento měřicí systém, díky aplikaci vyvinutých sofistikovaných metod měření, využití špičkové optické technologie a dosažení vysokého stupně automatizace měření, dosahuje špičkově rozšířené ( $k=2$ ) nejistoty měření na úrovni 0,33 % relativně. Etalon sestává z monochromátorové aparatury, detektoru PYR-26 a sady tří křemíkových velkoplošných detektorů CMI-SRUV-02, CMI-SRUV-08, CMI-SRUV-09.

Na základě výzkumu byl zvolen zdrojem UV záření kontinuální oblouk v argonové atmosféře hořící při atmosférickém tlaku. Světelný svazek je ze zdroje záření reflexní optikou navázán do vstupní štěrbině monochromátoru. Geometrie celé aparatury garantuje vysokou homogenitu zobrazované oblasti na vstupní štěrbině vstupního monochromátoru. Odvod výrazného parazitního tepla systému je řešen výkonným dvou-okružovým vodním chlazením. Před vstupní štěrbinou dvojitého mřížkového monochromátoru je zařazen mechanický přerušovač svazku „chopper“, který zajišťuje modulaci světelného svazku. Pro potlačení vyšších difrakčních řádů mřížky je svazek před vstupem do monochromátoru filtrován sadou separačních filtrů. Při měření temného proudu se využívá závěrky umístěné těsně před sadou separačních filtrů. Opto-mechanická měřicí sestava je umístěna ve světlotěsném krytí na výstupní straně monochromátoru. Světlotěsné krytí zamezuje vlivu okolního záření na výsledky měření. Výstupní svazek monochromátoru je reflexní optikou zaostřen na střed citlivé plochy etalonových detektorů.

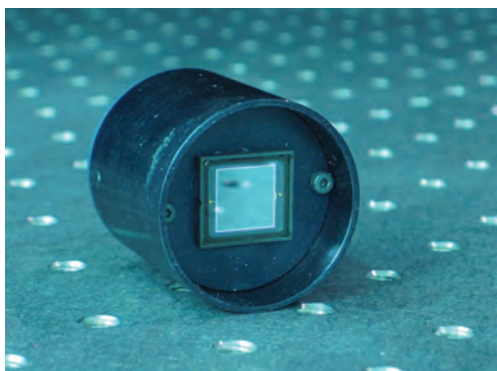


Obr. 13: Pyroelektrický detektor PYR-26

Základem pyroelektrického detektoru (obr. 13) je 50  $\mu\text{m}$  silný pyroelektrický  $\text{LiTO}_3$  krystal o průměru 10 mm. Po obou stranách jsou naneseny kovové elektrody. Jedna strana je pokryta zlatou černí a tvoří tak aktivní plochu detektoru o průměru 8 mm. Optické záření dopadající na pyroelektrický detektor je absorbováno vrstvou zlaté černě. Tím dojde ke změně teploty krystalu. Pyroelektrický krystal má vlastní elektrickou polarizaci, která se mění s dynamickou změnou jeho teploty. Buzení přerušovaným optickým svazkem vyvolává na výstupu detektoru velmi slabý střídavý elektrický signál s periodou shodnou s periodou budicího optického signálu.



Přenosový etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření (220 nm – 400 nm) je tvořen sadou tří polovodičových křemíkových detektorů značených CMI-SRUV-02, CMI-SRUV-08, CMI-SRUV-09 (obr. 14).

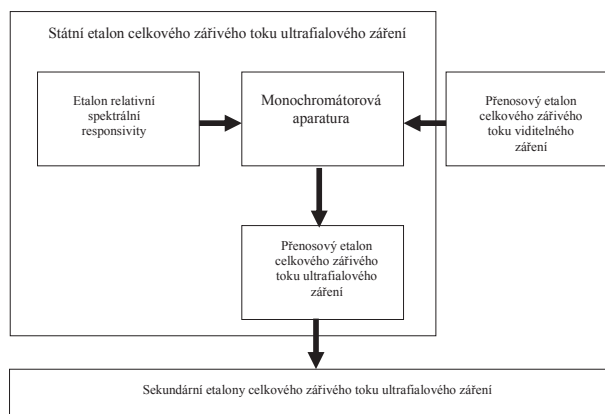


Obr. 14: Křemíkový velkoplošný detektor CMI-SRUV-02 z trojice detektorů tvořící přenosový etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření

Systém je vybaven monitorem okolní teploty s automatickým ukládáním hodnot během měření. Celý systém je plně automatizován a po časově náročném nastavení a vyladění všech parametrů je schopen automatizovaného opakovaného měření zadané úlohy. K řízení celého systému byl v ČMI vytvořen software.

Etalon je umístěn v bezprašné klimatizované laboratoři ČMI LPM Praha, kde jsou dodržovány referenční podmínky: teplota ( $20 \pm 1$ ) °C, vlhkost vzduchu ( $50 \pm 20$ ) %.

Státní etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření je určen především pro kalibraci a porovnávání přenosových etalonů celkového zářivého toku ultrafialového záření, které pak dále zajišťují přenos veličiny na pracovní etalony nebo pro porovnávací měření se zahraničními metrologickými instituty. Státní etalon je používán zhruba z 20 % pro kalibrace nejvyšších etalonů zahraničních laboratoří, nebo špičkových výrobců měřicí techniky.



Obr. 15: Schéma návaznosti měřidel na primární etalon celkového zářivého toku ultrafialového záření

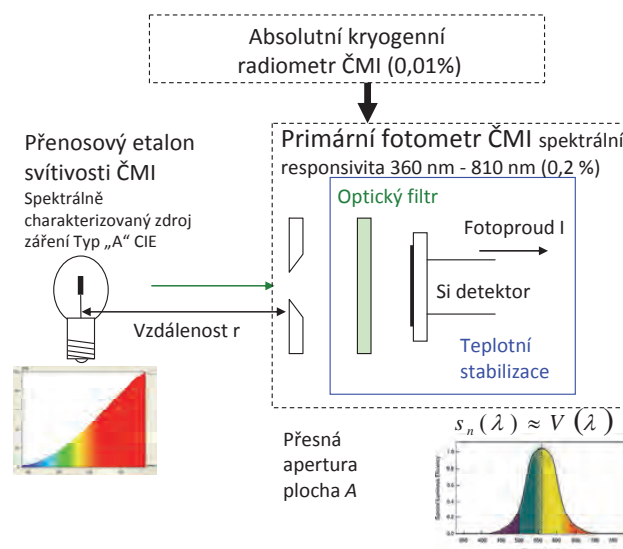
V roce 2008 se laboratoř úspěšně účastnila bilaterálního porovnání spektrální responsivity detektorů registrovaného jako projekt EURAMET.PR-K2.b.1. V seznamu

projektů EURAMET je projekt registrován pod referenčním číslem 1023. Bilaterální porovnání bylo provedené dle technického protokolu zpracovaného WG 8 CCPR BIPM pro účely klíčového porovnání spektrální responsivity detektorů. Porovnání bylo provedeno pro ultrafialovou spektrální oblast na středních vlnových délkách aplikovaného kvazi-monochromatického záření 300 nm až 400 nm s krokem 10 nm.

V roce 2012 se laboratoř úspěšně účastnila doplňkového porovnání EURAMET.PR-S4 „Kalibrace UV- A radiometrů pro relativní vysoké úrovně hodnot ozáření“.

### Fotometrie v ČMI

Současná definice umožňuje řadu možných realizací jednotky svítivosti. Většina národních metrologických institutů dnes realizuje kandelu radiometrickou cestou. Jedna ze špičkových v současnosti dostupných realizací s přímou návazností na absolutní kryogenní radiometr byla vybudována v Českém metrologickém institutu v oddělení optické radiometrie a fotometrie v letech 2000 – 2008 (obr. 16).



Obr. 16: Principiální schéma realizace jednotky svítivosti v ČMI

Primární fotometr ČMI je obecněji vyjádřeno etalonový filtrovaný radiometr v měřicím uspořádání pro spektrálně integrální měření ozáření.

Matematický model fotometru je založený na následujících vztazích [10]:

Světelný tok  $\Phi_v$ , (lm) lze vyjádřit jako:

$$\Phi_v = K_m \int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5)$$

kde  $\Phi_e(\lambda)$  je spektrální zářivý tok světla (W/nm) a  $K_m$  je proporcionální konstanta v definici kandely. Ačkoliv ze striktní definice je  $K_m = 683,002$  lm/W.

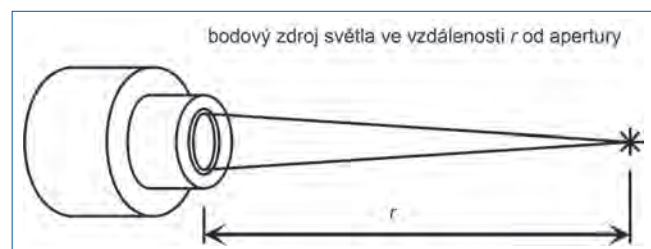
Výstupní proud fotometru  $I$  (ampér, A) je

$$I = \int_{\lambda} \Phi_e(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (6)$$

kde  $s(\lambda)$  (A/W) je jeho spektrální responsivita detektoru. Lze vyjádřit

$$s(\lambda) = s(555) \cdot s_n(\lambda) \quad (7)$$

kde  $s(555)$  je hodnota  $s(\lambda)$  při 555 nm.



Obr. 17: Geometrie pro měření svítivosti etalonovým fotometrem

Na obr. 17 je celková geometrie pro měření svítivosti etalonovým fotometrem. Leží-li bodový světelný zdroj ve vzdálenosti  $r$  od roviny apertury na kolmici k jejímu středu, potom z elementárních geometrických úvah vyplývá, že jeho svítivost  $I_v$  (lm/sr, tj. cd) lze vyjádřit vztahem

$$I_v = \frac{K_m F I \cdot r^2}{s(555) \cdot A} \quad (8)$$

Pro ideální fotometr bude  $s_n(\lambda)$  rovno  $V(\lambda)$  a jeho světelná citlivost musí být nezávislá na spektrálním složení záření světelného zdroje. Pro reálné fotometry tento případ samozřejmě nenastává. V praxi tento postup vyžaduje znalost  $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ , aby mohl být stanoven spektrální korekční faktor  $F$ .

Tento spektrální korekční faktor  $F$  se určí dle vztahu

$$F = \frac{\int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_n(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (9)$$

$V(\lambda)$  je poměrná spektrální světelná účinnost záření – k nejistotě stanovení korekčního faktoru  $F$  nepřispívá

$\Phi_{e\lambda}(\lambda)$  je spektrální hustota zářivého toku měřeného světelného zdroje s relativní rozšířenou nejistotou měření stanovenou jako 1 % s normálním pravděpodobnostním rozdělením

$s_n(\lambda)$  je relativní spektrální citlivost (responsivita) detektoru změřená s relativní rozšířenou nejistotou 0,14 %.

$i$  je foto-proud detektoru zpracovaný trans-impedančním zesilovačem I/U a měřený digitálním voltmetrem s nejistotou 0,01 % s normálním rozdělením

$r$  je vzdálenost od zdroje měřená s nejistotou  $\pm 2$  mm s rovnoměrným rozdělením

$s(555)$  je absolutní spektrální responsivita detektoru na vlnové délce 555 nm stanovená s relativní rozšířenou nejistotou 0,1 % s normálním rozdělením, je navázána na absolutní kryogenní radiometr

$A$  je plocha apertury vypočtená z naměřených souřadnic  $x, y$  bodů rovnoměrně rozložených po jejím obvodu, souřadnice  $x$  i  $y$  byly naměřeny s nejistotou  $\pm 1$   $\mu\text{m}$  s rovnoměrným rozdělením

Z důvodů poměrné složitosti matematického modelu primárního fotometru a zejména jeho nelinearity byla analýza šíření nejistoty provedena metodou Monte Carlo. Výsledná nejistota měření svítivosti primárním fotometrem ČMI byla vyhodnocena na úrovni 0,4 % relativně.

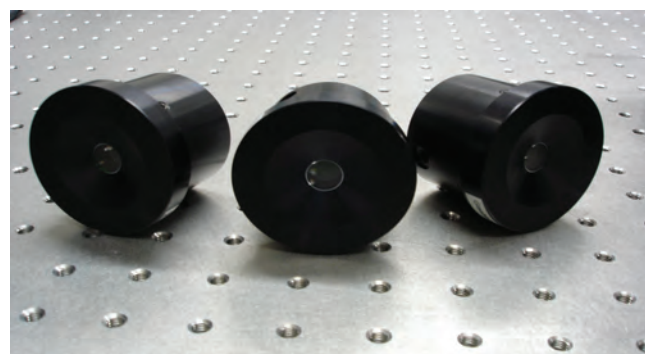
## • Státní etalon svítivosti

V procesu schvalování, plánovaný rok vyhlášení státního etalonu: 2016

V současné době je nejvhodnější způsob realizace jednotky svítivosti založený na bázi detektorové radiometrie a tedy s návazností na primární absolutní kryogenní radiometr. V laboratoři oddělení optické radiometrie a fotometrie je jednotka svítivosti realizovaná prostřednictvím plně charakterizovaného primárního fotometru navázaného na státní etalon celkového zářivého toku viditelného záření (kryogenní radiometr ČMI) v kombinaci s plně spektrálně charakterizovaným normalizovaným zdrojem světla CIE-A.

Na základě zkušeností při vývoji prvního prototypu primárního fotometru v roce 2006, jeho charakterizaci a následném porovnání s primárním etalonem jednotky svítivosti založeným na etalonových žárovkách, byla v roce 2008 jednotka svítivosti, kandela, realizována novou sadou tří kusů detektorových přenosových etalonů přímo navázaných na státní etalon celkového zářivého toku viditelného záření (kryogenní radiometr) a plně spektrálně charakterizovaným normalizovaným zdrojem světla CIE-A.

Přenosové etalony svítivosti byly realizovány jako teplotně stabilizované filtrované radiometry. Základem je křemíková polovodičová fotodioda se spektrálním přizpůsobením fotopické křivce formou plošně homogenního optického filtru. Před fotodiodou předřazená přesná apertura o průměru 11 mm je konstrukčně řešena jako demontovatelná, aby bylo možné její rozměry měření přesně charakterizovat. Apertura je vytvořena napařením Al vrstvy s kruhovým otvorem na křemenné destičce.



Obr. 18: Sady tří přenosových etalonů svítivosti

Světelný tok žárovkového zdroje typu „A“ dopadá na přenosový etalon svítivosti, který je umístěn v defi-

nované vzdálenosti od vlákna žárovky. Jednotlivé etalony (**obr. 18**) jsou značeny CMI-ILL-01, CMI-ILL-02 a CMI-ILL-03. Ke každému etalonu přísluší řídicí jednotka teplotní stabilizace. Generované fotoproudy detektorů jsou dále zpracovávány transimpedančními zesilovači a měřeny digitálním multimetrem.

Klíčovou veličinou pro návaznost přenosového fotometru na absolutní kryogenní radiometr je jeho spektrální responsivita. Spektrální responsivita všech tří přenosových etalonů byla měřena pro celý systém kompletně s předřazeným korekčním filtrem a předřazenou aperturou. Spektrální responsivita přenosových etalonů byla získána přímým porovnáním s přenosovým etalonem celkového zářivého toku viditelného záření – světelnou pastí značenou CMI 1, která byla předtím navázána přímo na státní etalon celkového zářivého toku viditelného záření – kryogenní radiometr. Jako zdroje záření bylo použito halogenové žárovky QTH 400 W a zdroje záření Ar-MaxiArc s bohatším výkonem ve spektrální oblasti 300 nm až 465 nm.

V roce 2007 bylo provedeno porovnávací měření dosavadní sady primárních etalonů jednotky svítivosti založené na etalonových žárovkách s nově realizovaným primárním fotometrem s návazností na primární absolutní kryogenní radiometr ČMI. Výsledky prokazují jednoznačný souhlas obou zdrojů návaznosti.

