

Lucyna HEMKA
Maciej RAFAŁOWSKI

ANALIZA WIDMOWEGO WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPUSZCZANIA SZKŁA O RÓŻNYM SKŁADZIE CHEMICZNYM W ZAKRESIE 300–380 NM^{*)}

STRESZCZENIE *Celem badań jest opracowanie symulatora światła dziennego D_{65} z wykorzystaniem wysokoprężnej lampy wyładowczej – metalohalogenkowej. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych prac stwierdzono możliwości poprawy charakterystyk emisyjnych lamp wyładowczych, wykorzystywanych dla uzyskania wzorca światła dziennego D_{65} (kategorii AB). Jak wykazały dotychczasowe analizy i pomiary prowadzone nad uzyskanym modelem symulatora standardowo stosowane balony, z twardego szkła barokrzemowego, w znacznym stopniu ograniczają emisję składowej nadfioletowej, co jest przyczyną niskiej kategorii symulatora w zakresie UV (kat. C).*

Przeprowadzono wstępne analizy możliwości zastosowania jako materiału na balony emiterów szkieł o odmiennej charakterystyce transmisyjnej – szkieł optycznych, na ogół stosowanych w wytwarzaniu aparatury optycznej i oferowanych w katalogach wyspecjalizowanych dostawców.

Wstępna ocena właściwości wskazuje, że można oczekiwać poprawy charakterystyki emisyjnej symulatora w zakresie UV w pożądanym kierunku. Jednak nie odbywa się to bez wpływu na warunki transmisji promieniowania w zakresie widzialnym, co może wymagać dalszej optymalizacji spektrum emisyjnego symulatora za pomocą innych narzędzi analitycznych.

Słowa kluczowe: *symulator światła dziennego D_{65} , spektrum emisyjne, emisja składowej UV, charakterystyka transmisyjna szkieł optycznych*

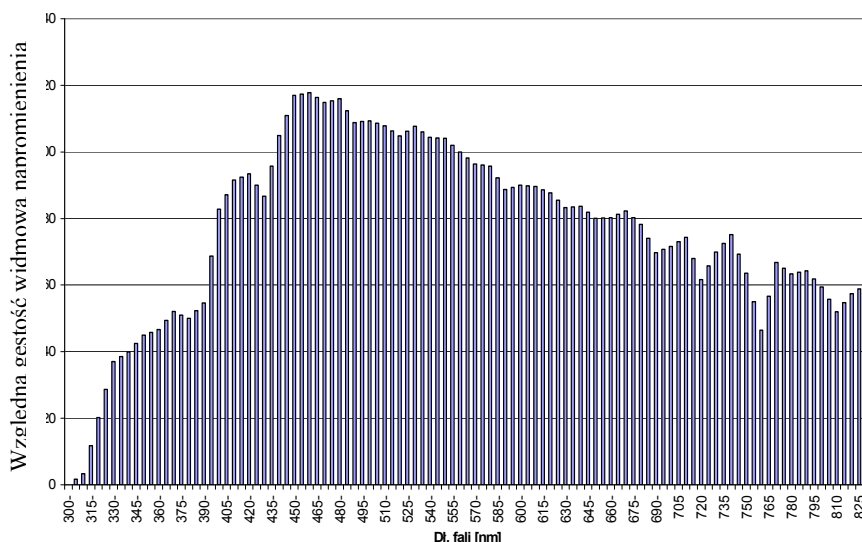
^{*)} Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2008 jako projekt badawczy nr 3T10C03530.

dr Lucyna HEMKA
e-mail: l.hemka@iel.waw.pl
Instytut Elektrotechniki
prof. dr hab. inż. Maciej RAFAŁOWSKI
e-mail: kpomraf@pb.edu.pl
Politechnika Białostocka

1. WPROWADZENIE: SPEKTRUM EMISYJNE WZORCA ŚWIATŁA DZIENNEGO D_{65}

Celem pracy jest opracowanie symulatora światła dziennego D_{65} z wykorzystaniem wysokoprężnej lampy wyładowczej – metalohalogenkowej do zastosowania w kolorymetrii, np. przy ocenie parametrów barwy wszędzie tam, gdzie wymagane jest stosowanie źródła emitującego światło dzienne.

Za najbardziej interesujący spośród obecnie stosowanych praktycznie wzorców promieniowania światła białego można uznać iluminant D_{65} , którego rozkład widmowy odpowiada rozkładowi uśrednionego promieniowania dziennego w różnych porach dnia, na różnej szerokości geograficznej. Taki rozkład promieniowania występuje dla ciała czarnego o temperaturze 6500 K [rys. 1].



