

Odzworowanie promieniowania słonecznego dla badań ogniw fotowoltaicznych

1. WPROWADZENIE

Wykorzystanie efektu fotowoltaicznego jako źródła energii elektrycznej opiera się na zjawisku generacji napięcia na półprzewodnikowych strukturach złączowych (ogniwach fotowoltaicznych) pod wpływem absorpcji promieniowania słonecznego.

O powszechności i dostępności tego typu źródeł energii elektrycznej decydują następujące czynniki: koszty wytwarzania energii (w porównaniu z kosztami ponoszonymi przy zastosowaniu konkurencyjnych źródeł energii), łatwość obsługi i niezawodność ogniw, określona bezawaryjnym czasem pracy.

Koszty zastosowania tego źródła energii elektrycznej obejmują wytworzenie: pojedynczego ogniwa, paneli ogniw fotowoltaicznych oraz elektronicznych urządzeń towarzyszących.

Obecnie ogniwa fotowoltaiczne stosowane są jako stacjonarne źródła energii elektrycznej w stacjach tele- i radiotransmisyjnych, morskich bojach sygnałowych, stanowiskach rafinacyjnych, stanowiskach pompowania wody, oświetleniu lotnisk, radiotelefonach pomocy drogowej, urządzeniach klimatyzacyjnych, jachtach oraz wszędzie tam, gdzie utrudnione i nieoptyczne jest doprowadzenie sieci napowietrznej bądź kabli zasilających. Ogniwa fotowoltaiczne są również stosowane w urządzeniach przenośnych: kalkulatorach, zegarkach, miniaturowych odbiornikach radiowych, radiotelefonach, wentylatorach biurowych.

Minimalizacja kosztów wytwarzania energii elektrycznej wymaga prowadzenia prac nad technologią i konstrukcją tych ogniw oraz oceny jakości materiałów półprzewodnikowych pod kątem ich zastosowania do budowy ogniw fotowoltaicznych. Prowadzi to do osiągnięcia opłacalnej granicy kosztów wytwarzania energii elektrycznej.

2. NAPROMIENIENIE OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH W WARUNKACH NATURALNEJ EKSPLOATACJI

Eksploatacja ogniw fotowoltaicznych naziemnego zastosowania przebiega w warunkach naturalnych przy różnym poziomie napromienienia, zależnym od położenia geograficznego, pory dnia i roku. Dla ogniw, tworzących panele stacjonarnego zasilania będą to warunki, panujące w różnych punktach globu ziemskiego, dla ogniw zamontowanych w urządzeniach przenośnych będą to również warunki, panujące w zamkniętych pomieszczeniach przy znacznym udziale sztucznego światła.

Ogniwa fotowoltaiczne stosowane w stacjach satelitarnych pracują w przybliżeniu w stałych warunkach napromienienia, panujących w przestrzeni kosmicznej.

Napromienienie poza atmosferą ziemską jest określone pomiarami prowadzonymi w przestrzeni kosmicznej z których wynika, że 98% energii emitowanej przez Słońce zawarte jest w przedziale widmowym $250 + 2500 \text{ nm}$ [1]. Napromienienie na powierzchni Ziemi zależne jest od następujących czynników [1]:

- grubości warstwy atmosfery, przez którą przechodzi promieniowanie,
- składu atmosfery, stopnia zachmurzenia i zapylenia,
- odbicia promieni słonecznych od powierzchni Ziemi,
- kąta padania promieni słonecznych na powierzchnię Ziemi, a więc pory dnia, pory roku oraz położenia geograficznego.

Przejście promieniowania słonecznego przez atmosferę ziemską powoduje modyfikację rozkładu widmowego oraz obniżenie jego energii. Efekty te spowodowane są następującymi czynnikami [1]:

- rozproszeniem Rayleigha na cząsteczkach atmosfery mniejszych od 0,1 długości fali padającego promieniowania, malejącym ze wzrostem długości fali promieniowania,
- absorpcją, spowodowaną obecnością tlenu, azotu i ozonu,
- absorpcją, spowodowaną obecnością H_2O i CO_2 ,
- rozpraszaniem na zanieczyszczeniach i aerozolach, którego udział rośnie w zakresie krótszych fal widma promieniowania,
- rozczepieniem promieniowania, spowodowanym zależnością współczynnika załamania od ciśnienia i temperatury.