#### • Etalon celkového světelného toku, zrcadlový Gonio-spektrofotometr

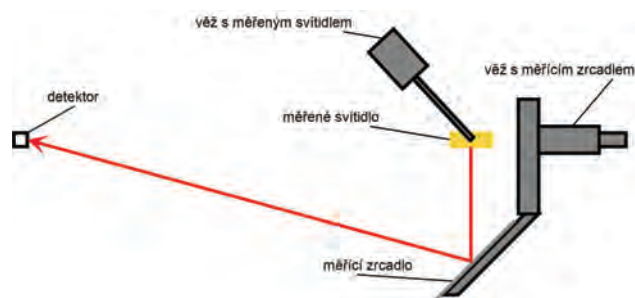
V procesu schvalování, plánovaný rok vyhlášení státního etalonu: 2016

Základní metrologické parametry:

spektrální rozsah	360 nm – 830 nm
nejistota měření vlnové délky	0,2 nm
šířka pásma FWHM	5 nm
délka měřicího ramene goniometru	15,5 m
úhlová přesnost goniometru	0,001° zdroj
	0,01° zrcadlo
spektrální přizpůsobení fotometru fl'	0,8 %

V první polovině roku 2013 byl na pracovišti oddělení optické radiometrie a fotometrie instalován nový gonio-spektroradiometr LG-2.0. Aparatura se stane základem nové realizace jednotky celkového světelného toku v ČMI a v České republice. Přístroj je umístěn v laboratoři fotometrie, v areálu ČMI Hvožd'anská 3, Praha 4.

Aparatura budoucího státního etalonu se skládá z dvou základních věží. Rameno menší věže drží měřený světelný zdroj. Rameno slouží k uchycení a napájení měřeného světelného zdroje a zároveň zajišťuje jeho rotaci kolem jedné osy. Rameno druhé věže nese oválné zrcadlo (1,9 m x 1,4 m), které obíhá kolem měřeného světelného zdroje ve vzdálenosti 2 m. Ve vzdálenosti 15,5 m od měřeného světelného zdroje je umístěn detektor – etalonový fotometr respektive spektrofotometr. Schématické znázornění aparatury je uvedeno na **obr. 19**.



Obr. 19: Princip měření na zrcadlovém goniofotometru

Svítivost  $I$  bodového zdroje je rovna světelnému toku obsaženému v jednotlivém prostorovém úhlu:

$$I = d\Phi / d\Omega \quad (10)$$

kde:

$d\Phi$  je okamžitý světelný tok  
 $d\Omega$  je prostorový úhel

Gonio-spektrofotometr měří etalonovým fotometrem prostorové rozložení svítivosti  $I(\theta, \varphi)$ , takže získáme směrovou vyzařovací charakteristiku zdroje. Celkový světelný tok měřeného zdroje se vypočítá podle vztahu:

$$\Phi = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} I(\theta, \varphi) \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (11)$$

kde:

$I(\theta, \varphi)$  je svítivost v prostorovém úhlu  
 $\theta$  je azimutální úhel roviny měření  
 $\varphi$  je polární úhel roviny měření

Měření svítivosti je navázáno na připravovaný státní etalon svítivosti ČMI. Zabudovaný precizní spektrometr slouží ke stanovení nejistoty dané zbytkovým spektrálním nepřizpůsobením etalonového fotometru či k případné aktivní korekci naměřených hodnot.



Obr. 20 a: Měření prostorových fotometrických a spektro-radiometrických vlastností optických zdrojů





**Obr. 20 b:** Pohled na detekční systém etalonu složeného ze spektrálně korigovaného přesného fotometru a absolutního spektrometru

Význam tohoto etalonu narůstá zejména s rozvojem nových světelných technologií založených na světelných diodách (LED) a organických světelných diodách (OLED). Jejich optické vlastnosti a světelně-technické parametry již nelze v žádném případě odvozovat od příkonu elektrického napájení, jejich spektrální složení je výrazně odlišné od současných konvenčních světelných zdrojů a díky své konstrukci mají výrazně směrové vlastnosti. Aparatura zrcadlového gonio-spektrofotometru umožňuje měření prostorových fotometrických a spektro-radiometrických vlastností optických zdrojů záření v plném viditelném spektru 360 nm až 830 nm.

Aparatura umožňuje provádět testy podle gonio-spektro-radiometrických standardů, např. CIE 121, CIE 84, CIE 70 a CIE 43 a zejména podle připravované globálně harmonizované normy pro testování LED/OLED světelných zdrojů ISO CIE TC2-71. Gonio-spektrofotometr dokáže detailně charakterizovat světelně-technické parametry světelných zdrojů jako je směrová vyzařovací charakteristika a celkový světelný tok. Díky zabudovanému přesnému spektrometru umožňuje měření spektrální charakteristiky světelného zdroje v různých úhlech a umožňuje tak výpočet dalších prostorově závislých parametrů, charakterizujících měřený zdroj světla [24, 25]:

- trichromatické souřadnice,
- teplota chromatičnosti ( $T_c$ ),
- všeobecný index podání barev ( $R_a$ ),
- dominantní a průměrná vlnová délka,
- % spektrální energetické statistiky.

Součástí měření je vždy i měření elektrických parametrů napájení měřeného světelného zdroje.

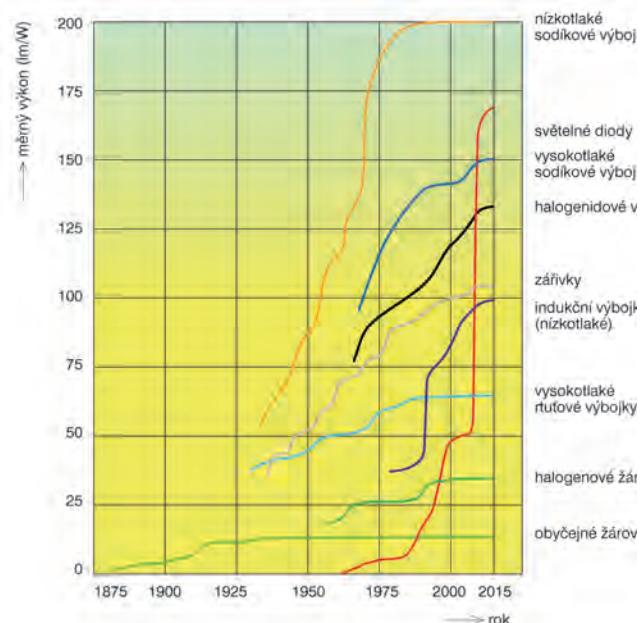
Měření se provádí ve fotometrické laboratoři, která je temperována na  $(24 \pm 2)$  °C. Tento předpoklad je nutný pro provedení přesného měření, protože optické hodnoty jsou teplotně závislé. Dále je nutné se vyvarovat příliš prašnému

prostředí, protože v důsledku znečištění zrcadlové plochy prachem či jinými nečistotami může dojít ke zkreslení výsledků měření.

## SVĚTELNÉ ZDROJE

Osvětlení zajišťuje bezpečnost, zvýrazňuje architekturu, a zlepšuje kvalitu života. Bereme to jako samozřejmost a často si všimneme pouze jeho nepřítomnosti. Podle IEA (International Energy Agency) představuje osvětlení téměř 20 % světové spotřeby elektrické energie. S rychlým vývojem měst po celém světě, je zásadní inovovat světelně-technické výrobky, které optimalizují náklady na energii a snadno se přizpůsobují místním potřebám a umožňují efektivně rozsvítit naše města, domy, školy a rekreační oblasti.

Tělesa vyzařující optické, zpravidla viditelné záření se nazývají světelné zdroje (s.z.). Mohou být přírodní nebo umělé. Těleso vyzařující světlo, jež vzniklo v něm samém přeměnou energie je prvotní (primární) světelný zdroj. Umělý s.z. přeměňuje některý druh energie (elektrické, chemické, biologické) na energii elektromagnetického záření v optickém intervalu spektra. Pro osvětlení mají v současné době největší význam elektrické s.z.. Podle principu vzniku světla se elektrické s.z. dělí na zdroje teplotní (obyčejné a halogenové žárovky), výbojové (zářivky, kompaktní zářivky, vysokotlaké rtuťové, směšové a halogenidové výbojky, nízkotlaké a vysokotlaké sodíkové výbojky, xenonové výbojky aj.) a elektroluminiscenční (světelné diody LED). Podrobnější členění lze nalézt v [1].



**Obr. 21:** Zvyšování měrného výkonu základních skupin světelných zdrojů od jejich vzniku.

Elektrické s.z. zaznamenaly v průběhu své existence významný vývoj z hlediska své účinnosti (**obr. 21**), užitných vlastností, použitých konstrukčních materiálů a úrovně technologie jejich výroby. Zatímco účinnost teplotních s.z. vyjádřená hodnotou jejich měrného výkonu (lm/W) dosáh-



la již fyzikální hranice svých možností, nejmladší skupina s.z. – světelné diody – zaznamenává v posledních 10 letech nebývalý rozvoj a postupně vytlačuje řadu konvenčních s.z. do technických muzeí. Špičkové výrobky na bázi LED čipů u nejlepších firem již překonaly všechny ostatní skupiny s.z. a pronikají i do oblastí, kde se s jejich nasazením vůbec nepočítalo. V současné době se jejich měrný výkon pohybuje okolo 180 lm/W – 190 lm/W, **přičemž měrný výkon čipů, které jsou základním stavebním kamenem LED světelných zdrojů dosáhl špičkové hodnoty 303 lm/W.**

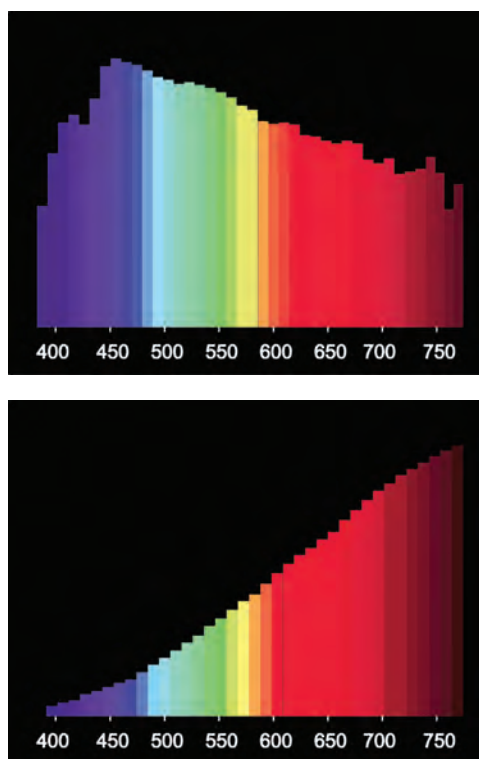
V dalším textu jsou uvedeny základní vlastnosti nejpoužívanějších skupin světelných zdrojů, které jsou důležité z hlediska uživatele i z hlediska jejich měření a hodnocení.

### Teplotní světelné zdroje

Základem funkce teplotních zdrojů je určitý způsob zahřívání těles na teploty, při nichž se objevuje viditelné záření (světlo). Do této skupiny patří nejen všechny druhy plamene, ale především žárovky obyčejné a halogenové.

#### Obyčejné žárovky

Obyčejné žárovky jsou celosvětově zatím nejrozšířenějšími světelnými zdroji. U současných žárovek se jako svítící těleso používá výhradně vlákno zhotovené z tenkého wolframového drátu svinutého do jednoduché, dvojité někdy i trojitě šroubovice, svítící v prostředí inertních plynů. K hlavním přednostem žárovky patří její vhodný tvar, jednoduchá konstrukce, malé rozměry a malá hmotnost, spojité spektrum vyzařovaného světla (**obr. 22**) [24], které má příjemný teplý odstín, charakterizovaný teplotou chromatičnosti 2 700 K – 2 900 K.

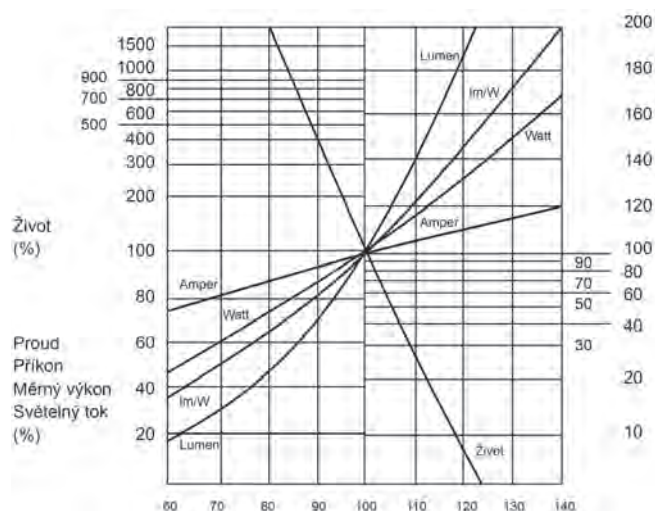


Obr. 22: Poměrné spektrální složení denního světla D65 a světla žárovek

Podání barev osvětlovaných předmětů (všeobecný index podání barev  $R_a = 100$ ) je vynikající. Start je okamžitý, bez blikání, svícení stabilní, bez míhání (v důsledku dostatečně velké tepelné setrvačnosti vlákna). Světelný tok se ustálí téměř okamžitě po připojení napájecího napětí. Pro svůj provoz nepotřebují žádné předřadné zařízení. U žárovky existuje široký interval přípustných provozních teplot, vliv okolní teploty na její parametry je zanedbatelný.

K dalším výhodám patří libovolná poloha svícení a téměř nulová úroveň nežádoucího ultrafialového záření. Základním nedostatkem všech běžných žárovek je velmi malý měrný výkon, jejich relativně krátký život (1 000 h), velký pokles světelného toku v průběhu života (více než 20 %) a výrazná závislost parametrů žárovek, zejména života, na napájecím napětí (**obr. 23**).

S touto závislostí je třeba počítat nejen při aplikaci v provozu, ale i při používání žárovkových etalonů při měření světelného toku, svítivosti, jasu, teploty chromatičnosti apod.



Obr. 23: Závislost základních parametrů žárovky na napájecím napětí (%)

Energetická účinnost přeměny elektrické energie na světelnou je u vakuových žárovek asi 7 %, u žárovek plněných plynem asi 10 %. Vztáhne-li se tento parametr na citlivost lidského oka, tj. vypočítá-li se světelná účinnost uvedené přeměny přiváděné energie, dosáhne se hodnoty ještě nižší – u vakuových žárovek 1,5 % – 2 %, u žárovek plněných plynem 3 % – 4 %. Tato skutečnost byly rozhodujícím argumentem pro postupné vyřazení žárovek určených pro všeobecné osvětlení z prodeje v souvislosti s přijetím závazných legislativních opatření EU i dalších vyspělých států světa. Přesto existuje řada speciálních aplikací, kde jejich použití je opodstatněno (např. žárovky pro promítací účely nebo žárovky používané jako pracovní etalony pro řadu fotometrických měření, které se vyznačují speciálním konstrukčním provedením vlákna apod.

Proto stručná zmínka o těchto světelných zdrojích a jejich základních vlastnostech v tomto článku má své opodstatnění“).

### Halogenové žárovky

Halogenové žárovky jsou žárovky plněné plynem s příměsí halogenů nebo jejich sloučenin. V 50. letech se objevily první informace o žárovkách, do jejichž plynné náplně se přidával jod s cílem potlačit usazování wolframu na baňce, zvýšit stabilitu světelného toku během svícení a prodloužit tak jejich život. Halogenové žárovky ve své době představovaly novou generaci teplotních s.z. Díky použití nových materiálů (křemenné sklo pro baňku a vhodné příměsi do plynné náplně) bylo možné využít halogenový cyklus, který je základním předpokladem dosažení žádoucích parametrů žárovky. Výsledkem je čistá baňka, na níž se v průběhu svícení neusazuje wolfram a delší život vlákna a tedy i celé žárovky.

Spektrální složení světla halogenových žárovek je obdobné jako u žárovek obyčejných, avšak s ohledem na zpravidla vyšší teplotu vlákna je průběh charakteristické křivky strmější a maximální intenzita vyzařování je posunuta směrem ke kratším vlnovým délkám – světlo je bělejší.

