

МЕЋУСОБНО ПОРЕЂЕЊЕ РЕЛАТИВНИХ СПЕКТРАЛНИХ ОСЕТЉИВОСТИ РЕФЕРЕНТНИХ ФОТОМЕТРИЈСКИХ ДЕТЕКТОРА

Владан Шкерковић, *Савезни завод за мере и драгоцене метале*
 Предраг Вукадин, *Савезни завод за мере и драгоцене метале*
 Вељко Зарубица, *Савезни завод за мере и драгоцене метале*

Садржај - У циљу утврђивања метролошког својства референтних фотометријских детектора у погледу релативне спектралне осетљивости извршено је њихово међусобно поређење. У раду је приказана метода која је коришћена при поређењу, као и резултати добијени међусобним поређењем. Извршена је анализа добијених резултата и процјењена је мерна несигурност методе.

1 УВОД

Развој методе за одређивање спектралне осетљивости детектора представља најважнији корак ка успостављању мерног јединства у области мерења оптичког зрачења заснованог на јединственој скали апсолутне спектралне осетљивости детектора зрачења.

У оквиру пројекта предвиђеног концепцијом развоја Лабораторије за фотометрију и радиометрију Савезног завода за мере и драгоцене метале [1], постављена је метода којом је извршено међусобно поређење релативних спектралних осетљивости референтних фотометријских детектора.

Постављена метода оријентисана је на детекторе са $V(\lambda)$ корекцијом, пре свега зато што су такви детектори са познатим спектралним осетљивостима једино и били доступни. Такође, један од разлога било је и тренутно стање у Лабораторији где је област фотометрије најразвијенија, као и то да је ово област у којој је постављену методу могуће најпре применити. Наиме, одређивање грешке спектралне осетљивости фотометријских детектора је обавезан део код испитивања типа мерила фотометријских величина (луксметара, фотометара).

2 МЕТОДА И ПОСТУПАК МЕРЕЊА

Као најпогоднија метода за одређивање спектралне осетљивости пријемника зрачења, имајући у виду могућности опреме која је коришћена, одабрана је метода замене са континуалним скенирањем спектра [2].

Да би се утврдила несигурност преношења вредности релативне спектралне осетљивости извршено је међусобно поређење детектора (у

овом случају узети као еталонски) који се налазе у саставу ове референтне групе.

Међусобно поређење еталонских детектора вршено је њиховим наизменичним постављањем на излазу из спектрорадиометријског система, и мерењем одзива који је сразмеран спектралној осетљивости детектора, односно:

$$\frac{I_{ph1}(\lambda_n)}{s_{1m}(\lambda_n)} = \frac{I_{ph2}(\lambda_n)}{s_{2m}(\lambda_n)} = \frac{I_{ph3}(\lambda_n)}{s_{3m}(\lambda_n)} = \left(\frac{I_{ph1}(\lambda_n)}{s_i(\lambda_n)} \right) \quad (1)$$

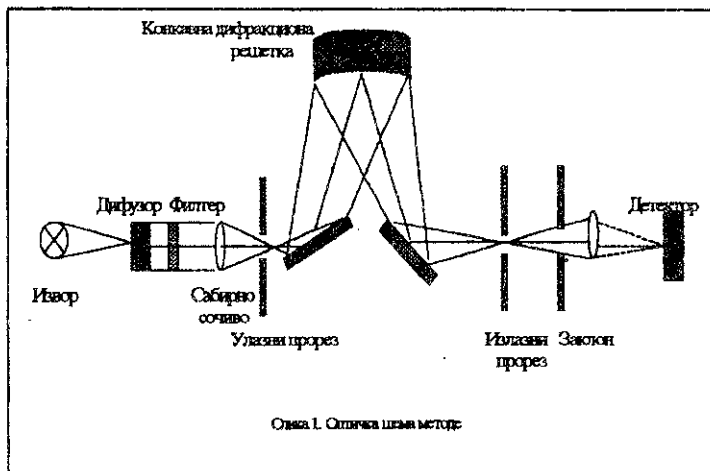
где је: $s_{im}(\lambda_n)$ - релативна спектрална осетљивост i -тог детектора

$I_{phi}(\lambda_n)$ - одзив i -тог детектора

$s_i(\lambda_n)$ - еталонска вредност релативне спектралне осетљивости i -тог детектора.