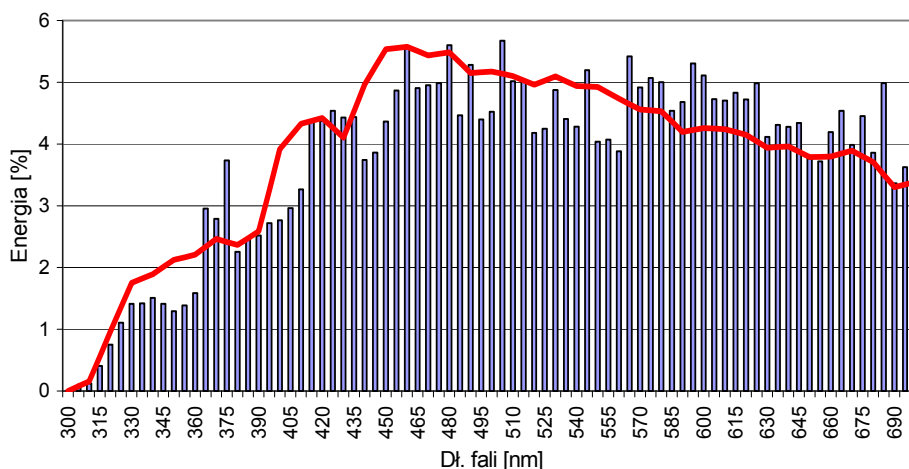
Rys. 1. Iluminant D_{65} (CIE)

Wymagania teoretyczne dla iluminantu D_{65} , zalecone przez CIE, nie są w pełni realizowane przez żadne znane sztuczne źródło światła ze względu na znaczne różnice we względnych rozkładach widmowych tych źródeł w stosunku do rozkładów iluminantów światła dziennego. Praktycznie realizacja urządzeń, spełniających funkcje iluminantu, odbywa się poprzez zastosowanie wybranych sztucznych źródeł światła zwanych symulatorami światła dziennego – o względnych rozkładach widmowych zbliżonych w różnym stopniu do rozkładu widmowego iluminantu teoretycznego.

2. SPEKTRUM SYMULATORA ŚWIATŁA DZIENNEGO D₆₅

W ramach prac statutowych Instytutu Elektrotechniki opracowano metody kształtowania widma promieniowania wysokoprężnych lamp wyładowczych na drodze zmian czynników konstrukcyjnych i technologicznych oraz warunków energetycznych. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań stwierdzono możliwości dalszej poprawy charakterystyk emisyjnych lamp wyładowczych. W związku z tym przewidziano wykonanie prac nad uzyskaniem wzorca światła dziennego D₆₅ (kategorii AB) spełniającego wszelkie wymagania norm i procedur dotyczących procesów wzorcowania. Jednym z rodzajów źródła światła, rokujących perspektywę realizacji ww. zadania, są wysokoprężne lampy wyładowcze – metalohalogenkowe. Procesy prowadzące do emisji promieniowania z łuku lampy wyładowczej w znacznym stopniu mogą być sterowane i kontrolowane przez konstruktora lampy. Wynika to z zasad konstrukcji lampy, ilościowego i jakościowego napełnienia jarznika jak i metody prowadzenia procesu wyładowczego. Przyjęcie powyższych założeń pozwoliło na wykonanie prac nad metodami kształtowania widma emisyjnego lampy wyładowczej.

Prace badawcze zostały zakończone wykonaniem modelu symulatora światła dziennego D₆₅ kategorii BC, obliczonej według procedury CIE [1,2,3] oceny przydatności sztucznych źródeł światła do stosowania ich jako symulatory wzorców promieniowania o pożądanym rozkładzie widmowym [rys. 2].