Wahania poziomu napromienienia oraz różnice poziomu napromienienia dla różnych punktów na powierzchni Ziemi powodują, że pomiary prowadzone w warunkach naturalnych nie pozwalają na dokładną i jednoznaczną ocenę parametrów ogniw fotowoltaicznych. Stworzenie powtarzalnych i znormalizowanych warunków pomiarów ogniw ma wieloraki sens: umożliwia ocenę różnych konstrukcji i technologii wytwarzania ogniw, umożliwia ocenę różnych materiałów półprzewodnikowych, stosowanych w konstrukcji ogniw oraz umożliwia prowadzenie

pomiarów porównawczych ogniw wytwarzanych przez różnych producentów.

Powtarzalne warunki pomiarowe można uzyskać w przestrzeni kosmicznej, co jest praktycznie dostępne tylko dla niewielu producentów, a uzyskane warunki nie są w pełni użyteczne dla ogniw przeznaczonych do pracy naziemnej. Alternatywną metodą jest użycie wzorca napromienienia słonecznego w postaci odpowiedniego urządzenia, zwanego symulatorem słonecznym. Symulatory słoneczne znajdują zastosowanie w technice kosmicznej, medycynie, chemii i biologii. Są one stosowane w testowaniu statków kosmicznych, określaniu wpływu promieniowania (szczególnie w zakresie nadfioletu) na rozkład barwników, farb, pigmentów oraz innych substancji, a także są przydatne w badaniach, dotyczących zanieczyszczeń atmosfery. Symulatory słoneczne umożliwiają również prowadzenie w warunkach laboratoryjnych badań nad roślinami i zwierzętami, określenie oddziaływania promieniowania słonecznego na skórę ludzką oraz badanie substancji ochronnych i preparatów kosmetycznych [1], [2].

3. DEFINICJE PODSTAWOWYCH POJĘĆ I KLASYFIKACJA SYMULATORÓW SŁONECZNYCH [2]

Natężenie napromienienia E w danym punkcie powierzchni jest to stosunek strumienia energetycznego, padającego na elementarną powierzchnię, otaczającą dany punkt, do pola tego elementu.

Widmowe natężenie napromienienia E_{λ} jest to natężenie napromienienia, przypadające na nieskończone mały przedział widma, obejmujący daną długość fali λ .

Całkowite natężenie napromienienia $E_{\lambda_1 - \lambda_2}$ otrzymuje się przez całkowanie widmowego natężenia napromienienia w pewnym przedziale długości fal od λ_1 do λ_2 .

Średnie całkowite natężenie napromienienia \bar{E} w danej objętości wyraża się wzorem

$$\bar{E} = \frac{\int_V E / r, o, z / d V}{\int d V}$$

przy czym: $E / r, o, z /$ jest natężeniem napromienienia w danym punkcie objętości

V , zaś całka $\int d V$ określa rozpatrywaną objętość V .

Analogicznie średnie całkowite natężenie napromienienia \bar{E}_p na danej powierzchni, określa się wzorem:

$$\bar{E}_p = \frac{\int_S E / r, o / d S}{\int d S}$$

przy czym: $E / r, o /$ jest natężeniem napromienienia w danym punkcie powierzchni

S , a całka $\int d S$ określa powierzchnię S .

Równomierność całkowitego natężenia napromienienia E_r w danej objętości jest miarą odchyłek wartości natężenia napromienienia w poszczególnych punktach

tej objętości od wartości średniej E . Równomierność ta wyrażona jest w procentach średniego natężenia napromienienia E . Równomierność E_r definiuje się wzorem:

$$E_r = \pm 100 \frac{\Delta E_{\min} + \Delta E_{\max}}{2\bar{E}} [\%]$$

przy czym: E_{\min} - jest różnicą między średnim natężeniem napromienienia E i najmniejszą wartością E , uzyskaną w danej objętości,

E_{\max} - jest różnicą między największą wartością natężenia napromienienia w danej objętości i wartością średnią \bar{E} .

Niekiedy rozpatrywane są zjawiska występujące na danej płaszczyźnie, stąd pojęcie równomierności całkowitego natężenia napromienienia E_{rp} zdefiniowane jest jako:

$$E_{rp} = \pm 100 \frac{\Delta E_{pmin} + \Delta E_{pmax}}{2\bar{E}_p} [\%]$$

przy czym: ΔE_{pmin} - jest to różnica między wartością E_p i najmniejszą wartością natężenia napromienienia, uzyskaną na danej powierzchni,

ΔE_{pmax} - jest to różnica między największą wartością natężenia napromienienia na danej powierzchni i wartością średnią \bar{E}_p .