K výhodám halogenových žárovek – vedle těch, které již byly uvedeny u obyčejných žárovek – patří příjemné bílé světlo s vyšší teplotou chromatičnosti 2 900 K až 3 100 K, u speciálních typů až 3 400 K (přitom však život klesá na 15 h), lepší stabilita světelného toku a teploty chromatičnosti v průběhu svícení (úbytek světla během života zpravidla nepřevyšuje 5 % počáteční hodnoty), vyšší účinnost přeměny elektrické energie na světelnou při stejném životě. Při stejném měrném výkonu mají delší život (u běžných halogenových žárovek jmenovitý život dosahuje 2000 h až 5000 h. Žárovka má kompaktní rozměry, které umožňují konstruovat menší a materiálově úspornější svítidla (např. ve světlometech automobilů), při jejich vyšší účinnosti.

K nevýhodám halogenových žárovek patří podstatně náročnější technologie výroby, zejména u žárovek s nízkým příkonem (nižším než 100 W na síťové napětí) a vyšší cena. U žárovek na malé napětí třeba používat konvenční nebo elektronický transformátor. Parametry halogenových žárovek jsou značně závislé na napájecím napětí (obdobně jako u obyčejných žárovek). Další nevýhodou je i omezenější možnost stmívání – při dlouhodobějším provozu při výrazně nižším napětí již neprobíhá halogenový cyklus a baňka ztmavne. Některé typy, u nichž se nepoužívá speciální křemenné sklo, vydávají nežádoucí UV záření. Přes určité zlepšení jejich parametrů a atraktivní sortiment však nutno vzít v úvahu, že i halogenová žárovka je teplotní s. zdroj s poměrně velmi nízkou energetickou účinností, byť o poznání lepší než u obyčejných žárovek.

I zde tedy platí omezení dané fyzikálním principem vzniku světla nažhavením wolframového vlákna a ani jeho provoz v prostředí s příměsí vhodných halogenů neumožňuje po dostatečně dlouhou dobu svícení dosáhnout vyšší účinnosti než 20 lm/W až 26 lm/W. Další zvýšení účinnosti halogenových žárovek má smysl pouze u žárovek pro speciální účely, např. ve fotografii, při podstatně kratší době života, nebo pro dekorativní osvětlení a stejně i na tuto skupinu světelných zdrojů se vztahují legislativní opatření na výrazné omezení jejich prodeje.

### Výbojové světelné zdroje

Základem funkce výbojových s.z. jsou procesy související s průchodem elektrického proudu prostředím obsahujícím vhodné páry nebo plyny a jejich směsi. Jedná se zejména o páry rtuti, sodíku, halogenidů řady chemických prvků používané společně se vzácnými plyny.

Lze je rozdělit podle různých kritérií [1], ale nejčastěji se dělí podle tlaku pracovní náplně na výbojky nízkotlaké (lineární a kompaktní zářivky, nízkotlaké sodíkové výbojky, germicidní a spektrální výbojky), vysokotlaké (rtuťové, sodíkové, halogenidové, sirné) a výbojky s velmi vysokým tlakem (rtuťové, xenonové, halogenidové, aj.).

#### Lineární zářivky

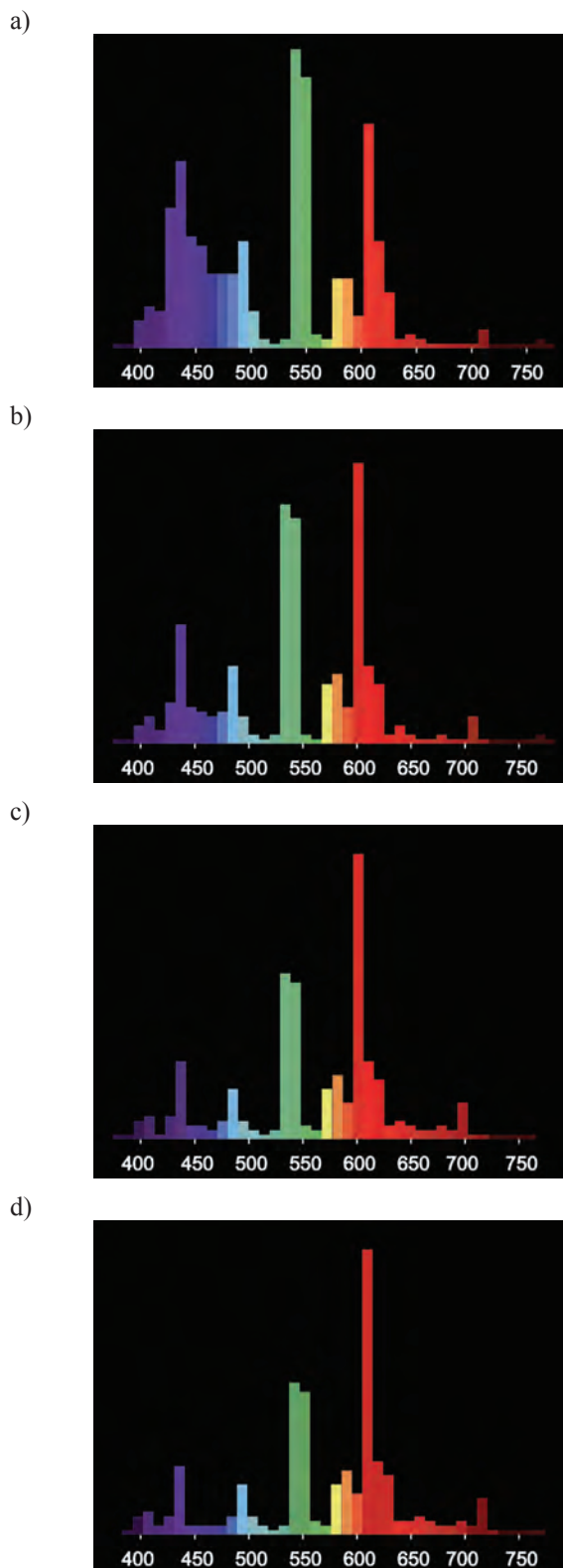
Zářivka je nízkotlaká rtuťová výbojka, v níž je hlavní část světla vyzařována jednou nebo několika vrstvami luminoforu buzeného ultrafialovým zářením výboje [27]. Vlastní výboj probíhá v nasycených parách rtuti při tlaku (asi 0,8 Pa) odpovídajícím teplotě nejnižšího místa zářivky (asi 42 °C při pokojové teplotě a v neuzavřeném svítidle) a v inertním plynu (obvykle argon nebo směs argonu s kryptonem), který snižuje zápalné napětí výboje a zabraňuje rychlému rozprašování emisní hmoty z katody.

V závislosti na typu použitého luminoforu lze dosáhnout různého spektrálního složení vyzařovaného světla, různého měrného výkonu a všeobecného indexu podání barev  $R_a$ . Významné úspěchy ve vývoji luminoforů dovolily konstruovat velmi účinné zářivky při zachování velmi dobré kvality vyzařovaného světla.

Další významný pokrok v produkci zářivek byl podmíněn úspěchy v elektronice, které umožnily dále optimalizovat podmínky funkce rtuťového výboje, realizovat provoz při vysoké frekvenci, zmenšit rozměry zářivek, a uvést tak na trh novou generaci zářivek s měrným výkonem vyšším než 100 lm/W při  $R_a$  převyšujícím hodnotu 80. Vysoká frekvence (u moderních předřadníků převyšující 30 kHz) má vedle větší účinnosti (až o 10 %) i další významné přednosti. Jde zejména o rychlý start bez blikání (navíc šetrný ke katodě), stabilní svícení bez míhání, na které může být lidské oko při frekvenci napájecího napětí 50 Hz ještě citlivé a úplné potlačení stroboskopického jevu.

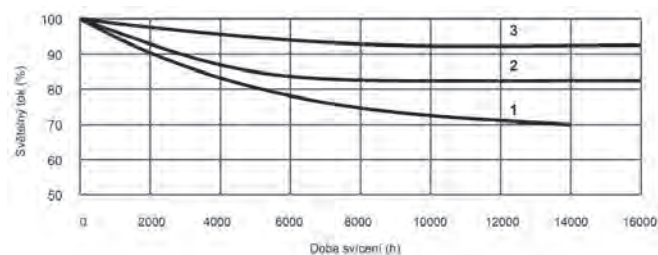
K hlavním přednostem zářivek patří vysoká účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, dosahující při vysokofrekvenčním napájení až 104 lm/W, při  $R_a$  dosahujícím hodnoty až 80, vhodné geometrické parametry, umožňující konstruovat materiálově úsporná svítidla s jednoduchou konstrukcí, velmi široký sortiment příkonů od 4 W do přibližně 200 W, velmi široký sortiment barev vyzařovaného světla, charakterizovaný náhradní teplotou chromatičnosti 2 700 K až 17 000 K [28] (**obr. 24**).

U speciálních typů lze získat  $R_a$  až 98 při velmi dobrém měrném výkonu. Výhodou je i dlouhý život, který u některých speciálních typů dosahuje více než 20 tisíc hodin při dobré stabilitě světelného toku v průběhu svícení (**obr. 25**).



Obr. 24: Poměrné spektrální složení světla vybraných typů zářivek

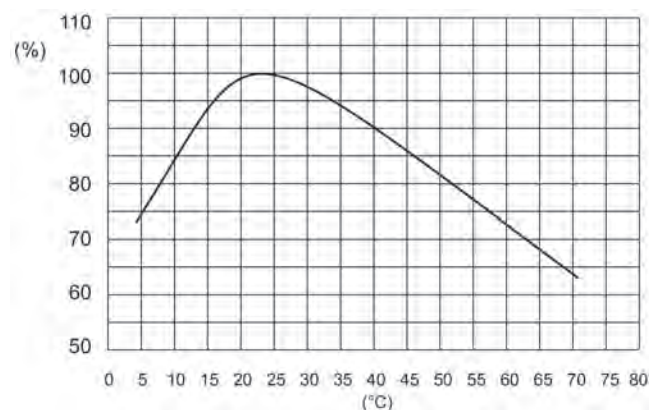
- zářivka chladně bílá s třípásmovým luminoforem  $R_a > 80$
- zářivka neutrálně bílá s třípásmovým luminoforem  $R_a > 80$
- zářivka teple bílá s třípásmovým luminoforem  $R_a > 80$
- zářivka typu Interner s třípásmovým luminoforem  $R_a > 80$



Obr. 25: Pokles světelného toku zářivek v průběhu svícení

- standardní zářivky
- zářivky s třípásmovými luminofory
- zářivky se zmenšeným množstvím rtuti a ochrannou vrstvou mezi trubicí a luminoforem

K nedostatkům zářivek patří závislost jejich světelného toku na teplotě okolního prostředí (obr. 26), potřeba předřadných a startovacích obvodů, které částečně snižují měrný výkon osvětlovací soustavy jako celku, vliv počtu zapnutí na život zářivky (je významnější u zapojení s tlumivkou a doutnavkovým startérem, méně významný u bezstartérových zapojení a zejména u kvalitních elektronických předřadníků zajišťujících dostatečné předžhavení elektrod před zapálením výboje). Velký vliv teploty okolního prostředí na světelný tok zářivek nutno brát v úvahu i při fotometrických měřeních jejich parametrů. Další nevýhodou je obsah toxické rtuti, pro niž nelze zářivky po ukončení jejich života odkládat do komunálního odpadu, ale je nutné je likvidovat u pověřených organizací.



Obr. 26: Závislost světelného toku zářivky na teplotě okolního prostředí

### Kompaktní zářivky

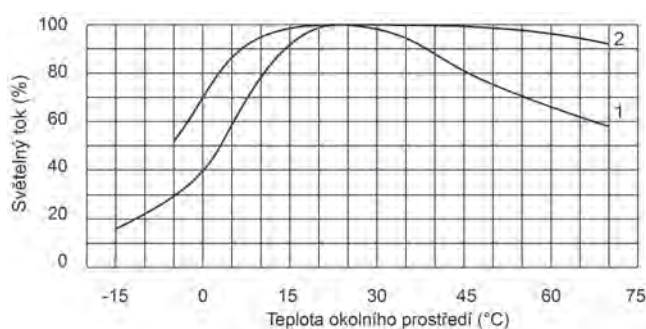
V širokém sortimentu světelných zdrojů dlouhou dobu citelně chyběly typy, které by se svým světelným tokem, geometrickými parametry a kvalitou podání barev blížily obyčejným žárovkám o příkonu 25 W až 200 W (jejichž světelný tok při životě 1 000 hodin leží v rozmezí 230 lm až 3 200 lm) a zároveň by při konkurenceschopné ceně měly v porovnání s nimi podstatně větší účinnost a delší život. Toto místo začaly postupně zaplňovat kompaktní zářivky, jejichž světelný tok se pohybuje v požadovaném rozsahu při měrném výkonu 50 lm/W až 80 lm/W (v porovnání s 9 lm/W až 15 lm/W u žárovek) a podstatně delším životě (pět až dvacetkrát delším než život žárovek).



Zvláště zajímavé jsou kompaktní zářivky s integrovaným elektronickým předřadníkem a klasickou závitovou patičí. Jejich rozvoj je nebyvale dynamický, neustále je rozšiřován jejich sortiment, zmenšovány jejich vnější rozměry, zvyšována jejich účinnost a prodlužován život při současném nezanedbatelném snižování jejich ceny.

Fyzikální princip činnosti kompaktní zářivky je obdobný jako u lineárních zářivek. Jde tedy opět o nízkotlakou rtuťovou výbojku, v níž je hlavní část světla vyzařována vrstvou luminoforu buzeného ultrafialovým zářením výboje a jejich vlastnosti (kromě obrysových rozměrů) jsou podobné vlastnostem lineárních zářivek.

Vyznačují se vysokou účinností při velmi dobrém podání barev, vyrábějí se v širokém sortimentu základních odstínů bílé barvy, mají dlouhý život, jsou stmívatelné. Spektrální složení energie rovněž odpovídá spektrálnímu složení záření lineárních zářivek využívajících třípásmové luminofory. Negativní vliv okolní teploty řeší vyspělí výrobci používáním amalgámů vhodných kovů, které rozšiřují teplotní interval, v němž si světelný tok zářivek udržuje hodnotu blízkou optimální (**obr. 27**).



**Obr. 27:** Závislost světelného toku kompaktní zářivky na teplotě okolního prostředí

- 1 – standardní zářivka – náplň čistá rtuť
- 2 – zářivka, do níž se rtuť dávkuje ve formě vhodného amalgámu – např. amalgámu india

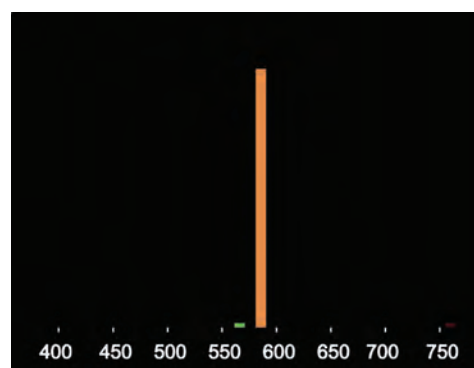
Zajímavé z hlediska uživatele je umístění výbojové trubice zářivek s malými příkony (do maximálně 23 W) do přídatné vnější baňky různého tvaru (hruškový, kulový, svíčkový, hříbkový apod.) s rozptylnou vrstvou nebo do vnějšího integrovaného reflektoru. Základním důvodem tohoto uspořádání je co nejvíce ji přiblížit obrysovými rozměry i křivkou rozložení svítivosti obyčejným matovaným, reflektorovým, popř. dekoračním žárovkám. Toto řešení se v současnosti uplatňuje výhradně u kompaktních zářivek s integrovaným elektronickým předřadníkem.

Kompaktní zářivky s integrovaným elektronickým předřadníkem pracují ve vysokofrekvenčním režimu, se všemi z něho vyplývajícími výhodami (téměř okamžitý start – do 1 s – bez blikání a stabilní provoz bez míhání, potlačení stroboskopického jevu. Trvale se zdokonalující součástková základna pozitivně ovlivňuje spolehlivost, rozměry a cenu elektronických předřadníků. Kompaktní zářivky mají velmi nízký obsah rtuti (zejm. výrobky renomovaných firem).