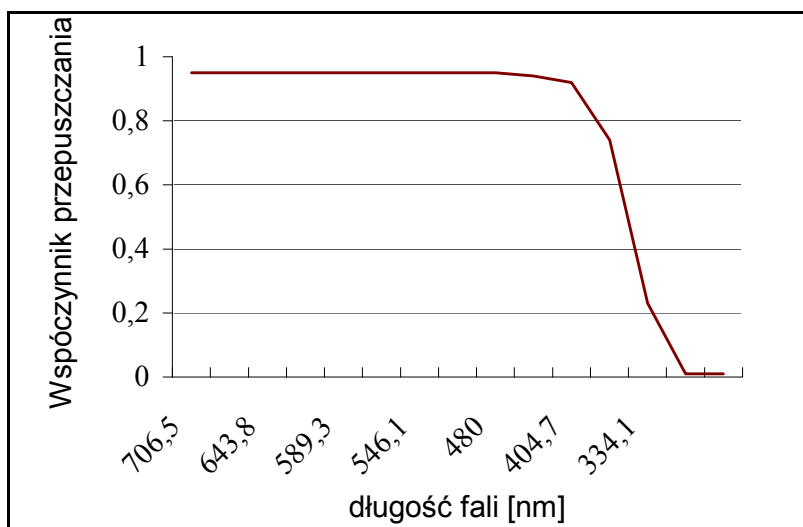


Rys. 2. Symulator D₆₅ z wysokoprężnej lampy wyładowczej

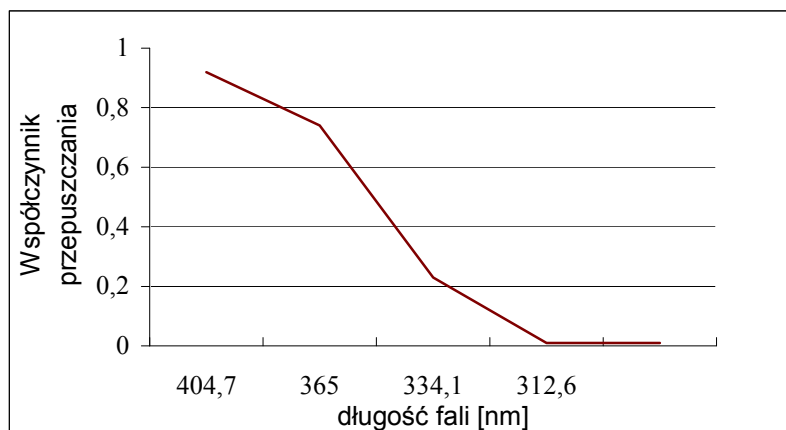
W trakcie badań parametrów promienistych uzyskanego symulatora [4,5] stwierdzono, że charakteryzuje się on bardzo wysokim wskaźnikiem oddawania barw ($R_a = 97\%$), praktycznie nieosiągalnym do tej pory przez lampy wyładowcze. Wartość tego parametru daje możliwości wykorzystania praktycznego lampy w obszarach pozakolorymetrycznych, np. do ogólnych celów oświetleniowych.

3. PROBLEM OPTYMALIZACJI SZKŁA ZEWNĘTRZNEGO ZE WZGLĘDU NA CHARAKTERYSTYKĘ TRANSMISJI W WYBRANYCH ZAKRESACH WIDMA EMISYJNEGO

Istotnym problemem realizacyjnym jest konieczność zmiany szkła zewnętrznego balonu lampy. Jak wykazały prace prowadzone nad uzyskanym modelem symulatora, dotychczas stosowane balony z typowego szkła twardego (barokrzemowego), w znacznym stopniu ograniczają emisję składowej nadfioletowej, co jest przyczyną niskiej kategorii symulatora w zakresie UV (kat. C). Charakterystykę transmisyjną tego materiału, o standardowo stosowanej grubości warstwy $d = 3$ mm, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3a. Transmisja całkowita szkła barokrzemowego, stosowanego w dotychczasowych realizacjach symulatora



Rys. 3b. Transmisja szkła barokrzemowego, stosowanego w dotychczasowych realizacjach symulatora dla zakresu 400÷300 nm

Na obecnym etapie badań podjęto wstępne prace analityczne nad wykonaniem balonów zewnętrznych lamp ze szkła o tak dobranym składzie chemicznym, aby umożliwiał emisję składowej nadfioletowej w stopniu większym, niż balony ze szkła tradycyjnego. W związku z powyższym przebadano różne typy szkieł w zakresie widmowego współczynnika przepuszczania w obszarze widmowym 300–350 nm dla umożliwienia doboru optymalnego materiału, zarówno pod względem składu chemicznego domieszek, jak i grubości warstwy.

Pierwszym aspektem analizy była ocena perspektyw zastosowania balonu ze szkła kwarcowego, jako typowego materiału stosowanego w lampach o zastosowaniach technicznych i medyczno-kosmetycznych, przeznaczonych do naświetleń w zakresie promieniowania UV. Podawane w literaturze i ofertach handlowych charakterystyki transmisyjne takiego materiału wykazują bardzo równomierną charakterystykę transmisyjną. Przykładowe dane na podstawie danych ofertowych firmy Hoben International przedstawiono w tabeli 1. Wskazują one na bardzo wysoką czystość składu chemicznego z minimalną zawartością zanieczyszczeń.

