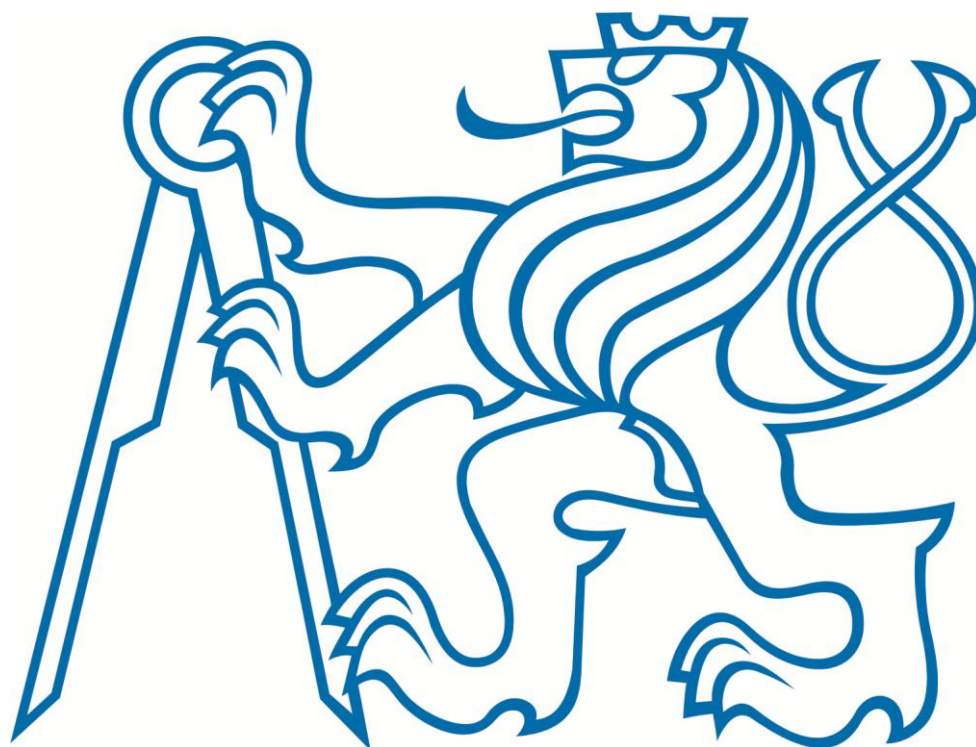


Fotometrie, radiometrie a spektroskopie

Měření neelektrických veličin

Ladislava Černá





Obsah

1	Úvod.....	3
2	Související pojmy.....	3
2.1	Prostorový úhel.....	3
2.2	Bodový zdroj světla	3
2.3	Prostorový zdroj světla	3
3	Radiometrické veličiny	4
3.1	Zářivý tok	4
3.2	Zářivost.....	4
3.3	Ozáření.....	4
3.4	Intenzita vyzařování	4
3.5	Měrná zářivost	5
4	Spektrometrie	5
4.1	Spektrální hustota intenzity záření	5
4.2	Spektrální citlivost a spektrální odezva	6
5	Fotometrické veličiny	7
5.1	Svítivost.....	8
5.2	Světelný tok	8
5.3	Osvětlení.....	8
5.4	Světlení	9
5.5	Jas	9
6	Měření fotometrických a radiometrických veličin.....	9
6.1	Objektivní metody měření	10
6.1.1	Fotočlánky.....	10
6.1.2	Přístroje pro měření fotometrických a radiometrických veličin.....	12
7	Radiometrická měření ve fotovoltaice	14
7.1	Používaná čidla a přístroje.....	14
7.2	Laboratorní měření FV modulů	14
7.2.1	Spektrum AM 1.5.....	14
7.2.2	Shoda záření simulátoru s AM 1.5	14
8	Závěr	16
9	Reference	17



1 Úvod

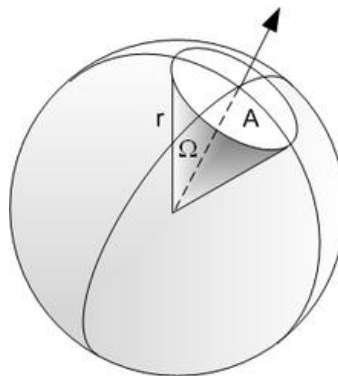
Světlo je formou energie, a tudíž jej lze kvantitativně měřit. Z hlediska měření můžeme uvažovat dva základní přístupy. Můžeme zohlednit vliv lidského oka (důležité zejména pro zrakovou pohodu) a měřit relativní veličiny, nebo můžeme měřit přímo energii. V prvním případě mluvíme o fotometrii a odpovídající veličiny jsou pak fotometrické a v druhém případě o radiometrii a veličinách radiometrických. Neoddělitelnou součástí obou přístupů je spektrometrie, která nám umožní nejen správné vyhodnocení změřených údajů, ale dokonce i přepočty mezi jednotlivými typy veličin.