Z hlediska měření lineárních a kompaktních zářivek nutno vzít v úvahu, že oba typy dosahují svých ustálených parametrů po uplynutí 10 minut až 15 minut od zapnutí.

### Nízkotlaké sodíkové výbojky

Nízkotlaké sodíkové výbojky jsou světelné zdroje, v nichž je světlo vyzařováno sodíkovými parami s provozním parciálním tlakem v rozmezí (0,1 až 1,5) Pa [27]. Výboj v parách sodíku je ze světelně technického hlediska velmi zajímavý a jeho verze při nízkém tlaku našla uplatnění již v třicátých letech minulého století právě v nízkotlakých sodíkových výbojkách, v nichž tlak par sodíku při pracovní teplotě 270 °C dosahuje hodnoty asi 0,5 Pa. Sodík se vyznačuje intenzivním rezonančním zářením ve žluté části viditelného spektra s vlnovou délkou 589,0/589,6 nm, která se blíží maximu spektrální citlivosti lidského oka. Spektrální složení energie těchto výbojek je uvedeno na **obr. 28** [25]. V současné době dosahuje měrný výkon nejvýkonnějšího typu těchto výbojek u špičkových výrobců hodnoty téměř 200 lm/W, takže nízkotlaké sodíkové výbojky jsou zatím nejúčinnější umělé světelné zdroje vůbec.



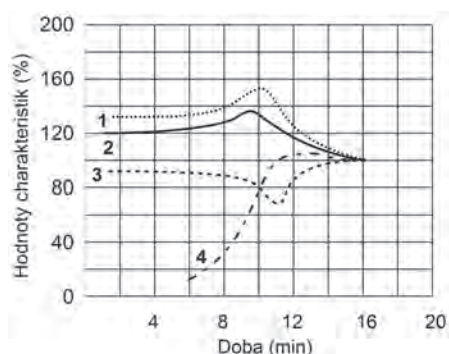
**Obr. 28:** Poměrné spektrální složení světla nízkotlakých sodíkových výbojek

Nízký gradient potenciálu nízkotlakého výboje v parách sodíku omezuje horní hranici příkonu výbojky, takže zvýšení příkonu a tedy i světelného toku při zachování vysokého měrného výkonu, je nutně doprovázeno prodloužením výbojové dráhy a tedy i celkové délky výbojky. Z tohoto důvodu jsou hořáky většiny typů výbojek zhotoveny ve tvaru písmene U. Přesto příkon výbojek vyráběných v současné době nepřesahuje 180 W. Hořák se proto plní čistým sodíkem ve velkém přebytku (v porovnání s množstvím, které se aktuálně zúčastňuje výboje) a inertním plynem (směsí neonu s malým množstvím argonu), který chrání elektrodu před rychlým rozprašováním a odpařováním emisní hmoty v průběhu života a usnadňuje zapálení výboje ve studeném stavu, kdy je tlak par sodíku velmi nízký.

V první fázi po zapálení tedy výboj probíhá téměř výhradně v inertním plynu s načervenalou barvou světla typickou pro neon, postupně dochází k ohřátí stěn trubice a ke zvyšování tlaku par sodíku, který se následně stává jediným zdrojem záření. Celý tento proces trvá 10 minut až 12 minut (**obr. 29**). Příznivá energetická bilance a tedy i vysoký měrný výkon výbojky se dosahuje i díky konstrukci výbojky, u níž je na vnitřní stěnu baňky podél celého ho-



řáku nanese tenká vrstva oxidu inditého  $\text{In}_2\text{O}_3$  se selektivními odraznými vlastnostmi, vyznačující se vynikající propustností ve viditelné části spektra a současně vysokým činitelem odrazu v infračervené části spektra.



Obr. 29: Náběhové charakteristiky nízkotlakých sodíkových výbojek

1 – napětí výbojky, 2 – příkon, 3 – proud výbojky  
4 – světelný tok

Nízkotlaké sodíkové výbojky mají díky své náplni a konstrukci hořáku vyšší zápalné napětí, takže pro spolehlivý zápal a stabilní provoz je nutné používat speciální předřadné obvody – obvykle rozptylový transformátor, zapalovací kondenzátor připojený k odbočce tlumivky, anebo hybridní předřadník, jehož součástí je zapalovací zařízení zajišťující dostatečně vysoký napěťový impuls.

Sortiment nízkotlakých sodíkových výbojek se ustálil na příkonové řadě 18 W až 180 W. Tyto výbojky jsou však zdrojem téměř monochromatického záření, což je příčinou velmi špatného podání barev ( $R_a = 0$ ), kdy všechny barvy osvětlovaných předmětů, kromě oranžové, se jeví jako barvy šedé různé sytosti. Náhradní teplota chromatičnosti činí 1800 K.

K hlavním přednostem nízkotlakých sodíkových výbojek patří: vysoký měrný výkon, nízký jas povrchu výbojky, dlouhý život dosahující až 20 tisíc hodin, široký teplotní interval, v němž je účinnost výbojky nezávislá na teplotě okolního prostředí, neobsahuje zdraví škodlivou rtuť, nicméně s ohledem na poměrně vysoký obsah sodíku nutno s vyhořelými výbojkami nakládat stejně jako s ostatními výbojovými světelnými zdroji.

K nevýhodám těchto výbojek patří zejména velmi špatné podání barev, značná pulsace světelného toku vyplývající z velmi malé setrvačnosti nízkotlakého výboje v parách sodíku a vyšší zápalné napětí. Nízkotlaký výboj v parách sodíku je využit rovněž ve spektrálních sodíkových výbojkách určených ke spektrofotometrickým měřením.

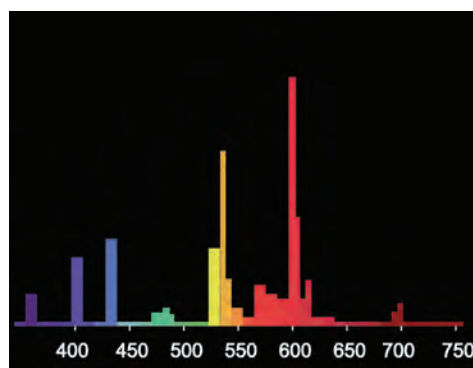
### Indukční výbojky

Zcela novou kategorii nízkotlakých s.z. představují indukční výbojky, v nichž je výboj buzen vnějším vysokofrekvenčním polem. Charakteristickou konstrukční zvláštností této skupiny je skutečnost, že se jedná o bezelektrodové výbojky, což představuje významné technologické zjednodušení při výrobě a současně umožňuje zlepšení jejich provozních parametrů, protože obsahuje menší počet konstrukčních prvků, s nimiž může reagovat vnitřní náplň.

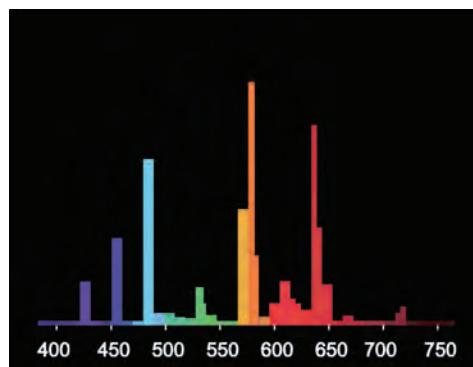
Hlavní technická složitost spočívá v zajištění příslušného napájecího zdroje, jehož technická úroveň, spolehlivost, život a cena zásadně ovlivňují nasazení indukčních výbojek do osvětlovací praxe. I když na principu vysokofrekvenčního buzení výbojek v bezelektrodovém prostoru se pracuje v laboratořích světových firem celá desetiletí, výbojku použitelnou v reálné praxi se podařilo uvést na trh teprve v roce 1991 pod označením QL (Philips).

V současné době již existují řady typů těchto s.z., lišících se mechanismem buzení výboje (s vnitřní anebo vnější budicí cívkou), budícím kmitočtem napájecího obvodu (250 kHz resp. 2,65 MHz a 13,6 MHz), konstrukčním uspořádáním vlastního výbojového prostoru a tedy i výslednými světelně technickými a elektrickými parametry.

Společným konstrukčním prvkem indukčních výbojek je náplň výbojové trubice. Výboj probíhá v parách rtuti a v argonu a je obdobně jako u lineárních a kompaktních zářivek zdrojem intenzivního UV-záření s výraznými spektrálními rezonančními čarami s vlnovou délkou 185 nm a 254 nm. Toto záření je transformováno pomocí luminoforu, naneseného na vnitřní stěny výbojky, na viditelné záření. Rovněž typ luminoforu je analogický jako u zářivek nejnovější generace. Jedná se o tzv. třípásmové luminofory na bázi aluminátů nebo fosfátů aktivovaných prvky vzácných zemin. Vzájemný poměr jednotlivých složek luminoforu určuje teplotu chromatičnosti, která se nachází v rozmezí 2700 K až 4000 K a jejich kvalita zajišťuje vysokou účinnost při současném vynikajícím podání barev charakterizované hodnotou  $R_a > 80$ . Spektrální složení energie těchto výbojek je uvedeno na obr. 30 [26].



a) výbojka teple bílá  $T_{cp} = 2700 \text{ K}$



b) výbojka neutrálně bílá  $T_{cp} = 4000 \text{ K}$

Obr. 30: Poměrné spektrální složení světla indukčních výbojek QL

Pracovní rozsah provozních teplot, v němž mohou být výbojky provozovány bez významného negativního ovlivnění účinnosti, je rozšířen použitím kombinace amalgámů vhodných kovů. Toto řešení zároveň zkracuje dobu náběhu, během níž výbojka dosáhne své jmenovité hodnoty. Výbojky se vyznačují všemi přednostmi, které poskytuje provoz na vysoké frekvenci a jež jsou uvedeny v kapitole věnované zářivkám. Indukční výbojky spojují velmi dobré vlastnosti moderních lineárních zářivek (vysoký měrný výkon při velmi dobrém podání barev) s kompaktními rozměry, vyznačují se dlouhým životem (řádově desítky tisíc hodin) a dobrou stabilitou světelného toku během života. K nedostatkům patří především omezení příkonu směrem k vyšším hodnotám (hodnoty příkonu u současného sortimentu se pohybují v rozmezí 55 W až 165 W), vyplývající z principu nízkotlakého rtuťového výboje s luminoforem, kde zvýšení světelného toku je podmíněno zvětšením plochy pokryté luminoforem a tedy i zvětšením rozměrů výbojky a zatím i jejich vysoká cena.

V předcházející části jsme se seznámili s nízkotlakými výbojkami. Další část je věnována vysokotlakým s.z. (k hlavním představitelům patří vysokotlaké rtuťové a směsové výbojky, vysokotlaké sodíkové výbojky a halogenidové výbojky), u nichž je mechanismus vzniku světla odlišný od s.z. nízkotlakých. Rozdílné podmínky funkce výboje (zejména pracovní teplota a tlak svítící náplně) se promítly i do konstrukce těchto typů s.z. Výboj probíhá v hořáku zhotoveném z teplotně odolných materiálů (křemene nebo oxidu hlinitého), který je umístěn ve vnější baňce, která plní několik funkcí. Stabilizuje teplotní a tedy i elektrický režim výbojky a tím i její světelný tok, pohlcuje nežádoucí ultrafialové záření a příp. slouží jako plocha k nanesení vrstvy luminoforu. Při postupném zvyšování tlaku rtuťových par a zvyšování proudové hustoty dochází k posunu vyzařované energie směrem k větším vlnovým délkám, k růstu měrného výkonu a ke vzniku spojitého spektra, jehož intenzita s narůstajícím tlakem rtuťových par rovněž roste.

Hlavní podíl záření připadá na nerezonanční čáry, z nichž část leží v UV a čtyři velmi intenzivní ve viditelné modro-zelené oblasti spektra (404 nm až 407 nm, 436 nm, 546 nm a 577 nm). Přes poměrně velký měrný výkon (50 lm/W až 60 lm/W) však takový zdroj není vhodný pro účely všeobecného osvětlení, protože ve spektru jeho světla zcela chybí červená složka. Podání barev osvětlovaných předmětů a zejména lidské pokožky je z uvedeného důvodu naprosto nevyhovující. Proto se hledaly způsoby, jak odstranit tento nedostatek a zlepšit spektrum vyzařovaného světla. Jsou k tomu tyto možnosti:

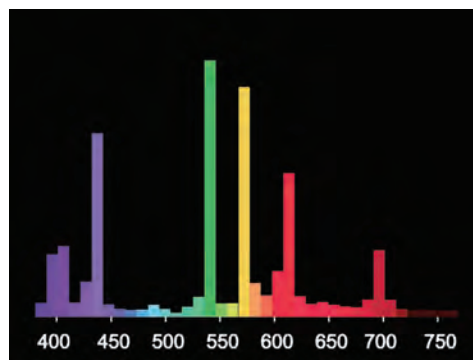
1. transformace bohatého UV záření vysokotlakého rtuťového výboje vhodným luminoforem na chybějící záření v červené oblasti spektra. Tento způsob se využívá u vysokotlakých rtuťových výbojek s luminoforem (spektrální složení světla viz **obr. 31**) [26].
2. kombinace modro-zeleného záření vysokotlakého rtuťového výboje se světlem žárovek. Tím lze dosáhnout podstatného zvýšení červené složky, i když na úkor měrného

výkonu Tento způsob se využívá u směsových výbojek, u nichž se navíc využívá i záření luminoforu (spektrální složení světla viz **obr. 32**) [26].

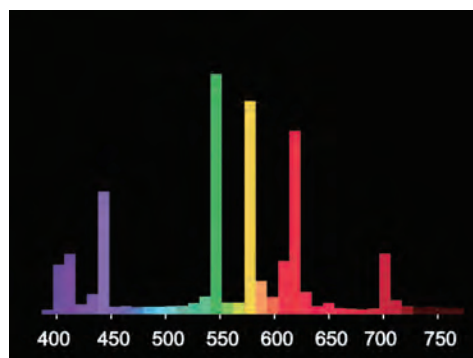
3. přidání dalších vhodných svítících prvků do rtuťového výboje, jejichž záření vyplňuje mezery mezi viditelnými čarami rtuť. V šedesátých letech byl objeven nový způsob vnášení svítících příměsí do rtuťového výboje v podobě příslušných halogenidů. Tento způsob se využívá u halogenidových výbojek.
4. náhrada rtuť jiným prvkem s vhodnějším spektrem ve viditelné oblasti. Zde se otevřelo široké pole působnosti zejména v souvislosti s vývojem dalších materiálů vhodných k výrobě hořáku výbojky (např. korundová keramika). Tento způsob je využit např. u vysokotlakých sodíkových výbojek a u halogenidových výbojek s hořákem z oxidu hlinitého.

### Vysokotlaké rtuťové výbojky

Vysokotlaké rtuťové výbojky jsou světelné zdroje, v nichž hlavní část světla vzniká ve rtuťovém výboji při parciálním tlaku převyšujícím 100 kPa [27]. Tato definice se vztahuje na výbojky s čirou vnější baňkou i s baňkou pokrytou luminoforem, v nichž část světla vzniká ve výboji a část ve vrstvě luminoforu vybuzeného ultrafialovým zářením výboje.



a) výbojka standardní



b) výbojka se zlepšeným podáním barev

**Obr. 31:** Poměrné spektrální složení energie vysokotlakých rtuťových výbojek

Vyráběný sortiment standardních vysokotlakých rtuťových výbojek však stagnuje a již delší dobu se ustálil na základní příkonové řadě 50 W až 1000 W, vesměs v provedení s luminoforem, jehož složením a kvalitou

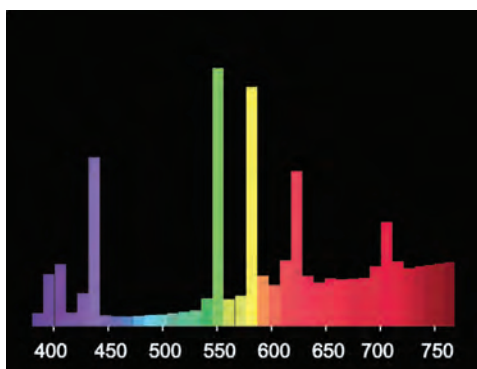
jsou dány i výsledné světelnotechnické parametry výbojek. Vysokotlaké rtuťové výbojky vyžadují pro svůj provoz tlumivky.