Из једнакости (1) може се одредити спектрална осетљивост сваког појединог детектора који учествује у поређењу ($s_{im}(\lambda_n)$).

Оптичка шема постављене методе приказана је на слици 1.



Као извор зрачења коришћена је волфрам халогена сијалица снаге 1000 W, за чије је напајање коришћен стабилизациони извор једносмерне струје стабилности реда реда 1×10^{-5} .

Улазни оптички део спектрорадиометријског система конструиран је тако да сабирно сочиво пројектује дифузор на улазни прорез монохроматора, тако да је положај пројекције дифузора на дифракциону решетку независан од положаја извора зрачења у видном пољу. Четири

филтера су употребљена да елиминишу више хармонике таласних дужина које производи дифракциона решетка монохроматора.

Монохроматор (Слика 1.) користи конкавну дифракциону решетку која покрива спектрални опсег од 200-1100 нм.

Биконвексно сочиво на излазу има улогу да пројектује лик излазног прореза у равни детектора у односу 1:1.

Као еталонски детектори коришћене су три силицијумске фотоћелије чија је спектрална осетљивост веома добро прилагођена спектралној осетљивости људског ока (са познатим вредностима спектралне осетљивости одређеним у релативном облику). Вредности релативне спектралне осетљивости еталонских детектора познате су са мерном несигурношћу $\leq 1\%$, при чему је метролошка следивост остварена према РТВ - у (Physikalisch-Technische Bundesanstalt). Еталонски детектори су термостабилисани и снабдевени су дифузорима чија је улога да равномерно распореди зрачење по осетљивој површини детектора.

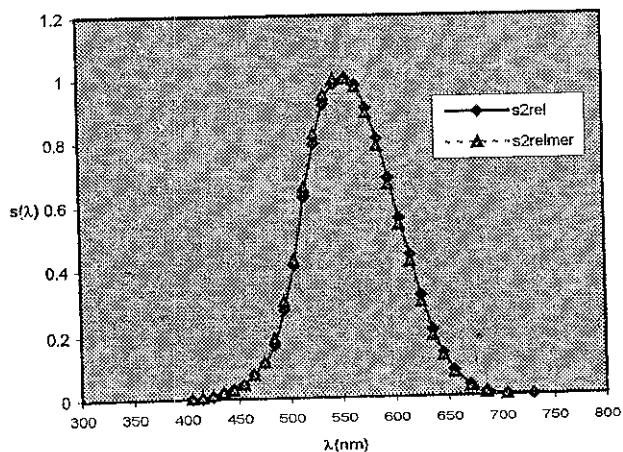
За појачање, обраду и исказивање излазног сигнала коришћен је I_{ph} метар - мерило фотострује, који је преко GPIB интерфејса прикључен на рачунар, чиме је обезбеђена аутоматска аквизиција података.

3 РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА

У табели 1. приказани су резултати међусобног поређења детектора из референтне групе, као и одступања добијених вредности релативне спектралне осетљивости детектора у односу на вредности дате у сертификату произвођача. Детектори (њихове осетљивости) означени су редним бројевима 1, 2, 3 по редоследу укључивања, и то: бр.1 - LMT P15SCO 1285205, бр.2 - LMT P30SCT 01285204, бр.3 - LMT P06FCO

Табела 1. Резултати међусобног поређења референтних фотометријских детектора.