2 Související pojmy

2.1 Prostorový úhel

Část prostoru vymezená rotační kuželovou plochou. Vyjadřuje poměr mezi plochou vytyčenou kuželem na povrchu koule (A) ke kvadrátu poloměru dané koule (r). Tento poměr je pro daný kužel konstantní (zmenší se poloměr, zmenší se i vytyčená plocha). Jednotkou je steradián sr a značí se řeckým písmenem Omega Ω [1].

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ (sr)} \quad (1)$$



Obrázek 1: Definice prostorového úhlu [2]

2.2 Bodový zdroj světla

Zdroj světla, jehož geometrické rozměry jsou v porovnání se vzdáleností pozorovatele tak malé, že je lze zanedbat (analogicky chápeme v mechanice pojem hmotný bod). Takový zdroj je izotropní, tj. bodový zdroj září do všech stran stejně. [1]

2.3 Prostorový zdroj světla

Zdroj, jehož velikost není možno vzhledem ke vzdálenosti pozorovatele zanedbat. Zdroj se jeví jako plocha, která je složena z jednotlivých zářících elementárních plošek. Při pozorování



je tedy nutné uvažovat nejen vzdálenost od zdroje světla, ale i úhel, pod kterým zdroj pozorujeme. [1]

3 Radiometrické veličiny

Radiometrické veličiny charakterizují množství energie přenesené na ozařovaná tělesa.

3.1 Zářivý tok

Energie vyzářená bodovým zdrojem světla do daného prostorového úhlu za jednotku času. Značí se Φ_e a její jednotkou je W. [1]

3.2 Zářivost

Zářivost vyjadřuje zářivý tok vyzářený do jednotkového prostorového úhlu ve směru daném vektorem \vec{n} . Značí se I_e a jednotkou je $\frac{W}{sr}$. Obecně lze hodnotu zářivosti vyjádřit vztahem [1]:

$$I_e(\vec{n}) = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta\Omega} \left(\frac{W}{sr} \right) \quad (2)$$

V případě izotropního zdroje záření, tj. takového zdroje, jehož zářivost nezávisí na směru vyzařování, můžeme psát [1]:

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \left(\frac{W}{sr} \right) \quad (3)$$

3.3 Ozáření

Ozáření (intenzita záření) vyjadřuje energii dopadající na jednotku povrchu ozařovaného tělesa za jednotku času. Označíme-li plošný element ozařovaného tělesa ΔS a zářivý tok dopadající na tento element $\Delta\Phi_e$, můžeme psát [1]:

$$E_e = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta S} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4)$$

Pokud budeme pro zdroj ozáření uvažovat bodový zdroj světla, potom ozáření klesá se čtvercem vzdálenosti ozařované plochy. Při uvažování sklonu ozařované plochy pod úhlem α (odklonu od normály) můžeme vztah přepsat [1]:

$$E_e = \frac{I_e \cdot \cos \alpha}{r^2} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (5)$$

3.4 Intenzita vyzařování

Intenzita vyzařování vyjadřuje energii vyzářenou do volného poloprostoru 2π jednotkou povrchu plošného zdroje ΔS za jednotku času [1]:

$$H_e = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_e(2\pi)}{\Delta S} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (6)$$



3.5 Měrná zářivost

Měrná zářivost (také zář) vyjadřuje zářivost části povrchu plošného zdroje o jednotkovém průmětu do roviny kolmé k zadanému směru paprsků záření.

Zářivost generovaná z definované části povrchu ΔS plošného zdroje světla do roviny kolmé ke zvolenému směru záření. Označíme-li ΔS element plochy povrchu zdroje a α úhel, který svírá paprsek ve zvoleném směru s normálou k elementu této plochy, můžeme pro průmět elementu ΔS do roviny kolmé ke zvolenému směru psát [1]:

$$\Delta S_{\perp} = \Delta S \cos \alpha \quad (7)$$

Měrnou zářivost $L_e(\alpha)$ pak můžeme vyjádřit vztahem [1]:

$$L_e(\alpha) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I_e(\alpha)}{\Delta S \cos \alpha} \left(\frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2} \right) \quad (8)$$

Pro všechny radiometrické veličiny existuje jejich spektrální modifikace, která zohledňuje danou veličinu v konkrétním intervalu vlnových délek.

4 Spektrometrie

Spektrometrie se zabývá vznikem, měřením a interpretací energetických spekter, která vznikají při absorpci nebo emisi zářivé energie nebo částic. Pro optiku a fotovoltaiku jsou nejdůležitějšími pojmy spektrální hustota intenzity záření, spektrální citlivost a spektrální odezva.

4.1 Spektrální hustota intenzity záření

Při určité teplotě T vyzařuje těleso (zdroj světla) záření různých vlnových délek λ . Vlnové délky nejsou v záření obsažené stejnou měrou, tzn. výsledné záření obsahuje různé vlnové délky v různém množství. Část energie z celkové energie vyzářené zdrojem připadající na konkrétní vlnovou délku λ při teplotě zdroje T popisuje spektrální hustota intenzity záření $H(\lambda, T)$ [10]:

$$H(\lambda, T) = \frac{dH}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} \left(\frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right) \quad (9)$$

kde h je Planckova konstanta - $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,
 c rychlost světla,
 k Boltzmannova konstanta - $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$.