TABELA 1

Skład chemiczny kwarcu topionego

SiO ₂	99,9%	Al ₂ O ₃	< 0,02%	CaO	< 0,01%	K ₂ O	< 0,01%	P ₂ O ₅	< 0,02%
Mn ₃ O ₄	< 0,01%	HfO ₂	< 0,01%	ZnO	< 0,01%	SrO	< 0,01%	CuO	< 0,01%
TiO ₂	< 0,01%	Fe ₂ O ₃	< 0,01%	MgO	< 0,02%	Na ₂ O	< 0,03%	Cr ₂ O ₃	< 0,01%
ZrO ₂	< 0,02%	PbO	< 0,02%	BaO	< 0,01%	SnO ₂	< 0,01%		

L.O.I. @ 1025°C -0.10% Sulphur Trioxide after L.O.I. and Fusion 0.05%

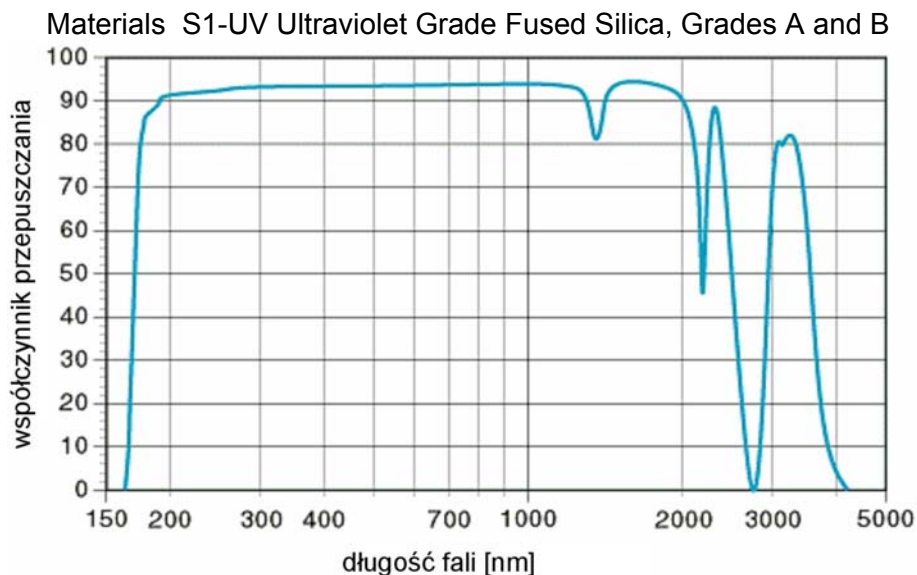
Przykładową charakterystykę transmisyjną omawianego materiału przedstawia rysunek 4. Wcześniejsze doświadczenia w zakresie doboru różnych materiałów na balony emiterów promieniowania na bazie lamp wyładowczych

wykazały jednak problemy z realizacją urządzeń o ww. precyzyjnie zdefiniowanych charakterystykach widmowych.

Ponieważ w ocenie charakterystyk transmisyjnych balonu lampy istotna jest zarówno charakterystyka pochłaniania wewnętrznego materiału, jak i odbicie na powierzchniach, określane zazwyczaj prostą zależnością matematyczną, to współczynnik odbicia na pojedynczej powierzchni warstwy dielektrycznej zależy od jej współczynnika załamania

$$\rho = \left(\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda) + 1} \right)^2 \quad (1)$$

W związku z tym w tabeli 2 przedstawiono wartości współczynnika załamania dla tego materiału.



Rys. 4. Charakterystyka transmisyjna kwarcu topionego

TABELA 2

Współczynnik załamania kwarcu topionego

Długość fali μm	Współczynnik załamania	Długość fali μm	Współczynnik załamania	Długość fali μm	Współczynnik załamania	Długość fali μm	Współczynnik załamania
0,2	1,55051	0,5	1,46233	0,9	1,45175	1,9	1,43951
0,22	1,52845	0,55	1,46008	1,0	1,45042	2,0	1,43809
0,25	1,50745	0,59	1,45846	1,1	1,4492	2,2	1,43501
0,3	1,48779	0,60	1,45804	1,2	1,44805	2,4	1,43163
0,32	1,48274	0,65	1,45653	1,3	1,44692	2,6	1,42789
0,36	1,47529	0,7	1,45529	1,5	1,44462	2,8	1,42377
0,4	1,47012	0,75	1,45424	1,6	1,44342	3,0	1,41925
0,45	1,46557	0,8	1,45332	1,7	1,44217	3,2	1,41427
		0,85	1,4525	1,8	1,44087	3,37	1,4099

W tym konkretnym przypadku emisja urządzenia w zakresie UV, będąca przedmiotem analiz w niniejszym zadaniu badawczym, ma charakter zdecydowanie nadmierny. Sugestia zastosowania dodatkowych, zewnętrznych w stosunku do konstrukcji symulatora urządzeń filtrujących, zostanie ew. przeanalizowana w późniejszym czasie, ze względu na spodziewane ograniczenie możliwości aplikacyjnych aparatury. Na obecnym etapie przeprowadzono wstępne analizy możliwości zastosowania jako materiału na balony emiterów szkieł o odmiennej charakterystyce transmisyjnej – szkieł optycznych, na ogół stosowanych w wytwarzaniu aparatury optycznej i oferowanych w katalogach wyspecjalizowanych dostawców.