Dla idealnego systemu symulacji promieniowania wielkość E_r/E_{rp} przybiera wartość równą zero.

Stabilność czasowa całkowitego natężenia napromienienia E_t w danej objętości może być zdefiniowana analogicznie jak wielkość E_r . Stabilność E_t określa zmianę w czasie natężeń napromienienia E w stosunku do wartości średniej E_t . Stabilność czasową E_t definiuje się równaniem:

$$E_t = \pm 100 \frac{\Delta E_{tmin} + \Delta E_{tmax}}{2\bar{E}_t} [\%]$$

przy czym: ΔE_{tmin} - jest różnicą między średnim natężeniem napromienienia E_t w danej objętości (na danej powierzchni) i minimalną wartością średniego natężenia napromienienia \bar{E}_{\min} w tej objętości (na powierzchni), zmierzonymi w czasie jednej godziny.

ΔE_{tmax} - jest różnicą między największą wartością średniego natężenia napromienienia \bar{E}_{\max} w badanej objętości (na powierzchni) i średnim natężeniem napromienienia \bar{E}_t w tej objętości (na tej powierzchni), zmierzonymi w czasie jednej godziny.

\bar{E}_t - jest średnią wartością natężenia napromienienia w danej objętości (na danej powierzchni), uzyskaną w czasie jednej godziny.

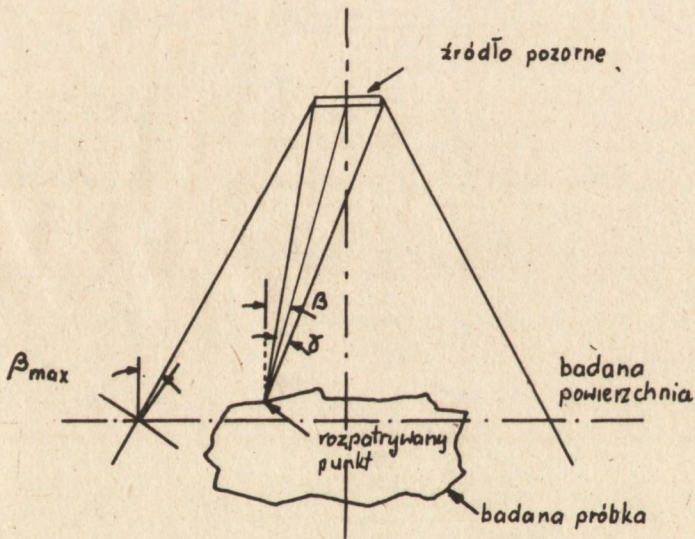
Napromienienie odbite Φ_0 jest to strumień energetyczny, padający na badaną

próbkę, który pochodzi od promieni odbitych od różnych powierzchni, powracających do układu optycznego i powtórnie padających na próbkę lub od promieni odbitych od powierzchni otaczających próbkę.

Ilość i kierunek napromienienia odbitego określa się dopiero po odpowiednim ustawieniu badanej próbki w stosunku do symulatora.

Zródło pozorne jest to minimalne pole powierzchni wyjściowej elementów układu optycznego, z którego emitowane jest nie mniej niż 95% energii, trafiającej do danego punktu badanej próbki.

Kąt dywergencji β (rys. 1) wiązki promieniowania, pochodzącego z symulatora jest to kąt między prostą równoległą do osi optycznej tej wiązki, a prostą łączącą środek źródła pozornego i dany punkt badanej objętości.



Rys. 1. Kąt dywergencji β i kąt naprzeciwległy τ

Kąt naprzeciwległy τ jest to kąt obejmujący maksymalny wymiar źródła pozornego, o wierzchołku w danym punkcie badanej próbki.

Kąt dekolimacji δ w symulacji słonecznej jest miarą nierównoległości wiązki promieni, pochodzących z symulatora. Symulatory o skolimowanej wiązce promieniowania posiadają element optyczny, umożliwiający symulowanie nieskończonej odległości źródła pozornego od próbki. Od kąta naprzeciwległego zależy nominalny kąt dekolimacji.

W symulacji promieniowania słonecznego do określenia stopnia nierównoległości wiązki zaleca się stosowanie pojęcia "kąta naprzeciwległego" zamiast "kąta dekolimacji" [2].

Stała słoneczna jest to całkowite natężenie napromienienia słonecznego, występującego normalnie na powierzchni, znajdującej się w przestrzeni swobodnej w odległości jednej jednostki astronomicznej od Słońca.