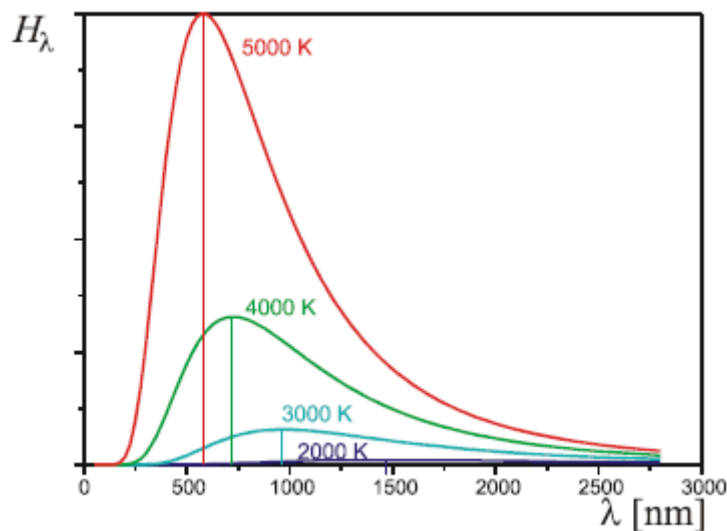


Celkovou energii vyzářenou zdrojem záření, tj. intenzitu vyzařování lze vyjádřit integrací předchozího vztahu. Pro záření dokonale černého tělesa platí tzv. Stephan-Boltzmannův zákon [10]:

$$H_e = \sigma T^2 \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (10)$$

kde σ je empirická konstanta – $\sigma \doteq 5,6687 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^{-4}} \right)$,
 T termodynamická teplota.

$H(\lambda, T)$ můžeme graficky vyjádřit, a tak získat známé křivky pro spektra zdrojů záření (Obrázek 2).



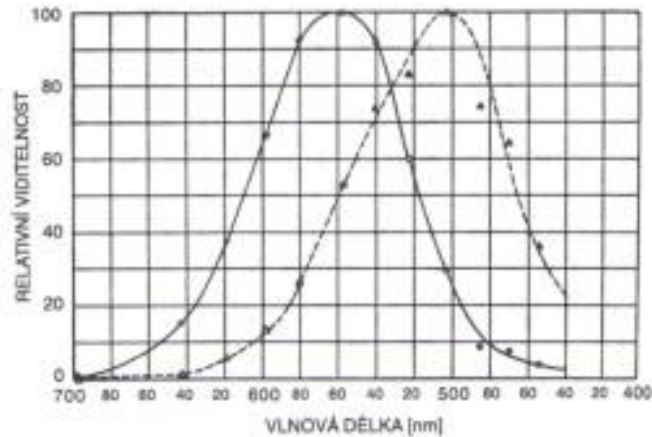
Obrázek 2: Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování pro čtyři různé teploty [10]

4.2 Spektrální citlivost a spektrální odezva

Spektrální odezva popisuje citlivost fotosenzoru na optické záření různých vlnových délek. To je velmi důležité, protože pouze malá část optického záření je viditelná [7]. Citlivost při dané vlnové délce se nazývá spektrální citlivost.

Speciálním případem fotosenzoru je lidské oko. Spektrální citlivost, respektive odezvu popisuje tzv. fotopická (vidění ve dne) a skotopická (vidění za tmy) křivka oka (Obrázek 3).

Maxima obou zobrazených křivek se liší. To je způsobené rozdílnou citlivostí čípků a tyčinek, které oko obsahuje. Čípky jsou citlivější na denní světlo a jsou zodpovědné za barevné vidění. Čípky potřebují více světla na své podráždění, a proto lidské oko v noci nevidí barevně. Tyčinky jsou mnohem citlivější než čípky, a tudíž je lidské oko používá při vidění za nízké intenzity ozáření, tj. za šera a v noci. Citlivost tyčinek vykazuje maximum v oblasti modré a naopak špatně vnímá červenou. Za nízké intenzity ozáření se tedy jeví okolní předměty jako nebarevné a modré předměty jsou vnímány jako jasnější než červené.



Obrázek 3: Spektrální citlivost oka [9]

Křivku je možno popsat pomocí **poměrné světelné účinnosti monochromatického záření** $V(\lambda)$. Ta popisuje účinnost, s níž je elektromagnetické záření dané vlnové délky přeměněno na subjektivní zrakový vjem. Tato funkce je obvykle uváděna v tabulkách a její hodnoty byly získány jako střední hodnoty dat získaných různými pozorovateli při dostatečně velkém počtu vyšetřených jedinců. Odpovídají tedy jakémusi střednímu zdravému oku v populaci. Pro výpočet platí vztahy [1]:

$$\tilde{V}(\lambda) = \frac{E_e(\lambda_0)}{E_e(\lambda)} (-) \quad (11)$$

$$V(\lambda) = \frac{\tilde{V}(\lambda)}{\tilde{V}_{\max}} (-) \quad (12)$$

kde $E_e(\lambda_0)$ je ozáření oka způsobené zdrojem monochromatického záření o pevné vlnové délce λ_0 ,