4. POMIARY CHARAKTERYSTYKI TRANSMISJI WIDMOWEJ WYBRANYCH SZKIEŁ OPTYCZNYCH

W dostępnym krótkim okresie czasu realne było uzyskanie kilku próbek z następujących materiałów, wg katalogu firmy Schott: K7; BK7; SK5; FK5; BK10 o następujących charakterystykach, przedstawionych w tabelach 3÷5.

TABELA 3

Współczynniki załamania szkieł optycznych dla wybranych długości fali w zakresie 700÷300 nm

długość fali [nm]	K7 n	BK7 n	SK5 n	FK5 n	BK10 n
706,5	1,50707	1,51289	1,58451	1,4841	1,49419
656,3	1,50854	1,51432	1,58619	1,48535	1,49552
643,8	1,50895	1,51472	1,58666	1,48569	1,49589
632,8	1,50934	1,51509	1,5871	1,48601	1,49623
589,3	1,51105	1,51673	1,58904	1,48743	1,49775
587,6	1,51112	1,5168	1,58913	1,48749	1,49782
546,1	1,51314	1,51872	1,59142	1,48914	1,4996
486,1	1,517	1,52238	1,59581	1,49227	1,50296
480	1,51748	1,52283	1,59635	1,49266	1,50337
435,8	1,52159	1,52668	1,601	1,49593	1,5069
404,7	1,5254	1,53024	1,6053	1,49894	1,51014
365	1,53189	1,53627	1,6126	1,50401	1,51561
334,1	1,53891	1,54272	1,62043	1,50939	1,52144
312,6	1,54537	1,54862	1,62759	1,51428	1,52674
296,7				1,51867	1,53151

TABELA 4

Transmisja wewnętrzna ww. szkieł optycznych dla warstwy $d = 3$ mm, obliczona na podstawie informacji katalogowych producenta

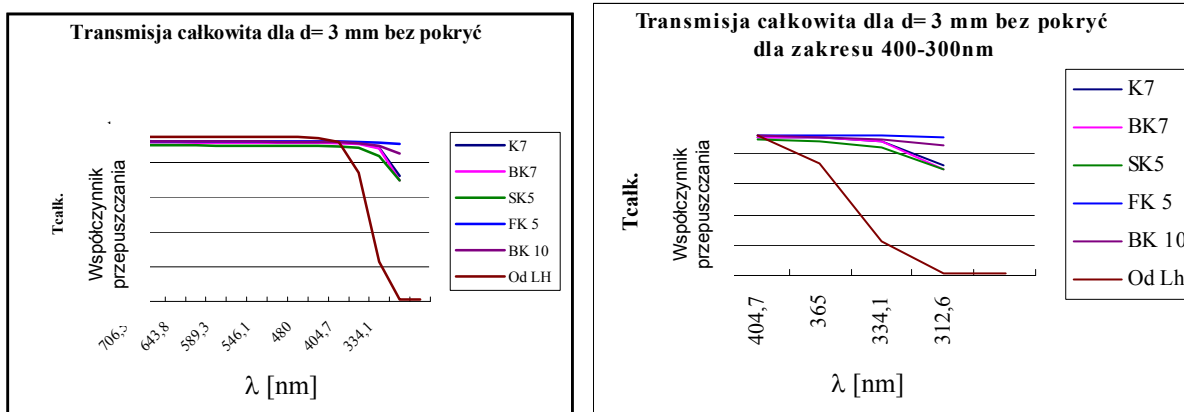
długość fali [nm]	K7	BK7	SK5	FK5	BK10
706,5	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
656,3	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
643,8	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
632,8	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
589,3	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
587,6	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
546,1	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
486,1	0,998	0,999	0,998	0,999	0,998
480	0,998	0,999	0,998	0,999	0,998
435,8	0,998	0,999	0,999	0,999	0,999
404,7	0,999	0,999	0,998	0,999	0,998
365	0,996	0,996	0,99	0,999	0,995
334,1	0,971	0,97	0,939	0,997	0,979
312,6	0,795	0,769	0,783	0,987	0,9314
296,7	0,396	0,353	0,573	0,9597	0,751