K jejich výhodám patří dlouhý život 12 000 h až 16 000 h, dobrá stabilita světelného toku v průběhu života, libovolná poloha svícení (při jejich měření z důvodu požadované reprodukovatelnosti výsledků, je však předepsána poloha svícení vertikální s patičí nahoře), jednoduché schéma zapojení – pouze tlumivka bez zapalovače a zanedbatelný vliv okolní teploty na parametry výbojky.

K nevýhodám patří poměrně malá účinnost, horší podání barev, zejména u základního sortimentu, po vypnutí lze výbojku zapnout až po jejím vychladnutí a s ohledem na obsah rtuti nelze vyhořelé výbojky odkládat do komunálního odpadu. Podíl těchto výbojek na trhu soustavně klesá a jsou postupně nahrazovány podstatně úspornějšími sodíkovými a halogenidovými výbojkami. Typům s nižšími příkony úspěšně konkurují i kompaktní zářivky s elektronickým předřadníkem a v současné době již i světelné diody. Vyrábějí se v příkonové řadě 160 W až 500 W. Jejich další používání však již není žádoucí a ve vyspělých zemích jsou omezovány i legislativní cestou.

### Směšové výbojky

Směšová výbojka je světelný zdroj, v jehož baňce je rtuťová výbojka a žárovkové vlákno spojené do série. Záření vlákna doplňuje spektrum rtuťového výboje zejména v jeho červené oblasti, kde záření rtuti chybí. Wolframové vlákno současně plní i funkci předřadníku, takže odpadá nutnost používat tlumivku.



Obr. 32: Poměrné spektrální složení energie směšových výbojek

K jejich výhodám patří příjemný teplý odstín světla s  $T_c$  3 300 K až 3 800 K, dobré podání barev s  $R_a$  60 až 72,  $\cos \varphi \sim 1$ , prakticky okamžité dosažení jmenovité hodnoty světelného toku. Nevýhodou je především nízký měrný výkon a skutečnost, že je nelze stmívat. Podíl směšových výbojek v celkové spotřebě světelných zdrojů trvale klesá, v nových osvětlovacích soustavách nemají své opodstatnění.

### Vysokotlaké sodíkové výbojky

Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou světelné zdroje, v nichž je světlo vyzařováno hlavně sodíkovými parami

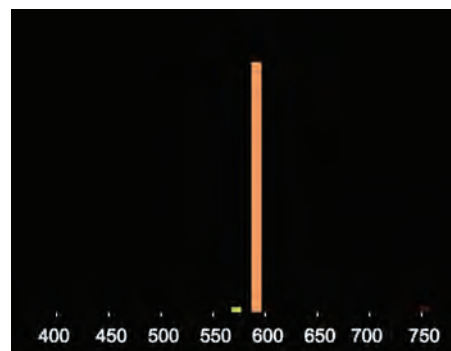
s provozním parciálním tlakem v rozmezí 3 kPa až 60 kPa [27]. Při zvyšování tlaku par sodíku světelná účinnost klesá, prochází minimem a dále opět stoupá, takže při tlaku kolem 10 kPa dosahuje druhého maxima (první maximum se nachází kolem 1 Pa (využívá se v nízkotlakých sodíkových výbojkách) a v závislosti na dalších parametrech (složení amalgámu sodíku, druh a tlak plnicího plynu, rozměry hořáku, příkon výbojky) může dosáhnout hodnoty až 150 lm/W. Při rostoucím tlaku par sodíku dochází k výraznému rozšíření spektrálních čar a ke vzniku silného spojitého záření při současném zvyšování absorpce záření rezonančního. Se zvyšujícím se tlakem je stále zřetelnější asymetrie rozšiřování rezonančních čar k oběma koncům spektra.

Spektrum záření je bohatší, což má za následek i lepší podání barev osvětlovaných předmětů. Pomocí výboje v parách sodíku lze tedy získat světelné zdroje, jejichž kvalita světla se pohybuje ve velmi širokém rozmezí, od nízkotlaké výbojky charakterizované  $R_a = 0$  až po speciální typy vysokotlakých výbojek s  $R_a > 85$ . Vzhledem k vysoké aktivitě sodíkových par k většině technických skel bylo možné vlastnosti vysokotlakého sodíkového výboje plně využít v praxi teprve v polovině šedesátých let minulého století, kdy americká firma General Electric vyvinula průsvitný polykrystalický korund ( $Al_2O_3$ ) s obchodním názvem Lucalox. Vznikla tak nová skupina s.z. s keramickým hořákem. Vynikající optické, mechanické a fyzikálně – chemické vlastnosti tohoto materiálu znamenaly výrazný průlom do sortimentu s.z. ve smyslu jeho významného rozšíření (v současné době se tyto výbojky vyrábějí v příkonové řadě od 35 W do 1000 W) a dalšího zvýšení jeho užitečných vlastností (měrný výkon u nejvyššího příkonu dosahuje 150 lm/W).

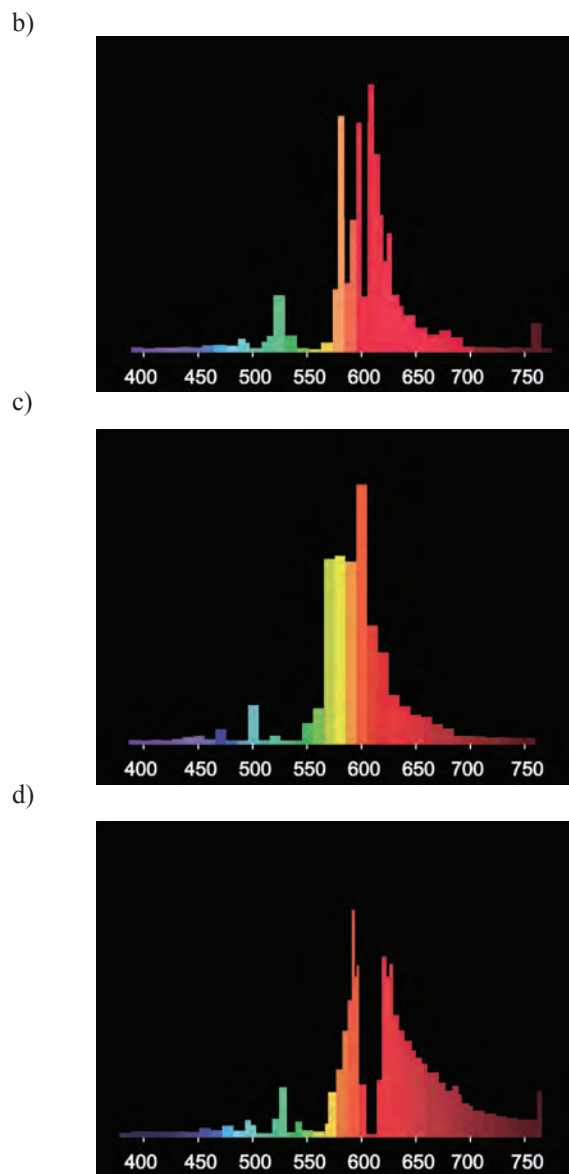
Vysokotlaké sodíkové výbojky je nutné provozovat v obvodu s tlumivkou a vhodným zapalovacím zařízením, které vyhovuje mezinárodním normám IEC anebo s předepsaným elektronickým předřadníkem. V současné době jsou k dispozici elektronické předřadníky pro celý jejich sortiment.

K hlavním přednostem vysokotlakých sodíkových výbojek patří velký měrný výkon při přijatelném podání barev (standardní sortiment má  $R_a$  20-25), dlouhý život dosahující až 30 tisíc hodin při dobré stabilitě světelného toku během života, spolehlivý provoz a snadná údržba, kompaktní rozměry hořáku i celé výbojky. Spektrální složení energie je uvedeno na obr. 33.

a)







Obr. 33: Poměrné spektrální složení energie vysokotlakých sodíkových výbojek

- a) nízkotlaká sodíková výbojka  $R_a = 0$
- b) vysokotlaká sodíková výbojka standardní  $R_a < 25$ ,  $T_{cp} = 2\,000\text{ K}$
- c) vysokotlaká sodíková výbojka se zvýšeným měrným výkonem  $R_a < 25$ ,  $T_{cp} = 2\,000\text{ K}$
- d) vysokotlaká sodíková výbojka se zlepšeným podáním barev  $R_a = 60$ ,  $T_{cp} = 2\,150\text{ K}$

Díky své příjemné teplé barvě základního sortimentu ( $T_{cp} = 2\,000\text{ K}$  až  $2\,500\text{ K}$ ) a vysoké účinnosti zůstává hlavní oblastí použití těchto výbojek uliční světlení, osvětlení tunelů, náměstí a dalších velkých prostranství, kde nejsou kladeány příliš vysoké požadavky na kvalitu podání barev. Oblast jejich použití se však v souvislosti s bouřlivým rozvojem halogenidových výbojek s keramickým hořákem poněkud zužuje a očekává se jejich částečné vytlačení z veřejného osvětlení zejména z historických center měst.

### Halogenidové výbojky

Halogenidové výbojky jsou vysokotlaké výbojové zdroje, v nichž je hlavní část světla vyzařována směsí par kovů a produktů štěpení halogenidů [24]. Svítící látky jsou do výboje vnášeny ve formě halogenidů příslušných kovů. Tento princip je nejúčinnější cestou zlepšení spektra vysokotlakého rtuťového výboje z hlediska účinnosti světelného zdroje i z hlediska podání barev.

Díky velkému počtu různých kovů, vyznačujících se rozmanitým charakterem spektra vyzařované energie, se naskytá rovněž možnost upravovat spektrum záření zdroje nejen pro účely všeobecného nebo dekorativního osvětlování, ale i pro řešení celé řady dalších úkolů vědy a techniky, kde jsou vyžadovány speciální vlastnosti světla resp. záření (lékařství, chemický průmysl, polygrafický průmysl, zemědělství aj.).

Použití většiny čistých kovů ve výboji je však spojeno se značnými problémy, které bránily v minulosti jejich racionálnímu využití. Některé kovy se vyznačují velmi intenzivními rezonančními čárami ve viditelné oblasti spektra (např. sodík, thalium, indium, galium apod.), jiné prvky (např. kovy vzácných zemin jako dysprozium, holmium, thulium, skandium a další) mají velmi husté čárové spektrum v celé viditelné oblasti, které tak zajišťuje věrné podání barev osvětlovaných předmětů. Již vzpomínané kovy vzácných zemin mají při maximálně přípustných teplotách materiálu výbojové trubice (křemenné sklo anebo korundová keramika) nízký tlak par, takže nelze dosáhnout požadované koncentrace těchto prvků ve výboji a tedy ani požadovaného měrného výkonu. Jiné prvky, např. alkalické kovy, jsou při teplotách převyšujících  $300\text{ °C}$  velmi agresivní vůči křemennému sklu, takže dochází ke vzájemné reakci, jejímž výsledkem je neúnosně rychlé zničení hořáku. Východiskem, jak řešit oba výše jmenované problémy, je nový způsob vnášení prvků do výboje ve formě jednoduchých chemických sloučenin, z nichž jako nejvhodnější se ukázaly příslušné halogenidy, nejčastěji jodidy. Tyto sloučeniny jsou při pracovních teplotách hořáku poměrně stálé, nejsou agresivní vůči křemennému sklu a většinou se vyznačují i vyšším tlakem par v porovnání s čistým kovem. Tím je zajištěna i jejich dostatečná koncentrace ve výboji a tedy i požadovaný měrný výkon. Situace se dále zlepšila zvládnutím technologie výroby halogenidových výboje do hořáků zhotovených z korundové keramiky. Zde se vhodně doplnily vlastnosti halogenidových výbojek z hlediska možnosti využití velkého množství kombinací různých svítících příměsí a vynikajících vlastností korundové keramiky, spočívajících ve vyšší přípustné pracovní teplotě hořáku, v možnosti pracovat s vyššími tlaky náplně a v chemické odolnosti oxidu hlinitého proti působení jednotlivých složek náplně hořáku.

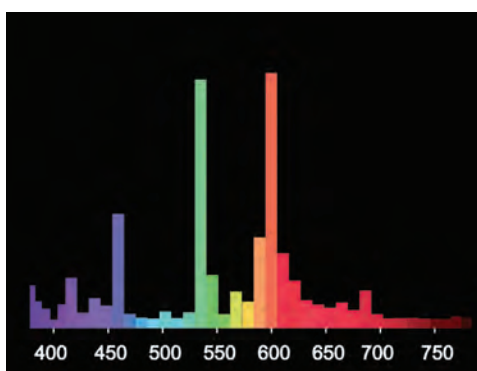
Z hlediska konstrukce jsou halogenidové výbojky příbuzné výbojkám rtuťovým – v případě výbojek s hořákem z křemenného skla, resp. výbojkám vysokotlakým sodíkovým – v případě výbojek s hořákem z korundové keramiky. V současně vyráběném sortimentu halogenidových výbojek se používá celá řada různých kombinací halogenidů, z nichž pro

účely všeobecného osvětlení jsou nejzajímavější následující:

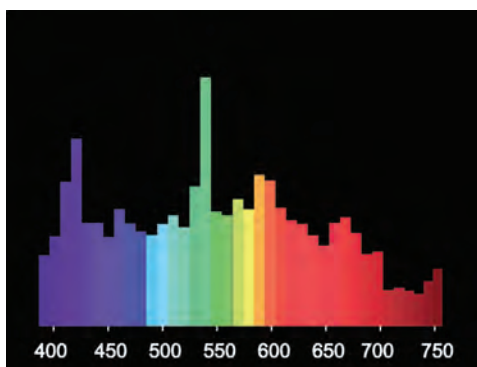
- NaI + TlII + InI. Každý z použitých prvků se vyznačuje intenzivními spektrálními čárami ve viditelné oblasti spektra (sodík září v oranžové, thalium v zelené a indium v modré části spektra). Jejich vhodnou kombinací lze získat zdroj bílého světla s měrným výkonem 70 lm/W – 110 lm/W (podle příkonu), při všeobecném indexu podání barev  $R_a \approx 65-70$
- TlII + DyI<sub>3</sub> + TmI<sub>3</sub> + HoI<sub>3</sub>. Kovy vzácných zemin mají velký počet čar velmi hustě pokrývajících celé viditelné spektrum, takže lze dosáhnout vynikajícího podání barev osvětlovaných předmětů. Přítomnost thalia významně zvyšuje měrný výkon výbojky. Výsledkem jsou světelné zdroje s měrným výkonem 80 lm/W – 90 lm/W s  $R_a > 80$
- ScI<sub>3</sub> + NaI + LiI. Skandium se vyznačuje velkým množstvím čar v modro-zelené části spektra, sodík s lithiem doplňují záření v oblasti oranžově-červené. Měrný výkon dosahuje až 100 lm/W při  $R_a \approx 75$
- SnBr<sub>2</sub> + SnI<sub>2</sub>. U výbojek s uvedenou náplní se využívá molekulární spektrum použitých příměsí, které je spojité a lze jej velmi dobře přiblížit záření absolutně černého tělesa. Při měrném výkonu kolem 60 lm/W je dosahováno vynikajícího podání barev s  $R_a$  dosahujícím hodnoty až 98.

Spektrální složení energie výbojek s náplní ad) a, b, c jsou uvedeny na **obr. 34**. Halogenidové výbojky pro svůj spolehlivý provoz vyžadují tlumivku a zapalovací zařízení produkující napěťový impuls s amplitudou (1,8 – 5) kV (podle příkonu). Výboj probíhá nejdříve v parách rtuti a inertním plynu, u bezrtuťové výbojky v xenonu. Teplotní režim výbojky se ustálí během 5 minut až 10 minut (**obr. 35**).