$E_e(\lambda)$ je ozáření oka způsobené zdrojem monochromatického záření o vlnové délce λ ,

$\tilde{V}(\lambda)$ hodnota poměru obou ozáření při subjektivně stejné hodnotě ozáření

\tilde{V}_{\max} maximální hodnota poměrné světelné účinnosti monochromatického záření – odpovídá hodnotě při vlnové délce pro maximální citlivost oka

5 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny zohledňují citlivost oka na různé vlnové délky. Při měření fotometrických veličin se používají senzory, které mají co možná nejbližší spektrální citlivost k lidskému oku.

Fotometrické veličiny jsou analogické radiometrickým. Pro přepočítání se používá **spektrální hustoty radiometrické veličiny**. Označíme-li radiometrickou veličinu A_e , můžeme pro její spektrální hustotu \hat{A}_e při dané vlnové délce λ psát [1]:



$$\hat{A}_e(\lambda) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta A_e(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda} \quad (13)$$

Pro všechny vlnové délky pak platí:

$$A_e = \int_0^{\infty} \hat{A}_e(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

Při přepočtu radiometrických veličin na fotometrické je respektován vliv spektrální citlivosti oka pomocí funkce $V(\lambda)$ a multiplikativního faktoru K . Číselná hodnota K je 680 pro čípky a 1740 pro tyčinky a pro fotometrickou veličinu A můžeme psát [1]:

$$A = K \int_0^{\infty} \hat{A}_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

5.1 Svítivost

Analogická veličina k zářivosti. Značí se I a jednotkou je kandela cd. Patří mezi základní jednotky soustavy SI. Je definována jako svítivost zdroje monochromatického záření o kmitočtu $540 \cdot 10^{12}$ Hz (vlnové délce 555,2 nm) a zářivosti $\frac{1}{683}$ W. Pro výpočet svítivosti platí vztah [1]:

$$I = K \int_0^{\infty} \hat{I}_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (16)$$

5.2 Světelný tok

Analogická veličina k zářivému toku. Značí se Φ a jednotkou je lumen lm. V SI je 1 lm definován jako světelný tok, který izotropní zdroj o jednotkové svítivosti vysílá do jednotkového prostorového úhlu. S využitím vztahu (15) platí [1]:

$$\Phi = K \int_0^{\infty} \hat{\Phi}_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (17)$$

Pro izotropní zdroj světla pak analogicky ke vztahu (3) platí [1]:

$$\Phi = I\Omega \quad (18)$$

5.3 Osvětlení

Osvětlení vyjadřuje světelný tok dopadající na osvětlovanou plochu. Jednotkou je lux lx, který je definován jako světelný tok 1 lm dopadající na plochu 1 m^2 . Značí se E (analogicky k ozáření) a platí pro něj vztah [1]:



$$E = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta S} \quad (19)$$

Při uvažování bodového zdroje světla klesá osvětlení se čtvercem vzdálenosti osvětlované plochy. Při uvažování sklonu osvětlované plochy pod úhlem α (odklonu od normály) můžeme vztah přepsat [1]:

$$E = \frac{I \cdot \cos \alpha}{r^2} (\text{lx}) \quad (20)$$

5.4 Světlení

Světlení H je definováno pro plošný zdroj záření a je analogické k intenzitě vyzařování [1]:

$$H = K \int_0^{\infty} \hat{H}_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (21)$$

Z analogie plyne také [1]:

$$H = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi(2\pi)}{\Delta S} \left(\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) \quad (22)$$

5.5 Jas

Jas L odpovídá v radiometrii měrné zářivosti:

$$L = K \int_0^{\infty} \hat{L}_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (23)$$

$$L = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta I(\alpha)}{\Delta S \cos \alpha} \quad (24)$$

kde $\Delta I(\alpha)$ je svítivost plošky ΔS povrchu plošného zdroje ve směru svírajícím úhel α s vnější normálou k této plošce.

Jednotkou jasu je nit nt, který je definován jako jas části povrchu plošného zdroje o svítivosti 1 cd, jejíž průmět do roviny kolmé ke směru pozorování je 1 m^2 .

6 Měření fotometrických a radiometrických veličin

Pro měření fotometrických a radiometrických veličin se používají přístroje využívající různé umělé fotosenzory (objektivní metody), ale také lidské oko (subjektivní metody). V případě použití umělých fotosenzorů jsou účinky záření převedeny na elektrickou veličinu, která je následně vyhodnocena. Lidské oko se používá obvykle srovnávacím způsobem.



6.1 Objektivní metody měření

Radiometrická měření se používají kromě stanovení optických vlastností zdrojů světla také pro detekci neviditelných záření. Např. pro stanovení radioaktivního záření se používají dozimetry, pomocí detekce zbytkového záření je možné stanovit složení látek (látka pohlcuje určité vlnové délky podle svého složení), apod.