λ (nm)	S _{1rel}	S _{2rel}	S _{3rel}	S _{1relmer}	S _{2relmer}	S _{3relmer}	δ_{s1}	δ_{s2}	δ_{s3}
405	0.001	0.001	0.002	0.000	0.00	0.000	-1.000	2.000	-1.000
415	0.003	0.002	0.003	0.000	0.00	0.000	-1.000	2.000	-1.000
425	0.007	0.007	0.009	0.009	0.01	0.000	0.131	0.698	-1.000
435	0.015	0.018	0.016	0.016	0.02	0.013	0.062	0.135	-0.197
445	0.028	0.030	0.022	0.026	0.03	0.024	-0.063	-0.006	0.069
455	0.048	0.045	0.036	0.045	0.04	0.039	-0.064	-0.026	0.090
465	0.076	0.074	0.067	0.073	0.07	0.069	-0.046	0.010	0.036
475	0.106	0.111	0.117	0.103	0.11	0.116	-0.032	0.041	-0.009
485	0.169	0.167	0.181	0.163	0.18	0.165	-0.037	0.128	-0.091
495	0.274	0.274	0.254	0.265	0.30	0.237	-0.032	0.101	-0.068
505	0.402	0.412	0.383	0.398	0.43	0.370	-0.010	0.043	-0.033
515	0.631	0.628	0.634	0.629	0.65	0.607	-0.002	0.045	-0.042
525	0.800	0.793	0.796	0.808	0.82	0.755	0.010	0.041	-0.051
535	0.920	0.921	0.921	0.928	0.94	0.885	0.008	0.031	-0.039
545	0.987	0.983	0.979	0.990	0.99	0.960	0.003	0.016	-0.019
555	1.000	1.000	1.000	1.000	1.00	1.000	0.000	0.000	0.000
565	0.980	0.980	0.986	0.969	0.97	1.003	-0.011	-0.006	0.017
575	0.905	0.909	0.912	0.890	0.89	0.943	-0.017	-0.017	0.034
585	0.805	0.809	0.817	0.791	0.78	0.856	-0.018	-0.030	0.047
595	0.683	0.683	0.706	0.667	0.66	0.743	-0.023	-0.030	0.053
605	0.553	0.555	0.561	0.536	0.53	0.597	-0.031	-0.034	0.065
615	0.436	0.440	0.435	0.420	0.42	0.471	-0.036	-0.046	0.082
625	0.305	0.313	0.307	0.296	0.29	0.334	-0.029	-0.058	0.087
635	0.206	0.209	0.202	0.201	0.19	0.223	-0.024	-0.079	0.103
645	0.140	0.138	0.131	0.133	0.12	0.146	-0.047	-0.069	0.116
655	0.080	0.081	0.076	0.077	0.07	0.086	-0.036	-0.093	0.129
670	0.032	0.034	0.031	0.032	0.02	0.036	-0.010	-0.153	0.163
685	0.009	0.011	0.012	0.011	0.00	0.012	0.174	-0.205	0.031
705	0.003	0.003	0.005	0.006	0.00	0.000	1.052	0.052	-1.000
730	0.000	0.001	0.002						



Слика 2. Крива релативне спектралне осетљивости детектора, бр.2 - LMT P30SCT, добијена међусобним поређењем у односу на криву дату сертификатом.

12852006. Као илустрација добијених резултата, на слици 2. приказана је крива релативне спектралне осетљивости једног од еталонских детектора која је добијена мерењем, у односу на унапред познату криву релативне спектралне осетљивости дату сертификатом произвођача.

4 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА МЕРЕЊА

Један од главних проблема који се јављао при мерењу а посебно при међусобном поређењу, био је мали излазни сигнал из детектора на таласним дужинама где детектори имају релативно малу осетљивост (таласним дужинама мањим од 435 nm и већим од 685 nm), а што се одразило и на резултате мерења (Табела 1.) тако да вредности осетљивости добијене на тим таласним дужинама нису разматране у даљој анализи резултата мерења.