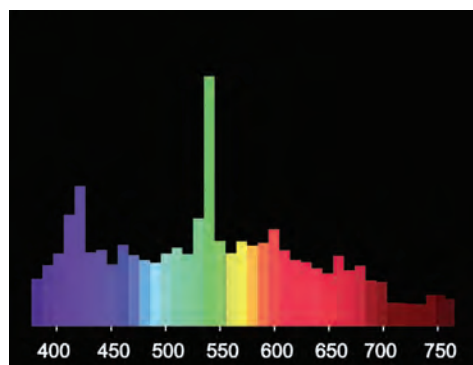
a)



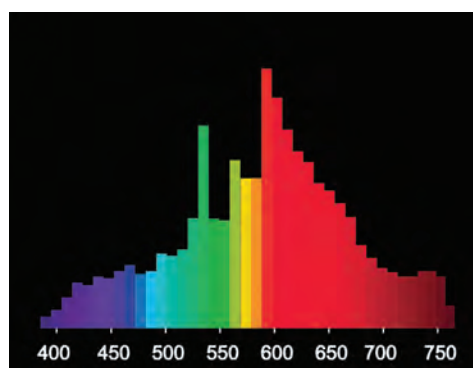
b)



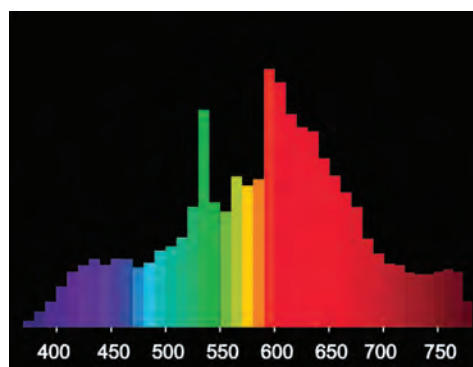
c)



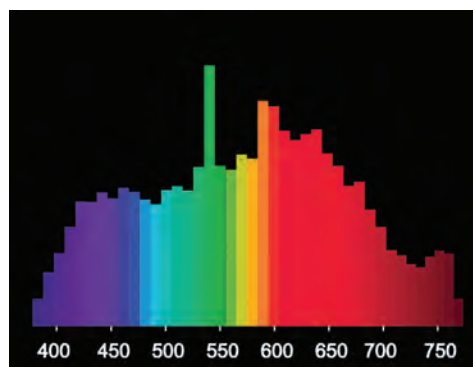
d)



e)



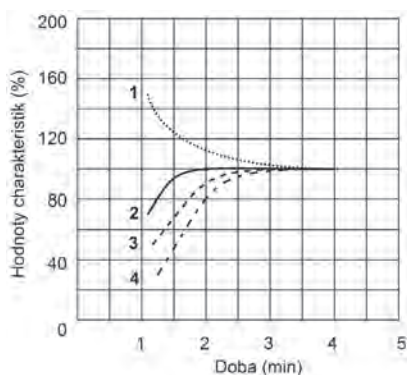
f)



**Obr. 34:** Poměrné spektrální složení energie halogenidových výbojek

- výbojka s křemenným hořákem  $R_a > 65$ ,  $T_{cp} = 4\,500$  K
- výbojka s křemenným hořákem  $R_a > 90$ ,  $T_{cp} = 5\,900$  K
- výbojka s křemenným hořákem  $R_a > 90$ ,  $T_{cp} = 7\,250$  K
- výbojka s keramickým hořákem  $R_a > 80$ ,  $T_{cp} = 3\,000$  K

- e) výbojka s keramickým hořákem  $R_a > 90$ ,  $T_{cp} = 3\ 000\ K$
- f) výbojka s keramickým hořákem  $R_a > 90$ ,  $T_{cp} = 4\ 200\ K$



Obr. 35: Náběhové charakteristiky halogenidových výbojek

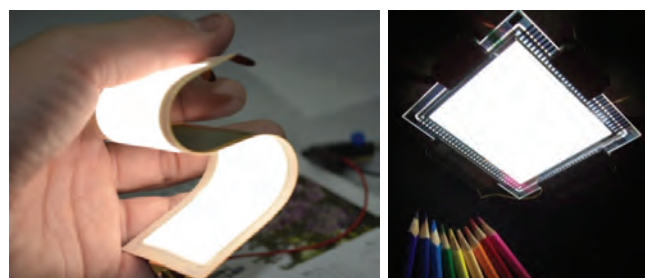
- 1 – proud výbojky, 2 – příkon, 3 – napětí výbojky, 4 – světelný tok

Výhody halogenidových výbojek lze shrnout do následujících bodů: vysoký měrný výkon (halogenidové výbojky patří k neúčinnějším světelným zdrojům), možnost široké úpravy spektrálního složení vyzařovaného světla resp. záření s širokým rozsahem náhradní teploty chromatičnosti od 2800 K do 6500 K až 7000 K, velký rozsah příkonů od 20 W do 5000 W, vynikající podání barev osvětlovaných předmětů, možnost vytvoření rozměrově kompaktních světelných zdrojů s velkým příkonem na jednotku objemu. Z toho vyplývá možnost konstrukce svítidel materiálově úsporných s velmi dobrou možností usměrnění světelného toku v požadovaném směru.

Vývoj této skupiny s.z. zdaleka není ukončen, naopak vykazují nesmírnou dynamiku, zejména v souvislosti se zvládnutím kombinace halogenidů a korundové keramiky. Lze tak očekávat další zlepšení vlastností světelných zdrojů, které se již v blízké budoucnosti mohou prosadit v uličním osvětlení, kde dosud zcela bezkonkurenčně dominovaly vysokotlaké sodíkové výbojky, i když i v této oblasti použití se postupně začínají prosazovat světelné diody, zejména namísto výbojek s nízkým příkonem.

## Elektroluminiscenční světelné zdroje

Do této skupiny s.z. patří světelné diody LED, laserové diody (polovodičové lasery), elektroluminiscenční panely a organické světelné diody OLED (obr. 36 a). Nejvýznamnější z nich jsou světelné diody.



Obr. 36 a) a b): Ukázka různých typů LED světelných zdrojů

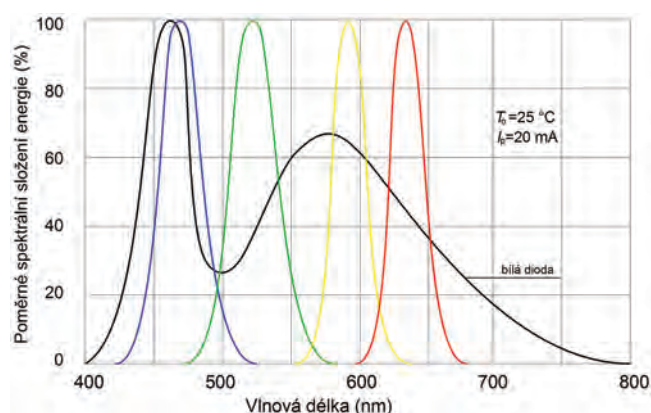
## Světelné diody

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 [27].

Světelné diody zaznamenávají v posledním desetiletí nesmírně dynamický rozvoj

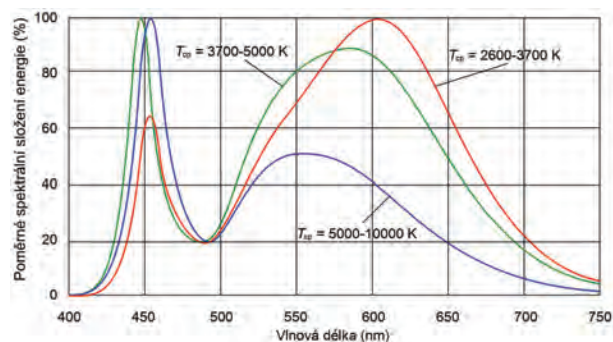
Přestože jejich princip byl objeven již ve dvacátých letech minulého století, první prakticky použitelné diody se objevily teprve v roce 1962 s červenou barvou světla. Od jejich uvedení na trh však dochází k soustavnému vývoji nových základních materiálů a ke zdokonalování technologických procesů vedoucích k postupnému rozšíření sortimentu o další barvy vyzařovaného světla, ke zvýšení účinnosti a prodloužení života a stability světelných parametrů během svícení.

Po diodách červené barvy se objevily diody se zelenou, oranžovou a žlutou barvou. Všechny tyto typy se vyznačují velmi úzkou křivkou spektrálního složení zahrnující interval vlnových délek do několika desítek nanometrů (u laserových diod činí tento interval dokonce pouze několik jednotek nanometrů). Typická spektra vybraných barevných LED jsou uvedena na obr. 37.



Obr. 37: Emisní spektra vybraných barevných LED společně se spektrem bílé diody

Z principu funkce světelné diody však nelze získat bílé světlo. Teprve doplnění sortimentu o modré LED na bázi nitridu galia a india (InGaN), umožnilo nakonec vyvinout i diody se světlem bílé barvy. Tím se významně rozšířila oblast jejich použití včetně všeobecného osvětlení.



Obr. 38: Emisní spektra bílých diod s rozdílnými hodnotami náhradní teploty chromatičnosti

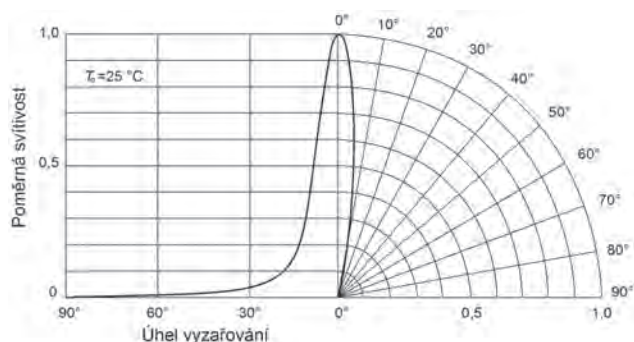


Kromě uvedených typů LED se vyrábějí rovněž diody zářící v ultrafialové anebo infračervené oblasti spektra. Bílé světlo LED lze získat dvěma způsoby. První spočívá v klasickém přímém míšení světla červené, zelené a modré LED, druhý způsob využívá fosforescence luminoforů. Příklady emisních spekter bílých LED s různými hodnotami náhradní teploty chromatičnosti jsou uvedeny na **obr. 38** [29].

Vývoj nových vysoce čistých materiálů, nových velmi složitých technologických postupů znamenal především významný nárůst účinnosti základní stavební jednotky všech LED s.z. – polovodičového čipu, který v laboratorních podmínkách firmy CREE dosáhl neuvěřitelných 303 lm/W v bílé barvě, což překonává všechny dosud vyráběné s.z. při velmi dobrých kolorimetrických vlastnostech.

Použití jednotlivých LED je však poměrně omezené, v praxi se nejčastěji sestavují do větších celků nejrůznějších tvarů blízkých se tvarům jednotlivých skupin konvenčních s.z. (žárovek obyčejných, dekoračních a reflektorových, zářivek nebo výbojek nižších příkonů). K získání většího světelného toku lze použít několik krystalů zapojených do série, anebo jeden krystal se zvětšenou plochou při současném zajištění účinného chlazení místa přechodu. K provozu postačuje zapojit LED do série s diodou v propustném směru a přes vhodný rezistor ji připojit k napájecímu zdroji. 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 °C až 100 °C). Její překročení má velmi negativní vliv na život diody i na rychlost poklesu jejího světelného toku.

Při sestavování LED čipů do větších celků (světelných kompletů) s vyšším příkonem dochází k určitým ztrátám, takže současné LED s.z. dosahují hodnoty měrného výkonu, které zřetelně převyšují hodnotu 100 lm/W při velmi dobrých kolorimetrických vlastnostech, což pro celou řadu aplikací, zejména v domácnosti, přesahuje všechny dosud používané konvenční s.z. Z hlediska měření světelných diod nutno vzít v úvahu některé jejich specifické vlastnosti, např. křivky rozložení svítivosti (**obr. 39**), které našly svůj odraz i v řadě normativních dokumentů vypracovaných v rámci CIE.



**Obr. 39:** Příklad rozložení svítivosti LED v pravoúhlých a polárních souřadnicích

Světelné diody mají celou řadu nesporných předností:

- umožňují konstruktérům vytvářet velké množství světelných přístrojů a svítidel nejrůznějších tvarů, výkonů

a rozměrů s vysoce koncentrovaným svazkem světelné (resp. zářivé) energie,

- malé napájecí napětí nevyžadující ochranu před nebezpečným dotykem,
- minimální doba náběhu (kratší než u žárovek) a rychlá odezva (nanosekundy). Mohou pracovat v impulsním režimu bez negativního vlivu na život a spolehlivost. Lze je snadno zapínat a vypínat, snášející bez vážnějších následků otřesy a vibrace,
- plná stmívatelnost beze změny barvy, stmívací moduly jsou kompatibilní s nyní používanými standardními systémy pro žárovky, zářivky nebo halogenové žárovky,
- možnost napájení solárními články,
- lze vytvářet osvětlovací soustavy s dynamickým řízením intenzity a barvy světla,
- libovolná poloha svícení,
- vysoký jas,
- velká účinnost barevných LED, protože k dosažení požadované barvy se nepoužívají filtry způsobující u jiných světelných zdrojů nežádoucí ztráty,
- možnost získání velkého počtu barev – červené, oranžové, žluté, zelené, zeleno-modré, modré, fialové. 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 nekonečně velký počet barevných odstínů a hodnot jasu v soustavách s dynamickým řízením osvětlení,
- vysoká spolehlivost,
- extrémně dlouhý život. Údaje jednotlivých výrobců se pohybují mezi (60 až 100) tis. h., při úbytku světelného toku (30 až 40) %. Tato hodnota však do značné míry závisí na okolních – zejména teplotních – podmínkách,
- široký interval teploty okolního prostředí, uváděný mezi (–30 a +60) °C,
- nízké povrchové teploty a absence UV a IR záření (kromě diod speciálně vyvinutých pro tyto oblasti spektra) umožňují pro konstrukci přístrojů s LED používat plasty,
- při sestavování osvětlovacího přístroje ze světelných diod není zapotřebí používat další optické prvky na usměrnění světelného toku v požadovaném směru,
- 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 patří zatím především vysoká cena a významná závislost jejich hlavních parametrů na teplotě okolí.

## LASERY

S precizností laserové techniky se setkáváme denně při těch nejběžnějších úkonech – od skenování čárového kódu v supermarketu po přehrávání oblíbeného „cédéčka“.

Laser je zjednodušeně řečeno optický posilovač, který dokáže zesílit světelné záření.

V porovnání s obecným optickým zářením laserové záření vykazuje dvě významné odlišnosti. V první řadě je prostorově omezené, za druhé laserový svazek v řadě aplikací emituje velmi vysoké hodnoty celkového zářivého toku, v řádech jednotek až stovek wattů. Jedinečné vlastnosti laseru lze využít k namíření paprsku na miniaturní plochu a tak značně koncentrovat jeho energii. Z laseru takto vzniká např. velmi precizní lékařský skalpel nebo naopak, přidáme-li na výkonu, řezačka tlustých plátů oceli.

Oblast laserové radiometrie je však velice specifická svým širokým rozsahem měřených výkonových úrovní a to jak v kontinuálním tak v pulzním režimu, dále širokým spektrálním rozsahem a širokou škálou používaných typů detektorů (polovodičových, teplotních, elektricky substitučních ESR).

Zajištění metrologické návaznosti měřidel v této v oblasti laserové radiometrie vyžaduje specifický přístup počínaje potřebou sekundárního etalonu s patřičným spektrálním a výkonovým rozsahem. V případě pulzních laserů se navíc zajímáme jak o průměrné hodnoty periodických pulzů, tak i o hodnoty individuální energie vyzářené v jednotlivém pulzu. Navíc je nutné zajistit toto měření pro poměrně rychlé děje, kde délka jednotlivého pulzu dosahuje až zlomky nanosekund.