Pro radiometrická optická měření se používají fotočlánky (nebo termočlánky v případě tepelného záření), které převádí dopadající zářivý tok na elektrickou veličinu.

6.1.1 Fotočlánky

Fotočlánek je zařízení, které obsahuje detektor citlivý na světlo. Podle potřeby se volí detektory s různou spektrální citlivostí. Fotočlánek je uložen ve fotometrické hlavici, která obsahuje také speciální filtr pro úpravu spektrální citlivosti detektoru do požadovaného rozsahu. Fotodetektory mohou pracovat na principu fotoemise (fotonky a fotonásobiče), fotovodivosti (fotorezistory) nebo fotovoltaiky (fotodiody, FV články).

6.1.1.1 Fotonky

Pracují na principu světlem stimulované emise elektronů z povrchu materiálu. Vlivem vnějšího elektrického pole je emitovaný elektron urychlován směrem od katody k anodě a po dopadu na anodu může být detekován jako elektrický proud.

Mají velmi rychlou odezvu, tudíž je možné je použít i pro detekci velmi krátkých světelných impulsů.

6.1.1.2 Fotoelektrické násobiče

Fotoelektrické násobiče jsou emisní fotonky, které slouží pro měření malých světelných výkonů. Emitované elektrony jsou urychleny a na pomocných anodách rozmnoženy sekundární emisí.

6.1.1.3 Fotorezistory

Fotorezistory pracují na principu změny vodivosti materiálu vlivem záření, která může být vnějším obvodem vyhodnocena. Jejich nevýhodou je šum, který znemožňuje použití fotorezistorů při vyhodnocování nízkých úrovní světelného toku.

Materiály pro výrobu fotorezistorů se liší podle oblasti záření, na které má být detektor použit. Důležitá je tedy nejen velikost odezvy na světelný tok, ale také spektrální odezva a její průběh v závislosti na změně vlnové délky. Pro výrobu fotorezistorů se používají např. Si, CdS, PbS, PbSe, InSb, HgCdTe, Ge:Hg, Ge:Cd, GeCu, GaAs/AlGaAs (QWIP). Pro luxmetry se používají křemiková čidla s vhodnými filtry. Z uvedených materiálů má nejbližší shodu s fotopickou křivkou lidského oka CdS [13].



6.1.1.4 Fotodiody

Nejčastěji používané detektory do fotočlánků jsou v současné době fotodiody, zejména křemíkové. Fotodiody pracují na principu fotovoltaiického jevu, kdy dochází vlivem absorbovaných fotonů k excitaci nosičů náboje a vzniká elektrický proud. Proud je následně obvodem vyhodnocen. Fotodiodu lze zvolit z více možností podle požadovaných vlastností (Tabulka 1). Kromě klasických fotodiód se používají také fotovoltaiické články, které slouží jako detektory při měření intenzity záření. Výhoda takových detektorů je stejná spektrální odezva, jako mají měřené objekty, a tudíž je lze používat zároveň jako referenční zařízení při měření elektrických parametrů solárních článků, respektive modulů.

Typ	Konstrukce	Vlastnosti	Materiál
Planární		Nízká úroveň temného proudu	Křemík nebo GaAsP
Planární, nízkokapacitní		Nízká úroveň temného proudu, rychlá odezva, vysoká citlivost na UV a IR záření	Křemík
PNN		Nízká úroveň temného proudu, vysoká citlivost na UV záření, necitlivost na IR záření	Křemík
PIN		Velmi rychlá odezva	Křemík
Schottkyho		Velmi vysoká citlivost na UV záření	GaAsP, GaP
Lavinová		Interní zesílení, ultra rychlá odezva	Křemík

Tabulka 1: Druhy fotodiód [12]



6.1.1.5 Směrová selektivita

Poměrně důležitým parametrem fotočlánků je směrová selektivita, která zohledňuje prostorový úhel dopadajícího záření. Rozlišujeme fotočlánky pro měření [5]:

- rovinné osvětlenosti, kde je fotočlánek kalibrován na kolmý dopad světla, případně jsou použity korekční nástavce,
- prostorových charakteristik osvětlení, např. střední válcovou a poloválcovou osvětlenost, prostorovou a polokulovou osvětlenost,
- při malém snímacím úhlu (od osy snímání)

6.1.2 Přístroje pro měření fotometrických a radiometrických veličin

6.1.2.1 Luxmetr

Slouží pro měření osvětlení. Detektorem je obvykle křemíkový fotočlánek. Fotočlánek bývá často připojený k vyhodnocovacímu přístroji kabelem.

6.1.2.2 Jasoměr

Slouží k měření jasu. Jako detektor je použit fotočlánek s optickým systémem, který vymezuje prostorový úhel. Jasoměry mohou být bodové (malý prostorový úhel) a integrační (průměrná hodnota jasu v prostoru řádu jednotek).