Узрок овог налази се у самој поставци методе, односно у опреми која је коришћена. Постојање дифузора на сваком од еталонских детектора, као и постојање дифузора на улазу спектрорадиометријског система, производе слабљење флукса зрачења од сто до хиљаду пута. Превазилажење овог проблема било је могуће скидањем дифузора који се налази на улазу спектрорадиометра. То је, међутим, довело до других грешака. Наиме, оптички систем спектрорадиометра је конструисан тако да сочиво (фиксно постављено), које је фокусирано на бесконачност, пројектује лик дифузора у равни улазног прореза монохроматора, чиме је остварено да је лик пројектован на улазни прорез независан од положаја извора зрачења у видном пољу спектрорадиометра. Скидање дифузора је, међутим, проузроковало добијање неuniformне расподеле (попречне и подужне) озрачености у равни улазног прореза и на дифракционој решетки монохроматора, што је довело до грешака у резултатима мерења. Резултати мерења спектралне осетљивости добијени на овај начин показали су мање расипање на горе поменути таласним дужинама али је средње расипање на целом опсегу таласних дужина на коме је вршено мерење било веће. С тога је, као оптималније решење, задржана првобитна поставка методе.

У Табели 1. дати су резултати међусобног поређења еталонских детектора и приказано је одступање добијених вредности осетљивости од унапред познатих вредности (из сертификата). Резултати за сваки од детектора су дати по редним бројевима на основу редоследа њиховог укључивања у поређење. Из табеле се може видети да је најмање одступање добијено за први детектор, односно највеће расипање је добијено за трећи детектор. Оваква правилност је и очекивана, и она је највећим делом последица линеарног дрефта извора зрачења. Уобичајни поступак за корекцију грешака услед ове појаве је мерење у две серије (један пун круг поређења), тако да се детектори у свакој од серија укључују по обрнутим редоследу [3]. Применом оваког поступка добијено је одговарајуће усредњавање резултата,

међутим, због коришћене методе која подразумева замену детектора скидањем једног и постављањем следећег при чему није могуће обезбедити постављање детектора у потпуно идентичан положај у обе серије, добијени резултати су показали веће одступање.

Недовољно прецизно дефинисани положаји детектора при мерењу, као и разлике у осетљивости по површини детектора, уједно су и највећи извори грешака, односно већег одступања резултата мерења од унапред дефинисаних вредности.

Детектори, који су коришћени као еталонски у овом поређењу, су фотометријски детектори намењени мерењу осветљености (интегралном мерењу), са релативно великим осетљивим површинама и са "веома добром" $V(\lambda)$ корекцијом [4], која је изведена управо подешавањем осетљивости по површини детектора, при чему сваки детектор има дифузор, чија је улога да осветљеност расподела унормално по осетљивој површини. Спектралну осетљивост оваких детектора најбоље је одређивати озрачивањем целе површине детектора (која је представљена дифузором) колимисаним снопом зрачења који је унормалан по попречном пресеку [2]. Опрема која је била на располагању, није омогућавала постављање овакве методе са задовољавајућим пречником и унормалношћу снопа, тако да је дошло до већ поменутих грешака.

Из Табеле 1. види се да је просечно одступање резултата мерења (изражено преко релативног одступања), на опсегу таласних дужина од 435 nm до 685 nm, дато у процентима 5,26 %, а изражено преко средњег квадратног одступања за сваки детектор 3,72 %.

5 ПРОЦЕНА МЕРНЕ НЕСИГУРНОСТИ

Мерна несигурност постављене методе поређења у суштини представља мерну несигурност преношења вредности релативне спектралне осетљивости фотометријских детектора.

Највеће изворе несигурности представљају расипање (просечно одступање) резултата при поређењу као и мерна несигурност са којом је одређена релативна спектрална осетљивост еталонског детектора. Расипање резултата мерења при мерењу фотострује није прелазило 0,05 % па се с тога може занемарити у односу на расипање резултата добијених међусобним поређењем детектора.

Нелинеарност еталонских детектора је $\leq 0,2$ %, док је нелинеарност мерења фотострује $\leq 0,1$ %.

Компоненте мерне несигурности које се односе на нестабилност извора зрачења и система за напајање извора дате су у Табели 2. Овим је обухваћена и промена околне температуре у границама $\pm 1^\circ\text{C}$.