### OPTICKÁ VLÁKNA

Optická vlákna jsou extrémně tenká, flexibilní, transparentní vlákna z oxidu křemičitého nebo z plastu. Tato vlákna přenášejí světelné signály z jednoho konce na druhý a na velké vzdálenosti. Nejčastěji se optická vlákna používají v oblasti telekomunikací, využití světla v optických vláknech představuje revoluci ve způsobu interakce lidí v 21. století.

Signály procházejí s menší ztrátou než v kovových vodičích, a nejsou ovlivněny elektromagnetickým rušením.

### MEZINÁRODNÍ KOMISE PRO OSVĚTLOVÁNÍ CIE

K nejvýznamnějším organizacím působícím na poli světelné techniky v celosvětovém měřítku patří Mezinárodní komise pro osvětlení CIE (zkratka vznikla z francouzské verze jejího názvu). Je to dobrovolná nezisková organizace, která představuje vrcholové celosvětové seskupení světelných techniků prakticky ze všech vyspělých průmyslových zemí. Vznikla již v roce 1913 a k dnešnímu dni je jejími členy 38 zemí všech kontinentů. Československo se stalo členem CIE v r. 1929. Máme tedy již více než osmdesátiletou tradici, na kterou jsme v r. 1992 navázali.

Posláním CIE je mezinárodní spolupráce a výměna informací mezi jednotlivými členskými zeměmi. Jejími členy jsou národní komitěty 39 zemí a řada individuálních členů.

Členové českého národního komitětu CIE mají řadu výhod, např. mohou s předstihem získávat pravidelné in-

formace o akcích CIE, o nových publikacích a normách, které lze získat za zvýhodněné ceny a podílet se i na jejich tvorbě.

K hlavním úkolům CIE patří:

- vytvoření mezinárodního fóra pro diskusi o všech záležitostech týkajících se vědy, techniky a umění v oboru světlo, osvětlení a pro mezinárodní výměnu informací v tomto oboru,
- tvorba základních norem v oblasti světla a osvětlení, včetně normy názvoslovné,
- poskytování návodů k používání principů a postupů při tvorbě národních norem oblasti světla a osvětlení,
- příprava a zveřejnění zpráv a dalších publikací majících vztah k vědě, technice a umění v oboru,
- a konečně zajišťování spolupráce a vzájemné technické součinnosti s jinými mezinárodními organizacemi, zabývajícími se záležitostmi vztahujícími se k vědě, technice, standardizaci a umění v oboru světlo a osvětlení.

Rozmanitost a šíře oboru světelná technika se projevuje i ve struktuře CIE a v rozdělení její činnosti do 7 divizí, v jejichž rámci pracují technické komitěty (TC). Tyto TC se soustřeďují na řešení konkrétního problému a po jeho vyřešení jejich činnost končí vydáním příslušné Publikace CIE (v současné době jich evidujeme 213), příslušné normy CIE (nyní již 20 norem), sborníků z významných konferencí CIE (nyní již 36) nebo zprávy, popř. referátem na zasedání divize nebo na generální konferenci. Normy a technické zprávy vytvořené v rámci těchto komitětů jsou respektovány v celosvětovém měřítku a používány i v normotvorné činnosti dalších mezinárodních organizací (např. Mezinárodní elektrotechnické komise IEC, nebo Mezinárodní komise pro standardizaci ISO atd.).

Činnost CIE je tedy rozdělena do těchto divizí:

**Divize č. 1** – Vidění a barva. Předmětem činnosti je zkoumání zrakových funkcí a stanovení norem pro tyto funkce, modely a procesy, jestliže mají vztah k fotometrii, měření barev, podání barev, zrakovému výkonu a k hodnocení světla a osvětlení. Má 27 TC.

**Divize č. 2** – Fyzikální měření světla a záření. Předmětem činnosti je vypracování standardních postupů hodnocení a měření ultrafialového, viditelného a infračerveného záření, dále celkového záření a optických vlastností materiálů a svítidel. Zkoumání optických vlastností a výkonnosti fyzikálních čidel a jiných zařízení, jsou-li k jejich hodnocení potřebná. Má 28 TC.

**Divize č. 3** – Návrh osvětlení interiérů. Předmětem činnosti je zkoumání a hodnocení vizuálních faktorů, vliv na spokojenost lidí s prostředím budov a jeho působením z hlediska tepelných vizuálních a akustických podmínek. Stanovení kritérií týkajících se návrhu přírodního a umělého osvětlení. Výzkum metod návrhu osvětlení, včetně potřebných výpočtů vnitřního osvětlení budov a promítnutí těchto výsledků do směrnic pro interiéry a speciální prostory. Má 11 TC.

**Divize č. 4** – Osvětlení a signalizace v dopravě. Předmětem činnosti je zkoumání osvětlení a vizuálních signálů stejně

jako informačních požadavků v dopravě, kam patří osvětlení silnic a dopravních prostředků, vodorovné dopravní značení, dopravní značky a signalizace pro všechny kategorie veřejných komunikací, pro všechny uživatele a dopravní prostředky a rovněž pro vizuální orientaci a podporu v dalších oblastech provozu. Má 12 TC.

**Divize č. 5** – Osvětlení exteriérů a další aplikace. Předmětem činnosti je zkoumání metod a vypracování směrnic pro návrhy osvětlení venkovních pracovišť, bezpečnostního osvětlení, osvěcování, osvětlení pěších zón a jiných městských částí bez automobilového provozu, zón určených ke sportování a rekreační činnosti a osvětlení dolů. Má 9 TC.

**Divize č. 6** – Fotobiologie a fotochemie. Předmětem činnosti je zkoumání a hodnocení účinků optického záření na biologické a fotochemické systémy. Má 13 TC.

**Divize č. 7** – Všeobecné aspekty osvětlení – svou činnost již ukončila.

**Divize č. 8** – Zobrazovací technika. Předmětem činnosti je zkoumání metod a vypracování směrnic a norem pro optické, vizuální a metrologické aspekty přenosu, zpracování a reprodukce zobrazení s využitím všech způsobů analogových a digitálních zařízení na snímání a reprodukování obrazů a paměťových médií. Má 6 TC.

### ÚČAST ČMI V EVROPSKÝCH VÝZKUMNÝCH PROJEKTECH V OBLASTI RADIOMETRIE A FOTOMETRIE

(Pozn.: Ilustrační obrázky jsou převzaté z webových stránek jednotlivých projektů.)

#### JRP EXL02 SIQUTE - Single-photon sources for quantum technologies



<http://www.ptb.de/emrp/siqute-project.html>

Tento Evropský výzkumný projekt se zaměřuje na vývoj nových, efektivních a spolehlivých jednofotonových zdrojů. Nově vyvinuté jedno-fotonové zdroje najdou své využití v kvantových technologiích, radiometrii, v zdravotnické diagnostice i v mikroskopii, spektrometrii a interferometrii.

Význam projektu je spíše dlouhodobý. Nově vyvinuté jednofotonové zdroje budou průkopníky nejen na akademické půdě ale i v průmyslu. Časem budou nejspíše tyto zdroje považovány za „standardní“ součásti, stejně jako lasery nebo LED, technologických aplikací pro např. kvantovou komunikaci a kvantové zobrazovací metody. Zdroje mohou tvořit základ pro levnější, robustní a spolehlivé jednofotonové zdroje použitelné při pokojové teplotě s využitím např. ve školách a universitách.

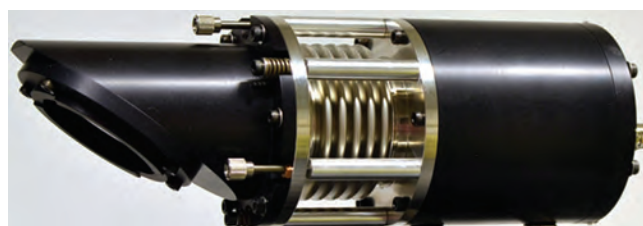
#### JRP SIB57 NEWSTAR “New Primary Standards and Traceability for Radiometry”



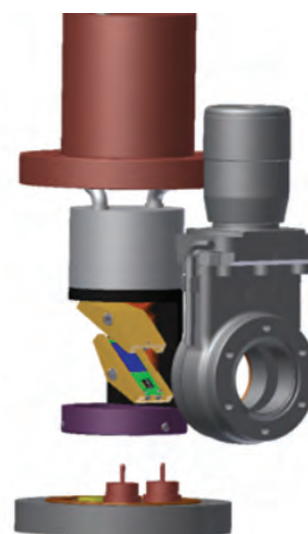
<http://www.inrim.it/Newstar>

Evropský výzkumný projekt NEWSTAR se zaměřuje na rozvoj metrologické návaznosti na SI v oblasti radiometrie. V Evropských metrologických institucích (EURAMET) by se tímto projektem měly podpořit inovace v optických technologiích. Vzhledem k tomu, že optika řídí celou řadu důležitých technologií a aplikací, jsou fotodetektory nenahraditelnými nástroji k zajištění přesnosti a návaznosti měření. Projekt NEWSTAR si klade za cíl významně zlepšit měřicí schopnosti a zpřesnit návaznost radiometrických jednotek.

Projekt navazuje na výsledky společného výzkumného programu „Kvantová kandela“ (T1.J2.3 qu-Candela “Towards quantum based photon standards” [13] uskutečněného díky programu iMERA PLUS v letech 2008 – 2011. Projekt „Kvantová kandela“ zkoumal možnou alternativu k současným primárním absolutním kryogenním radiometrům, pomocí tzv. absolutního kvantového detektoru s předpověditelnou kvantovou účinností (PQED, Predictable Quantum Efficiency Detector), který je založen na fotoelektrickém efektu v křemíkovém polovodiči.

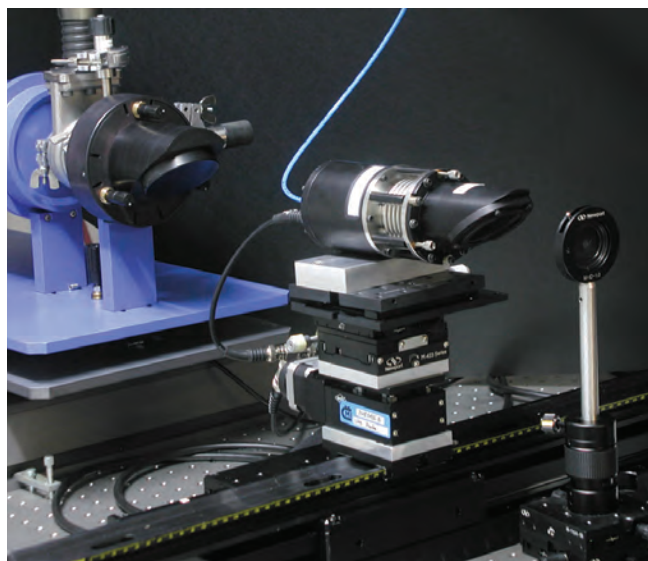


Obr. 40 a: PQED při pokojové teplotě



Obr. 40 b: PQED při kryogenní teplotě





Obr. 41: Kryogenní radiometr a PQED

Hlavním cílem projektu je proto vývoj primárního etalonu pro radiometrii, který bude podobně nákladný a funkční jako přenosné etalonové detektory. Národní metrologické instituce by mohly zabudovat tento primární standard do různých aplikací a tímto unikátním způsobem by se podařilo rozšířit sníženou nejistotu zavedením vylepšeného primárního etalonu do jiných měřicích sestav.

### JRP IND52 xDReflect Multidimensional reflectometry for industry



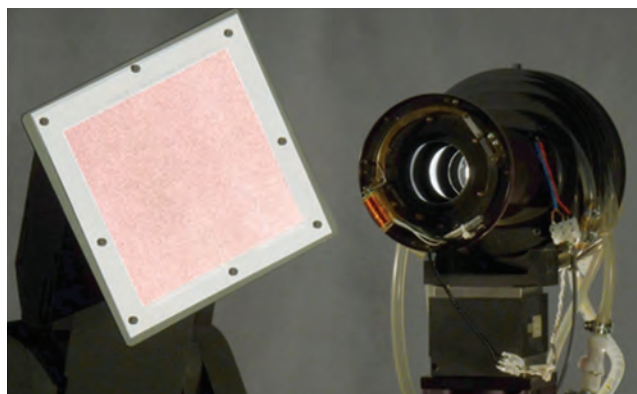
<http://www.xdreflect.eu>

Cílem projektu je definovat spolehlivé optické měřicí metody k stanovení makroskopického vzhledu materiálů (tzn. „appearance“) s návazností na základní měřicí jednotky SI.

Konkrétně se projekt zaměřuje na optickou charakterizaci takzvaných goniochromatických materiálů (jsou to materiály, které mění barvu při změně úhlu dopadu světla nebo při změně úhlu pohledu), lesku a fluorescence.



Obr. 42: Vzorke goniochromatických materiálů z PTB



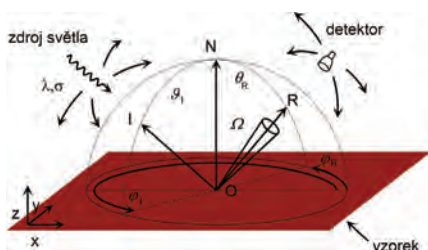
Obr. 43: Měření vzorku lesklého pigmentu v PTB



Obr. 44: Využití barev a lesku v průmyslu

Pomocí modelování a analýzy dat získaných v rámci projektu se pokusí partneři projektu určit kalibrační schémata s minimálním počtem kroků. Bude zkoumána i závislost mezi nastavenými optickými parametry a vizuálním vjemem pozorovatele („human visual perception“) pro nastavení fyzikálních škál, které budou korelovat s vizuálním vjemem pozorovatele.

Z pohledu metrologie je v této oblasti důležitou veličinou vzhledu materiálu tzv. Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF). Tato funkce je definována jako poměr mezi spektrální září povrchu materiálu měřenou v daném směru a spektrální ozářeností dopadající na povrch materiálu v jiném směru. Obě veličiny jsou stanoveny pro danou, obecně různou, vlnovou délku optického záření. BRDF se měří na goniospektrofotometru a poskytne kompletní charakterizaci reflexe světla zkoumaného vzorku materiálu.



Obr. 45: BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function

**Měřicí postupy, které budou v rámci tohoto projektu vyvinuty**, podpoří lepší způsob kontroly kvality v oblastech výroby, kde vzhled, kvalita a struktura povrchu jsou důležitými parametry. Z vědeckého pohledu dojde k lepšímu pochopení interakce mezi fyzickými a vizuálními aspekty vjemu („appearance“).

### JRP IND 06 MIQC Metrology for Industrial Quantum Communications

<http://projects.npl.co.uk/MIQC/>

Zabezpečení přenosu dat je v dnešní době velice důležité téma. Využívá se např. pro bankovní transakce, elektronickou archivaci a přenos lékařských záznamů. Výkonnější počítače představují hrozbu pro dešifrování těchto dat.

Tento projekt se zaměřuje na technologii kvantové kryptografie (QKD - Quantum Key Distribution), umožňující bezpečnou komunikaci pomocí kryptografických klíčů. Tento způsob komunikace je založen na zakódování fotonů s kvantovými stavy, které se výrazně naruší v případě tajného odposlechu komunikačního kanálu. V současné době ale pro tuto oblast neexistuje nezávislý měřicí etalon.

Výzkumný projekt MIQC2 je pokračováním tohoto projektu.

### JRP ENV53 MetEOC2 Metrology for earth observation and climate

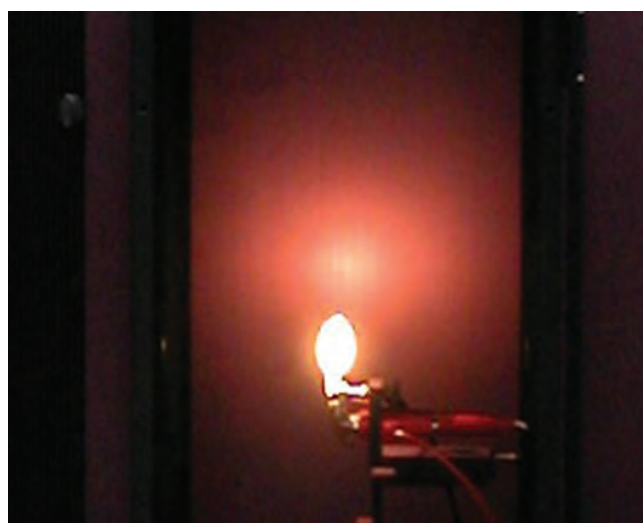


<http://www.emceoc.org/index.html>

Tento společný výzkumný projekt si klade za cíl založit virtuální centrum excellence („European Metrology Centre for Earth Observation and climate – EMCEOC). Záměrem tohoto centra je zvýšit povědomí veřejnosti o „metrologii a nejistotách měření v klimatické metrologii“. Poskytnutí návaznosti měření a spolehlivých dat se stanovenými nejistotami pomůže lépe porozumět dynamice klimatu a zlepšit schopnost interpretace dat. Automatizace testovacích stanišť povede ke kvalitnějším údajům a méně nákladným kontrolám na místě.