6.1.2.3 Goniofotometr

Slouží k měření rozložení svítivosti zdroje. Lze jím tak posoudit např. vyzařovací úhel. Měření probíhá nepřímo pomocí měření osvětlenosti, která je pak přepočítána na svítivost. Pro konstrukci goniofotometru je možné použít tři možnosti [11]:

- Detektor (nejčastěji fotočlánek) je umístěn na otočné lavici, která se otáčí okolo světelného zdroje v konstantní vzdálenosti – nejčastější řešení.
- Pevné umístění článku a naopak pohyblivý zdroj světla – nelze použít v případě, kdy je rozložení svítivosti závislé na poloze zdroje světla.
- Použití pevného umístění detektoru i zdroje světla s doplněním o otočné zrcadlo - tuto metodu měření lze použít pro všechny zdroje záření, ale je konstrukčně relativně náročná.

6.1.2.4 Kulový integrátor

Slouží k měření světelného toku světelného zdroje. Konstrukčně je proveden jako dutá koule, ve které je umístěn světelný zdroj, korekční světelný zdroj a fotočlánek. Vnitřní povrch tvoří speciální bílý nátěr, který zaručuje vysokou odrazivost (ideálně 100 %). Měření probíhá srovnávací metodou, kdy je nejprve umístěn do integrátoru referenční zdroj světla a je změřen jeho fotoproud. Poté je referenční zdroj vyměněn za zdroj měřený a měření se opakuje.



Z hodnot měření obou zdrojů (a korekcí) je vypočten světelný tok měřeného zdroje. Kromě světelného toku je z hodnot možné určit také energetickou i světelnou účinnost svítidla.

6.1.2.5 Pyranometr

Slouží k měření intenzity záření. Pracují na principu termoelektrického jevu. Detektor je složen z termočlánků, které jsou připojeny k ploškám s různou hodnotou pohltivosti záření. Světlo tak ohřívá plošky nestejně a rozdíl teplot vyvolává termoelektrické napětí. Toto napětí je zesíleno a podle zvolené konstanty zobrazeno v požadovaných jednotkách. Obvykle se používá pro měření intenzity záření např. pro meteorologické stanice. Pro měření intenzity záření jiného než slunečního zdroje je nutné konstantu změnit podle spektrálního rozložení příslušného zdroje záření. Nevýhodou je velká doba odezvy – okolo 18 s (plošky se musí ohřát).

Modifikací zařízení je tzv. pyrhelimetr, který měří jen přímé záření (detektory jsou umístěny v trubici)



Obrázek 4: Zleva – Solární analyzátor s možností měření intenzity osvětlení, luxmetr, čidlo pyranometru



7 Radiometrická měření ve fotovoltaice

7.1 Používaná čidla a přístroje

Při měření parametrů solárních modulů je nezbytné měřit při stejných podmínkách. Pokud nemůžeme zaručit stejné podmínky měření, např. při měření v místě instalace modulů, je nutné naměřené hodnoty přepočítat na hodnoty ekvivalentní požadovaným podmínkám. Nejdůležitějším parametrem je z tohoto hlediska intenzita záření, která během dne i roku značně kolísá.

V kapitole 6 byly popsány nejčastěji používané detektory a přístroje pro radiometrická a fotometrická měření. Pro stanovení intenzity záření při měření fotovoltaických modulů se používají dva typy detektorů. Pro laboratorní měření se prakticky výlučně používají jako detektory pouze malé fotovoltaické články, které bývají připojené k měřicímu zařízení kabelem (podobně jako detektory u luxmetrů). Články se používají také pro kompaktní solární analyzátoři, které jsou určené pro měření v místě instalace. Pro stálé monitorování intenzity záření se používají kromě článkových detektorů také pyranometry, které nevyžadují údržbu (články je nutné vlivem degradace kalibrovat).

7.2 Laboratorní měření FV modulů

Při měření v laboratoři už nevystačíme pouze s měřením intenzity záření, neboť pro ozáření modulů jsou používány umělé zdroje záření – sluneční simulátory. Pro ty je podstatnou vlastností spektrum generovaného záření, které by mělo být co nejbližší skutečnému slunečnímu záření. Sluneční simulátory mohou být zábleskové – tzv. flash testery, nebo kontinuální. Provedení kontinuálních zdrojů záření je vzhledem k vysoké požadované intenzitě záření poměrně problematické, a tudíž jsou nejrozšířenějšími přístroji pro vyhodnocení parametrů solárních modulů právě flash testery.

7.2.1 Spektrum AM 1.5

Pro měření FV modulů bylo jako základní spektrum definováno spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou – AM 1.5 (Obrázek 5). Pro jeho simulaci se nejčastěji používají halogenové výbojky (zejména xenonové) v kombinaci s filtry, které mají největší shodu s AM 1.5.