Компонента несигурности код мерења осетљивости (s_{λ}) детектора која је последица несигурности скале таласне дужине u_{λ} добија се из

Табела 2. Компоненте мерне несигурности које се односе на нестабилност извора зрачења и система за напајање

Извор несигурности	Процењен утицај на светлосна мерења (1σ)
Нестабилност напајања сијалица ($3 \cdot 10^{-6}$)	0,02 %
Нестабилност сијалица	0,05 %
Корен из збира квадрата (u_0)	0,054 %

производа мерне несигурности заузимања таласне дужине u_1 ($\pm 1,0$ nm - податак од стране произвођача) и промене осетљивости са таласном дужином као $u_2 = u_1(\Delta s_\lambda/\Delta \lambda)$. Ова компонента мерне несигурности ће бити највећа на стримим деловима криве спектралне осетљивости (на пример од 505 nm до 515 nm) и за њу се израчунавањем добија да је у најгорем случају $u_2 \leq 1,13$ %, сведено на 1σ .

За компоненту несигурности која потиче од расутог зрачења узима се да је $\leq 0,6$ % (податак добијен од стране произвођача).

Табела 6. Одређивање укупне мерне несигурности преношења вредности релативне спектралне осетљивости детектора зрачења

Компоненте	Мерна несигурност (1σ)
калибрација еталон -детектора	1,00 %
расипање резултата мерења при поређењу	3,72 %
нелинеарност детектора и мерног инструмента	0,22 %
нестабилност извора	0,06 %
мерна несигурност заузимања таласне дужине	1,13 %
расуто зрачење	0,60 %
Укупна мерна несигурност (корен из збира квадрата)	4,07 %

Укупна мерна несигурност методе за одређивање спектралне осетљивости детектора зрачења израчунава се као комбинавана мерна несигурност, [5], и дата је у Табели 6.

6 ЗАКЉУЧАК

Резултати међусобног поређења детектора из такозване референтне групе дају слику о постављеној методи и о тренутним могућностима Лабораторије, а уједно указују на узроке добијених мерних несигурности. Добијени резултати (расипање резултата мерења и укупна мерна несигурност) могу се сматрати веома добрим, обзиром на степен импровизације која је учињена приликом поставке методе. Овако постављена метода може се практично већ користити код одређивања грешке спектралне осетљивости код испитивања типа луксметара класа 10 и 15. Као најважнији извори несигурности, уочени су пре свега непогодна конструкција детектора који су у нашем случају коришћени као еталонски, недовољна поузданост постављања детектора у референтни положај, несигурност постављања таласне дужине монохроматора и расуто зрачење у монохроматору.

Двоструки монохроматор, који је од пре годину дана набављен у Лабораторији за фотометрију и радиометрију, представља основу за даљи развој методе за одређивање спектралне осетљивости детектора зрачења, у циљу чега је потребно реализовати одговарајући улазно-излазни оптички систем као и покретно механичко постоље, који би са потребном тачношћу обезбедили осветљавање на тачно дефинисан начин, детектора који се пореде, као и њихово постављање (замену) у референтни положај. Набавком одговарајућих еталонских детектора, ова метода би требало да представља основу за целокупан будући развој у области мерења оптичког зрачења.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] П. Вукадин, В. Шкеровић, В. Зарубица, "Савремене тенденције у развоју метрологије оптичког зрачења", Конгрес метролога Југославије 2000, Нови Сад, 2000.
- [2] Publication CIE N^o 64., "Determination of the Spectral Responsivity of Optical Radiation Detectors", 1984.
- [3] R. Köhler, R. Goebel, R. Pello, "Report on the International Comparison of Spectral Responsivity of Silicon Detectors". CCPR/94 - 1, 9 December 1993.
- [4] DIN 5032, Dezember 1985.
- [5] ISO, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1993.

Abstract - In order to determine relative spectral responsivity of reference photometric detectors, their mutual comparison was performed. In this paper, the method of comparison is described, and the measurement results together with measurement uncertainty analysis are presented.

MUTUAL COMPARISON OF RELATIVE SPECTRAL RESPONSIVITY OF REFERENCE PHOTOMETRIC DETECTORS

Vladan Škerović, Predrag Vukadin, Veljko Zarubica