### JRP ENV03 Traceability for surface spectral solar ultraviolet radiation

<http://projects.pmodwrc.ch/env03/index.php/summary>



Obr. 46 a, b, c: UVsolar

Tento společný výzkumný projekt se konal v letech 2011 až 2014.

Cílem projektu bylo výrazně zlepšit spolehlivost měření spektrálního slunečního UV záření na povrchu Země. Vývojem nových metod pozorování (techniky i nástroje) se snížila nejistota měření slunečního UV záření.

Evropský referenční spektrometr QASUME byl vybaven vylepšenou vstupní optikou a nově vyvinutými polovodičovými detektory. Nové přenosné standardy zlepšily



přenos stupnice ozáření z primárního etalonu spektrální ozáření a snižují nejistotu měření spektrální sluneční ozáření.

Vylepšená návaznost v měření spektrální ozáření a prezentace nástrojů a metod vyvinutých v rámci tohoto projektu byly předány dále koncovým uživatelům v rámci rozsáhlého porovnání spektrometru ve Světovém radiacním centru ve švýcarském Davosu.

K tomuto porovnání byli přizváni koncoví uživatelé, kteří provádějí měření slunečního UV záření. Spektrometry uživatelů zapojené do porovnání byly kalibrovány pomocí nástrojů vyvinutých v rámci tohoto výzkumného projektu. Cílem porovnání bylo přenést novou sníženou nejistotu na širší veřejnost monitorující UV záření v rámci Evropy. Prototypy nástrojů, vyvinuté v rámci projektu, budou komerčně dostupné a metodiky jsou volně dostupné na internetových stránkách projektu k vytvoření udržitelného základu pro měření slunečního UV záření v regionálních a národních monitorovacích sítích.

### ENV59 ATMOZ Traceability for atmospheric total column ozone

Světová meteorologická organizace (WMO) definovala atmosférický ozon jako jeden ze základních parametrů v globálním systému sledování klimatu (global climate observing system - GCOS). Dlouhodobé sledování ozonové vrstvy je zásadní pro ověření úspěšného plnění Montrealského Protokolu a jeho dodatků pro ochranu ozonové vrstvy a její obnovy až na původní úroveň před rokem 1970.

K měření ozonové vrstvy v atmosféře se v dnešní době používají Dobson a Brewer spektrometry, vyvinuté v roce 1920, respektive 1980. Oba typy spektrometrů jsou dnes již zastaralé, navíc **Dobsonův** spektrometr se již nevyrobí a jeho manuální ovládání vyžaduje značnou sílu. Z toho vyplývá nutnost optimalizace těchto přístrojů. Analýza dat a stanovení nejistoty měření slunečního záření při různých podmínkách a v různých oblastech spektra by mělo napomoci pro případné nahrazení stárnoucích typů přístrojů.

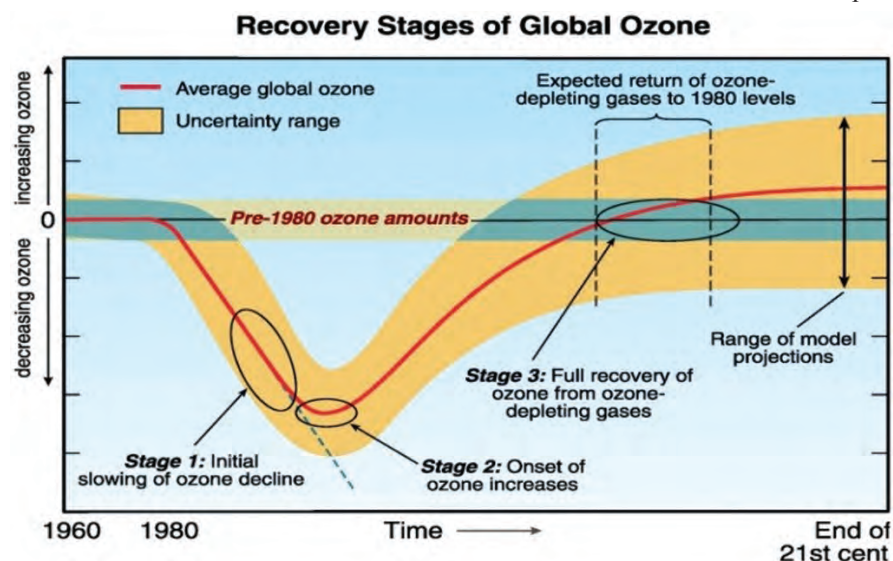
## ZÁVĚR

Hlavním posláním mezinárodního roku světla 2015 je zvýšit povědomí veřejnosti o tom, jak výraznou roli má světlo a světelná technika v našem každodenním životě a jak naše každodenní životy přímo či nepřímo ovlivňuje. A zdá se, že to není až tak obtížný úkol, neboť význam světla je skutečně značný. V současnosti pravděpodobně nejviditelnějším příkladem nových optických technologií, které vstupují každodenně do našich životů, jsou nová svítidla a osvětlovací soustavy založené na LED a organických LED technologiích, které v současnosti mění naše domy a ulice v místa s vysokým komfortem umělého osvětlení a stejně vysokou energetickou účinností. Dalším velmi viditelným případem jsou jistě zobrazovací displeje a monitory. Vždyť tak vysoká kvalita zobrazení, jaká je dnes dosažitelná u výrobků v ceně několika tisíc korun, byla před deseti lety jen velmi těžko proveditelná u zařízení v ceně několika stovek tisíc korun. Vedle toho je ale celá řada technologií založených na světle, které zůstávají stranou hlavního zájmu veřejnosti, ale jejichž dopad je srovnatelně velký. Optické záření je dnes klíčovým prvkem téměř ve všech nových zařízeních, která v posledních letech zásadně pozměnila vývoj lidské společnosti, ať už je to laserová technika, komunikace založená na vláknové optice, kvantová kryptografie nebo optické diagnostické a léčebné systémy ve zdravotnictví. Téměř 80 % údajů, které satelity každodenně měří na naší planetě, je získáváno optickými měřicími metodami, svařování a obrábění těch nejkompaktnějších strojních součástí je více a více prováděno s výkonným laserem jako obráběcím nástrojem, a mnoho dalších a dalších příkladů ještě nebylo zmíněno.

V této publikaci nebylo samozřejmě možné podrobně popsat všechny tyto výše zmíněné aspekty. Cílem příspěvku bylo shrnout základní fakta o optických veličinách a stavu jejich současného metrologického zajištění v ČMI, tedy a popsat způsob zajištění primární návaznosti optické radiometrie a fotometrie v ČMI, které je mimochodem na mezinárodně uznávané špičkové úrovni. Jako ukázka obecně pro veřej-

nost nejzajímavějšího oboru pak byla další část příspěvku věnována popisu různých typů světelných zdrojů z hlediska jejich optických i energetických parametrů.

Na závěr byl pro zajímavost dodán přehled probíhajících Evropských výzkumných projektů, které náš tým v Českém metrologickém institutu řeší, zaměřených na další rozvoj optických technologií a využití světla a světelných technologií v budoucnosti. Mnoha dalším významným oborům této velmi pestré oblasti optické radiometrie a fotometrie budeme mít jistě možnost věnovat v některém z dalších čísel časopisu Metrologie.



Obr. 46: Obnova ozonové vrstvy v atmosféře



### LITERATURA:

- [1] Habel J., Dvořáček K., Dvořáček V., Žák P.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [2] BIPM 2006: The International System of Units: 8th edn., [www.bipm.org](http://www.bipm.org)
- [3] Planck M 1900 Verh. Deutsch. Phys. Ges. 2 202–4
- [4] Planck M 1997 Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften 206 (Thun und Frankfurt am Main: Verlag, Harri Deutsch)
- [5] Kangro H 1970 Vorgeschichte des Planckschen Strahlungsgesetzes (Wiesbaden: F Steiner Verlag)
- [6] Cahan D 1992 Meister der Messung (Weinheim: Wiley-VCH) Cahan D 2004 An Institute for an Empire (Cambridge: Cambridge University Press)
- [7] Hoffmann D 2000 Phys. Bl. 56 43–7
- [8] 9e CGPM 1948 Comptes Rendu 54
- [9] 16e CGPM 1979 Comptes Rendus
- [10] International Commission on Illumination (CIE) 1983 The Basis of Physical Photometry Central Bureau of the CIE, Publication No 18.2 (Vienna: CIE)
- [11] Wyszecki G, Blevin W R, Kessler K G and Mielenz K D, 1983, Principles Governing Photometry, BIPM Monographie 83/1
- [12] ISO 23539:2005/E / CIE S 010/E:2004 Photometry – The CIE System of Physical Photometry
- [13] <http://www.quantumcandela.org/project.html>
- [14] Geist J, 1980 J. Appl. Phys. 51 3993
- [15] Geist J, Brida G, Rastello M L, 2003 Metrologia 40 S 132
- [16] Manoocheri F, Smid M, at all, Predictable Quantum Efficient Detector, Invited talk, Proceedings of NEWRAD 2011, Maui, (2011)
- [17] Cheung J Y, Smid M, Porrovecchio G, Low optical power reference detector ..., Optics Express, Vol. 19 Issue 21, pp.20347-20363 (2011)
- [18] Lee et al., Nature Photonics 5, 166 (2011)
- [19] Quinn T J and Martin J E 1985 Phil. Trans. R. Soc. Lond. 316 85–181
- [20] Fox N P and Rice J P 2005 Absolute radiometers Optical Radiometry, ed A C Parr et al (Amsterdam: Elsevier, Academic)
- [21] Zalewski E F and Duda C R 1983 Appl. Opt. 22 2867
- [22] Fox N P 1991 Metrologia 28 197–202
- [23] Smid M, White M W, Metrologia 2010, 47, Tech. Suppl 02006
- [24] CIE 13.3: 1995, Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Light Sources
- [25] ČSN EN ISO 11664-1 Kolorimetrie – Část 1: Normální kolorimetrický pozorovatel CIE
- [26] Katalogy firmy OSRAM 2008 – 2013
- [27] ČSN IEC 50 (845) Mezinárodní elektrotechnický slovník – Kapitola 845: 845 – Osvětlení 1996
- [28] Katalogy firmy PHILIPS 2005 – 2013
- [29] Informace firmy CREE z r. 2015 o překonání hranice 300 lm/W u LED čipů

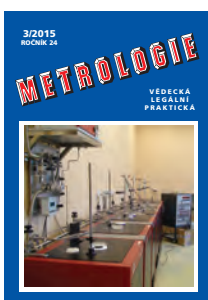
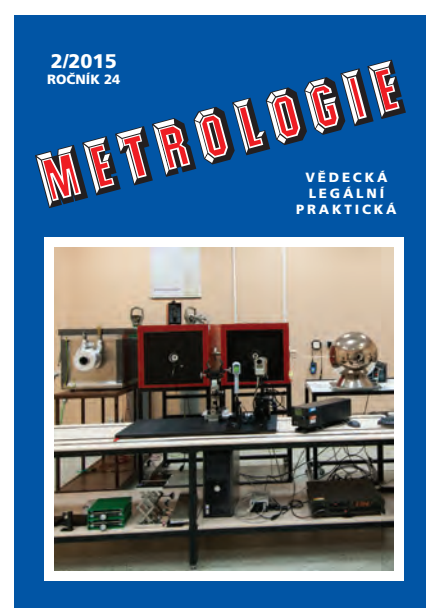
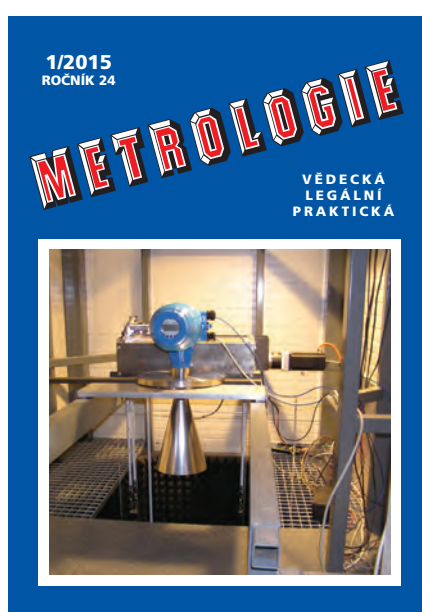
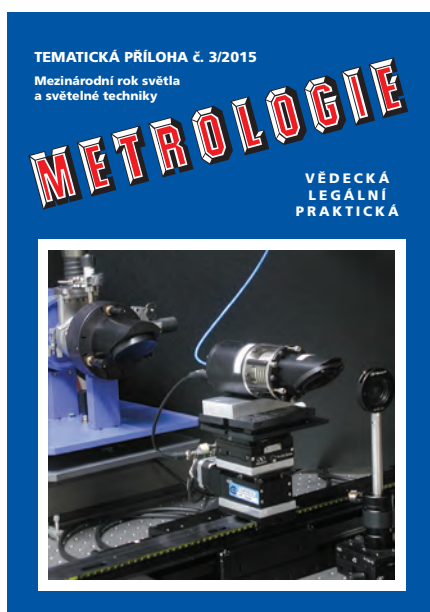


# METROLOGIE

Časopis METROLOGIE vydává Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením

## Časopis METROLOGIE je zdrojem užitečných informací o:

- technické normalizaci a státním zkušebnictví
  - národním metrologickém systému
  - vývoji předpisové základny i ve vztahu k EU
    - novinkách v měřicí technice,
- možnostech metrologického zabezpečení
- odborných akcích
- historických měřicích přístrojích aj.



## Časopis METROLOGIE vychází 4 x ročně

Vydává ÚNMZ - Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

Bližší informace o předplatném: šéfredaktor PhDr. Bořivoj Kleník - Q-art,

Bezdědice 19, 294 25 Katusice, tel.: 326 394 888, mobil: 603 846 527, e-mail: [klenik@q-art.cz](mailto:klenik@q-art.cz)

Objednávka č. .... na období (nebo do odvolání).....

Firma:.....

Adresa:.....

IČ:..... DIČ:..... Odp. osoba:.....

Tel.:..... Fax:..... E-mail:.....

Časopis zasílejte na adresu:.....

Datum:..... Podpis:..... Razítko:

---

**Redakční rada:**

Ing. Emil Grajciar (předseda), Ing. František Jelínek, CSc. (místopředseda), RNDr. Jiří Tesař, Ph.D., Ing. Josef Vojtíšek, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Milan Badal, Prof. Ing. Jaroslav Boháček, DrSc., Ing. Jan Klíma, Ing. Jiří Kazda, Mgr. Václava Holušová, RNDr. Klára Popadičová, Ing. Jaroslav Rajlich, Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Jan Tichý, Jitka Hrušková. PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + poštovné a balné + 15 % DPH. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Biskupský dvůr 1148/5, 110 00 Praha 1. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: září 2015. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, tel./fax: +420 326 394 888, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 3/2015 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

---

**Foto na obálce:**

Státní etalon celkového zářivého toku viditelného záření - absolutní kryogenní radiometr ČMI jako reference v porovnávacím měření detektoru PQED (detektor s předpověditelnou kvantovou účinností)

**Photo on the front page:**

National Standard of Total Radiance Flux for Visible Radiation - the Absolute Cryogenic Radiometer at CMI as Reference during the Comparison Measurement of the PQED (Predictable Quantum Efficiency Detector)