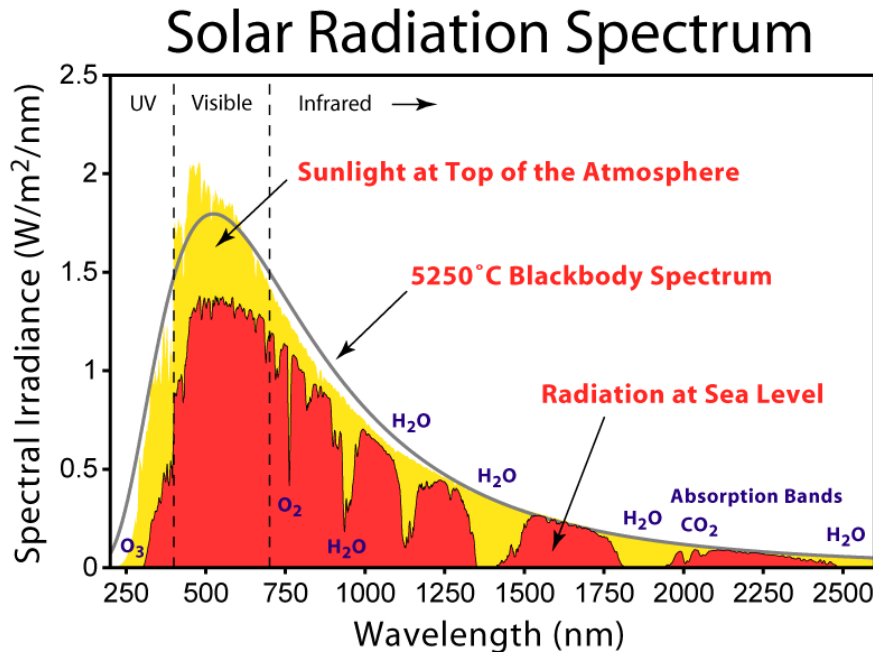
7.2.2 Shoda záření simulátoru s AM 1.5

Standardy pro měření solárních modulů vyžadují speciální solární simulátory, které musí splňovat podmínky dané normou ČSN EN 60904-9. Pro nejlepší solární simulátory – třída A, jsou to tyto podmínky:

- úroveň neshody se slunečním spektrem AM 1.5 max 25 % (pro šest intervalů vlnových délek),

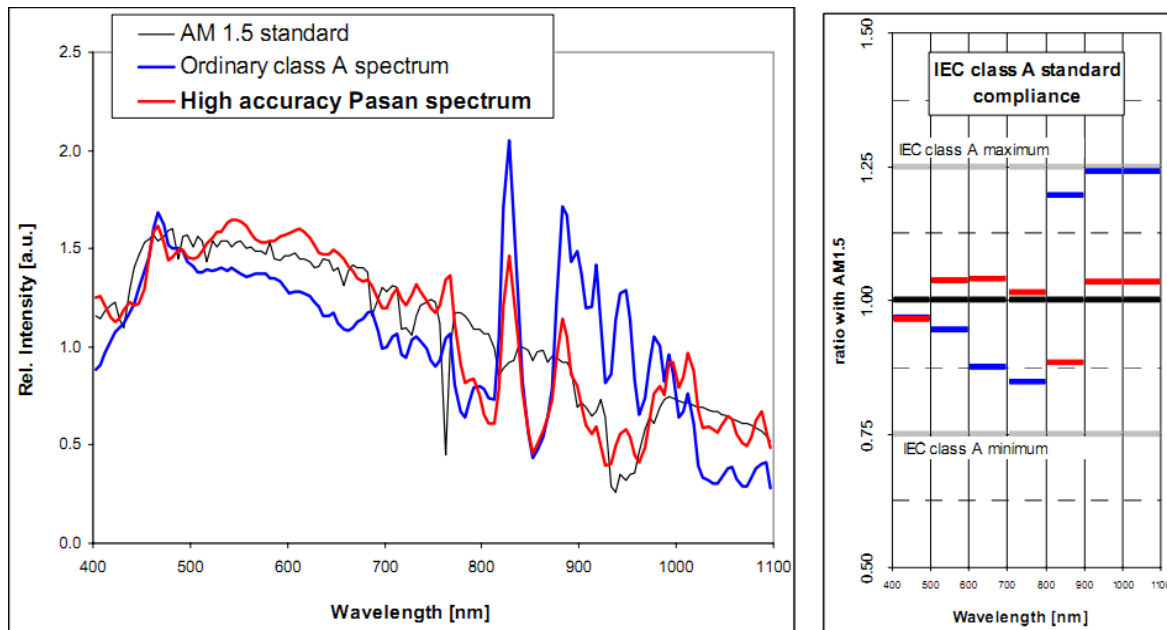
- nerovnoměrnost ozařované plochy max. 2 %,
- teplotní nestabilita (barvy) max. 2 %.

Nejproblematictější je shoda se slunečním spektrem, která může vyvolat relativně velká zkreslení při vyhodnocování parametrů solárních modulů.