TABELA 5

Transmisja zewnętrzna szkieł optycznych dla warstwy $d = 3$ mm, obliczona na podstawie informacji katalogowych producenta z uwzględnieniem odbicia na powierzchniach powłoki zgodnie ze wzorem (1)

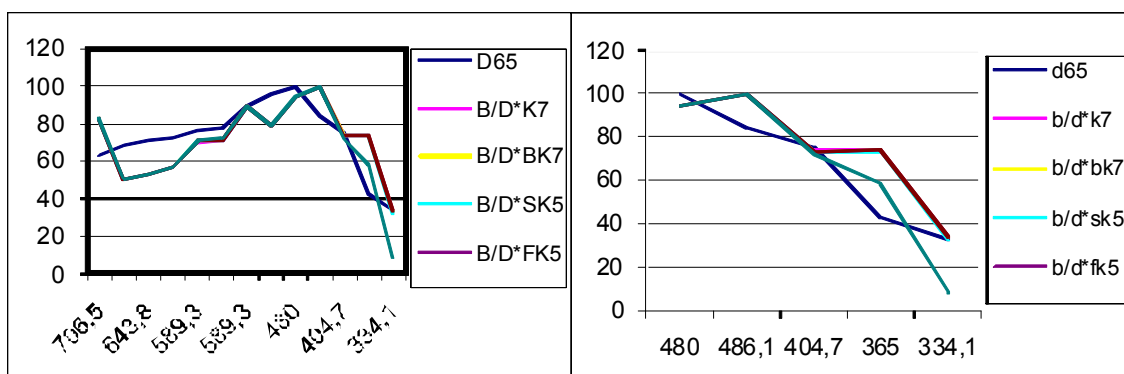
długość fali [nm]	K7	BK7	SK5	FK5	BK10
706,5	0,918939	0,9175	0,89942	0,924561	0,922102
656,3	0,918576	0,917146	0,898989	0,924257	0,921777
643,8	0,918475	0,917047	0,898868	0,924175	0,921686
632,8	0,918378	0,916955	0,898755	0,924097	0,921603
589,3	0,917956	0,916549	0,898256	0,923751	0,92123
587,6	0,917938	0,916531	0,898233	0,923737	0,921213
546,1	0,917439	0,916055	0,897643	0,923335	0,920777
486,1	0,915564	0,915144	0,895615	0,922571	0,91903
480	0,915445	0,915032	0,895476	0,922476	0,918929
435,8	0,914425	0,914072	0,895172	0,921676	0,91898
404,7	0,914392	0,913183	0,893166	0,920939	0,917262
365	0,910029	0,908934	0,884131	0,919693	0,913155
334,1	0,885475	0,883633	0,836673	0,916527	0,897052
312,6	0,723683	0,698929	0,696212	0,906139	0,852205

Na podstawie wyżej przedstawionych symulacji uzyskano wyniki, które dogodnie można pokazać na wykresach (rys. 5).



Rys. 5. Symulowana charakterystyka transmisyjna balonu lampy symulatora D₆₅ dla kilku szkieł optycznych (wg. katalogu Schotta), w porównaniu z wariantem obecnie zrealizowanym praktycznie (LH) – z prawej strony wykres dla zakresu UV, będącego szczególnym obszarem zainteresowania w niniejszej pracy

Należy stwierdzić, że istotnym utrudnieniem prac analitycznych i ich weryfikacji praktycznej jest fakt, że dane nt. emisji samego ośrodka emitującego (jarznika lampy) nie mogą być zweryfikowane ze względów technicznych bez powłoki balonu ochronnego. W związku z tym symulowanie skutków zmiany materiału balonu mogą być ilustrowane drogą pośrednią, poprzez wyeliminowanie z uzyskanego rozkładu widmowego wpływu transmisji powłoki obecnie stosowanej (oznaczanego jako **b/d** na wykresach podanych na rysunku 6), a następnie uwzględnianie hipotetycznej zmiany sygnału wskutek wpływu transmisji powłoki balonu, wykonanej z kilku szkieł optycznych (z katalogu Schott). Wyniki takiej symulacji w wartościach unormowanych przedstawiono na wykresach (rys. 6).



Rys. 6. Symulowana charakterystyka emisyjna balonu lampy symulatora D₆₅ dla kilku szkieł optycznych (wg. katalogu Schotta), w porównaniu z wariantem obecnie zrealizowanym praktycznie (LH)

5. PODSUMOWANIE

Wstępna ocena subiektywna przedstawionych powyżej zależności pozwala stwierdzić, że należy oczekiwać poprawy charakterystyki emisyjnej symulatora w zakresie UV w pożądanym kierunku. Jednak nie odbywa się to bez wpływu na warunki transmisyjne promieniowania w zakresie widzialnym, co może wymagać dalszej optymalizacji spektrum emisyjnego lampy symulatora za pomocą narzędzi analitycznych już wcześniej opracowanych w ramach pracy doktorskiej dr. L. Hemki.