Obrázek 5: Spektrum AM 1.5 (červené) [15]

Při měření flash testerem slouží detektor pro měření intenzity záření zároveň jako referenční článek. Ten je pak kalibrován podle technologie modulů, které chceme flash testerem měřit. Pokud není kalibrace provedena, pak přístroj měří správně pouze za předpokladu, že mezi zářením generovaným slunečním simulátorem a skutečným slunečním zářením je 100 % shoda. Např. pokud máme referenční článek z krystalického křemíku a chceme měřit CdTe moduly, tak musíme pro kalibraci referenčního článku použít CdTe modul. Důvodem je rozdílná spektrální citlivost obou technologií, což má za následek, že pokud nemají zdroje záření 100 % shodu se skutečným slunečním zářením, tak je možné naměřit přístrojem více nebo naopak méně, než by odpovídalo skutečným hodnotám. Např. CdTe jsou citlivější na vyšší vlnové délky a skutečné sluneční spektrum obsahuje v této oblasti relativně méně záření, ale simulátor třídy A (ač vyhovuje nejpřísnějším normám), obsahuje v této oblasti vlnových délek záření řádově více. Při měření na slunci tedy naměříme méně, než v laboratoři. Řešení poskytuje právě kalibrace přístroje podle dané technologie, nebo použití lepšího simulátoru. Na trhu existují simulátory tzv. třídy AA, které mají poloviční odchylky proti požadavkům standardu ČSN EN 60904-9. To způsobí, že při ozáření tímto simulátorem je i v případě kalibrace na křemíkovou technologii změřen CdTe modul s prakticky zanedbatelnou odchylkou.



Obrázek 6: Porovnání spekter a odchylek od spektra AM 1.5 (černá), simulátoru třídy A (modrá) a simulátoru třídy AA (červená) [14]

8 Závěr

Radiometrická a fotometrická měření jsou nezbytná nejen pro vyhodnocení světelných podmínek v oblasti viditelného záření, ale nacházejí uplatnění i v jiných oblastech. Při měření fotovoltaických modulů by nebylo možné exaktní porovnání bez použití radiometrických měření, chemické analýzy by se neobešly bez radiometrických přístrojů umožňujících stanovení koncentrací a složení jednotlivých látek. Stejně tak astronomie využívá radiometrická měření pro zkoumání vzdálených objektů. V oblasti tepelného záření prožívají boom termokamery, které umožňují převést tepelné záření do viditelných snímků – termogramů, a tak zjistit např. vadná místa na fotovoltaických modulech.

Prakticky každé průmyslové odvětví používá některou z forem radiometrických nebo fotometrických měření, ať už přímo nebo nepřímo.



9 Reference

- [1] Kalus, R. *Trivium z optiky - Informace studentům - Katedra fyziky Přf OU* [on-line]. Cite 2011, Informace studentům - Katedra fyziky Přf OU:
<http://artemis.osu.cz:8080/artemis/view.php?ids=1&idr=1&idc=33>
- [2] Prostorový úhel – wikipedie [on-line]. Cite 2011.
http://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorov%C3%BD_%C3%BAhel
- [3] Fyzikální praktikum, MFF UK [on-line]. Cite 2011.
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_304.pdf
- [4] Spektroskopie – wikipedie [on-line]. Cite 2011.
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Spektroskopie>
- [5] *Fotočlánek – wikipedie* [on-line]. Cite 2011. <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotočlánek>
- [6] *Spectral Response* [on-line]. Cite 2011, Welcome to PVCROM | pveducation.org.
<http://pvcrom.pveducation.org/CELLOPER/spectral.htm>
- [7] *Spectral Response | Photosensors Tutorial | Specifier Report | NLPiP | LRC* [on-line]. Cite 2011. <http://www.lrc.rpi.edu/nlpip/tutorials/photosensors/spectral.asp>
- [8] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y. and Warta, W. (2011), *Solar cell efficiency tables (version 37)*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 19: 84–92. doi: 10.1002/pip.1088
- [9] *FyzWeb – Jak funguje fotoaparát* [on-line]. Cite 2011.
http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=107&id_casti=45
- [10] *Zareni cerneho telesa* [on-line]. Cite 2011.
http://fyzika.gymsusice.cz/web/data/texty/Zareni_cerneho_teslesa.pdf
- [11] *Goniofotometr – wikipedie* [on-line]. Cite 2011.
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Goniofotometr>
- [12] Placko, D.: *Physical Principles of Optical, Thermal and Mechanical Sensors*. Lepoutre, F. In Fundamentals of Instrumentation and Measurement, ISTE, London, UK. ISBN: 9781905209392, p. 71 – 136
- [13] Webster, J.: *Photometry and Radiometry*. Schuermeyer, F; Pickenpaugh, T. In Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999, CRC Press LLC, ISBN: 0-8493-2145-X, ISSN: 1523-3014, chapter 56.
- [14] Droz, C., Roux, J., Boutinard Rouelle S., Valitutti, P., Beljean, P.: Mastering the Spectrum in Class A Pulsed Solar Simulators. In *Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. 1-5 September 2008, Valencia, Spain. ISBN 3-936338-24-8, p. 326 – 329.
- [15] Lund, H.; Nilsen, R.; Salomatova, O.; Skåre, D.; Riisem, E.: *Basic Principles of Photovoltaics* [on-line]. 2008. <http://org.ntnu.no/solarcells/pages/Chap.2.php>