Biorąc pod uwagę perspektywiczną możliwość wprowadzenia oceny stopnia transmisji wybranych zakresów promieniowania na podstawie składu chemicznego ośrodka zarejestrowano przykładowy skład chemiczny niektórych z ww. materiałów:

BK 7:	$SiO_2 = 68,9\%$;	$B_2O = 10,0\%$;	$Na_2O = 8,8\%$;	$K_2O = 8,4\%$;	$BaO = 2,8\%$;	$As_3O_2 = 1,0\%$;
SK 5:	$SiO_2 = 38,7\%$;	$B_2O = 14,9\%$;	$Al_2O = 5,0\%$;	$BaO = 40,1\%$;	$Sb_2O_3 = 0,3\%$;	$As_3O_2 = 1,0\%$;
FK 5:	$SiO_2 = 56,9\%$;	$B_2O = 15,7\%$;	$K_2O = 5,6\%$;	$As_3O_2 = 0,2\%$;	$KHP_2 = 21,6\%$.	

Należy podkreślić, że w realizacji konkretnego urządzenia typu symulatora D_{65} konieczna jest optymalizacja całego szeregu parametrów technicznych: zarówno parametrów zasilania elektrycznego – tak pod względem wartości napięcia i natężenia prądu oraz ich stabilności czasowej, ustalenia temperatury eksploatacji i uniezależnienia jej od czynników zewnętrznych, odpowiedniej stabilności parametrów emisji widmowej, zależnej od zoptymalizowanego składu chemicznego napełnienia jarznika, jak i omawianych tutaj parametrów transmisyjnych balonu lampy – tak w sensie absorpcji materiału, jak i optymalizacji parametrów strat odbiciowych na powierzchniach granicznych powłoki w całym zakresie widmowym, wykorzystywanym w praktycznych zastosowaniach symulatora. Tak więc kolejną możliwością poprawy kategorii symulatora, która wymaga prac analitycznych i eksperymentalnych, jest zbadanie możliwości kształtowania widma emisyjnego w całym wymaganym obszarze widmowym (300 ÷ 700 nm) za pomocą termoodpornych powłok optycznych o zróżnicowanym widmowym współczynniku transmisji, nanoszonych na ścianki jarznika lampy. Przy realizacji technicznej wariantów, proponowanych na podstawie analiz przewiduje się zlecenie wykonania próbek takich powłok w firmie specjalistycznej, przebadanie ich spektrometrycznie i wybór optymalnej wersji.

Dotychczasowe wyniki prac eksperymentalnych i badań wstępnych wykazują, że prawdopodobna jest potrzeba kompleksowego rozwiązywania wszystkich ww. realizacji układu kompleksowo i we wzajemnym powiązaniu.

Głównym wynikiem przeprowadzonych prac będzie prototyp symulatora światła dziennego D₆₅ kategorii AB przeznaczony do celów pomiarów kolorymetrycznych oraz pomiaru sprawności ogniw fotowoltaicznych.

Opracowana technologia wytwarzania powtarzalnych pod względem wartości parametrów promienistych lamp o wysokim wskaźniku oddawania barw pozwoli na zastosowanie lamp do oświetlenia wnętrz w celu zapewnienia w nich światła dziennego.

LITERATURA

1. PN-91/E-04042/02 „Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Iluminanty i źródła normalne”.
2. PN-91/E-04042/01 „Pomiary promieniowania optycznego. Pomiary kolorymetryczne. Postanowienia ogólne”.
3. Hemka L., Mańk A., Mańk B.: „Uogólnione wzory na kategorię symulatora promieniowania dziennego”. Referat wygłoszony na konferencji Kolorymetrycznej KSK 2001, Szczyrk, maj 2001.
4. Hemka L., Piotrowski L.: „Model symulatora światła dziennego wykonany z wysokoprężnych lamp wyładowczych”. Referat wygłoszony na VI Sympozjum Kolorymetrycznym KSK2003, Białowieża, czerwiec 2003.
5. Rozprawa doktorska mgr Lucyny Hemka: „Metody realizacji symulatorów światła dziennego na podstawie modelowania rozkładów widmowych wysokoprężnych lamp wyładowczych”. Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej, 2004.

Rękopis dostarczono dnia 10.04.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. Władysław Dybczyński

ANALYSIS OF THE SPECTRAL TRANSMITTANCE
OF GLASS OF DIFFERENT COMPOSITION
WITHIN 300 – 380 NM

Lucyna HEMKA, Maciej RAFAŁOWSKI

ABSTRACT *The aim of this research work is to develop a simulator of daylight D_{65} using a high pressure metal halide discharge lamp. Basing on the hitherto work it was found that it is possible to improve the emission characteristics of discharge lamps used to obtain a standard of the D_{65} daylight (category AB). As it was shown by hitherto analyses and measurements, conducted on the obtained simulator model, the conventionally used balloons made of hard barium – silicone glass significantly limit emission of the ultraviolet component, which causes the category of the simulator to be low in the range of UV (category C).*

Initial analyses of a possibility were conducted, to use glass with other transmission characteristics for emitter balloons, namely the optical glass, generally used for production of optical apparatus and offered in catalogues of specialized suppliers.

Preliminary assessment of properties, indicates that improvement in simulator emission characteristics in the UV range, in the desired direction can be expected. However it affects the radiation conditions in the visible range what can require further optimization of the simulator's emission spectrum, using other analytical tools.



Dr Lucyna Hemka ukończyła Wydział Matematyczno – Fizyczno – Chemiczny na Uniwersytecie Łódzkim, kierunek fizyka doświadczalna, specjalność fizyka promieniowania kosmicznego. Od 1982 pracowała w Centralnym Ośrodku Badawczo – Rozwojowym „POLAM”, a po jego likwidacji w 2001 r. podjęła pracę w Instytucie Elektrotechniki. Jest autorką i współautorką około trzydziestu publikacji i referatów na Konferencje i Sympozja Naukowe. 25 listopada 2004 r. obroniła doktorat na Politechnice Białostockiej w Katedrze Promieniowania Optycznego Wydziału Elektrycznego. Główne zainteresowania zawodowe to: badanie widm emisyjnych źródeł promieniowania, pomiary spektrometryczne i fotometryczne, prace nad zastosowaniem promieniowania optycznego i badanie jego destruktywnego wpływu na człowieka i materię, odnawialne źródła energii, zagadnienia związane z technologią wysokoprężnych lamp wyładowczych.

Prof. dr hab. inż. Maciej Rafałowski – pracę naukową i dydaktyczną rozpoczął 1.10.1971 r. w Instytucie Konstrukcji Przyrządów Precyzyjnych i Optycznych Politechniki Warszawskiej, gdzie pracował do 2000 roku. Prowadził prace analityczne w zakresie teorii odwzorowania i aberracji układów optycznych z zaburzeniami symetrii osiowej oraz oryginalnych optycznych metod kontrolno-pomiarowych. Od 1.09.1993 r. podjął pracę w Katedrze Promieniowania Optycznego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej jako profesor nadzwyczajny. Jego aktywność naukowa i dydaktyczna przeorientowała się w kierunku zagadnień z dziedziny elektrotechniki, związanych z problematyką techniki świetlnej, a w szczególności z różnymi aspektami pomiarów charakterystyk promieniowania optycznego w zakresie widzialnym. Znalazło to odzwierciedlenie w monografii, wydanej przez Wydawnictwa Politechniki Białostockiej w 2004 roku.



Został wyróżniony 7 nagrodami JM Rektora PW oraz 4 nagrodami JM Rektora PB za osiągnięcia naukowe i dydaktyczne oraz 2 Nagrodami Ministra Szkolnictwa Wyższego i Techniki za prace naukowo-badawcze i dydaktyczne.

Jest autorem 2 monografii oraz współautorem 3 skryptów dydaktycznych. Opublikował 37 artykułów w czasopismach (w tym 19 w czasopismach indeksowanych) oraz 24 referaty (w tym 12 na konferencjach i seminariach międzynarodowych). Brał udział w szeregu prac dla przemysłu (w sumie 31 poz.). Uzyskał 5 patentów (jako współtwórca). W latach 1983–1992 był przewodniczącym Branżowej Komisji Normalizacyjnej przy Centralnym Laboratorium Optyki w Warszawie. W czasie trwania XVII–XXVII konkursów projektów badawczych był członkiem Sekcji Technologii i Automatyzacji Maszyn i Produkcji (T07D) Komitetu Badań Naukowych (razem 10 razy w latach 1999–2004). W ramach popularyzacji wiedzy w latach 2000–2001 opracował i prowadził wykłady pt. *Technika oświetleniowa* dla słuchaczy Studium Fotografii przy Oddziale Warszawskim Związku Polskich Artystów Fotografików.

W dniu 8.06.2006 otrzymał tytuł naukowy profesora w dziedzinie nauk technicznych.