Jednostka astronomiczna jest jednostką długości, zdefiniowaną jako średnia odległość między Ziemią a Słońcem, to jest 149597890 ± 500 km.

Wartość stałej słonecznej wg uśrednionych wyników pomiarów, uzyskanych w kilkunastu kolejnych latach wynosi 1353 ± 21 W/m². Symbol AM_n oznacza stosunek długości drogi l_m przebiegu promieniowania w atmosferze, skierowanego pod danym kątem Z stopni do długości drogi l_z przebiegu, skierowanego pod kątem 0° .

$$AM_n = l_m/l_z \approx \sec Z \approx \frac{1}{\cos Z}, \text{ dla } Z \leq 62^\circ$$

Atmosfera powoduje w zakresie całego widma straty energii promieniowania, z uwagi na występujące w niej zjawiska pochłaniania i rozproszenia. Szczególnie silne pochłanianie ma miejsce w obszarze nadfioletu (przyczyną tego jest obecność ozonu). Duża wartość współczynnika absorpcji jest także zauważalna w podczerwieni, ze względu na oddziaływanie cząsteczek pary wodnej i dwutlenku węgla.

Ze wzrostem szerokości geograficznej zwiększa się droga optyczna promieni słonecznych i rośnie również absorpcja, szczególnie w nadfiolecie.

Część promieniowania rozproszonego w atmosferze trafia na powierzchnię Ziemi, jako promieniowanie niebosktonu i chmur (w symulatorach światła słonecznego pomija się promieniowanie tego rodzaju). Przykładowe rozkłady widmowe natężenia napromienienia słonecznego dla różnych AM_n pokazano na rys. 2.

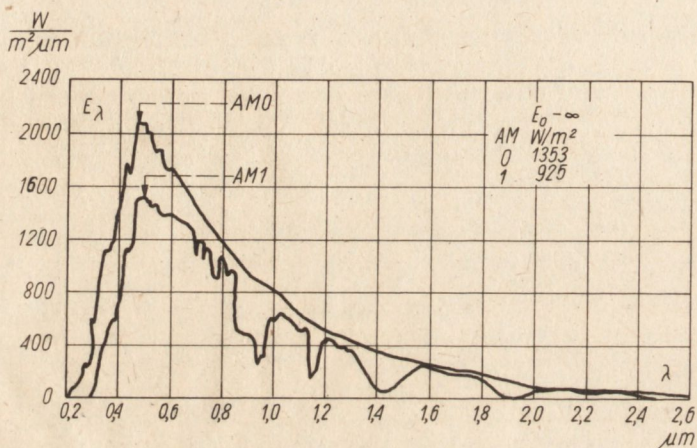
AMO odpowiada warunkom, jakie panują w odległości 1 jednostki astronomicznej od Słońca, gdy nie występuje tłumienie promieniowania słonecznego przez atmosferę.

AM1 uwzględnia pochłanianie promieniowania słonecznego przez atmosferę, które zmienia natężenie napromienienia słonecznego, mierzone w odległości 1 jednostki astronomicznej od Słońca poza wyczuwalną atmosferą na takie, które jest odbierane na poziomie morza, gdy Słońce jest w zenicie.

Widmo promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi znacznie zmienia się w zależności od kąta wzniesienia Słońca oraz składników atmosfery, stąd rozkłady dla poszczególnych AM_n są tylko uśrednionym przybliżeniem.

W tablicach 1 i 2 przytoczone zostały, określone w normach amerykańskich [2], kryteria klasyfikacji symulatorów słonecznych, ze względu na warunki uzyskane w przestrzeni objętej symulacją promieniowania słonecznego.

Widmo symulatora słonecznego zostało określone na podstawie pomiarów widmowego natężenia napromienienia słonecznego. Zwykle dla potrzeb symulacji słonecznej wystarczający jest obszar widma od 250 nm do 2500 nm.



Rys. 2. Widmowe natężenie napromienienia słonecznego typu AM0 i AM1.

Tablica 1

Wybrane wymagania, dotyczące symulatorów słonecznych

Klasa symulatora	A	B	C	
Równomierność natężenia napromienienia, E_r	3%	5%	> 5%	
Stabilność czasowa natężenia napromienienia, E_t	1%	3%	> 3%	
Kąt dywergencji wiązki promieniowania β^x	< 2°	< 4°	> 4°	
Napromienienie odbite względem padającego, ϕ_o	< 2%	< 5%	> 5%	
x Dla wiązek promieniowania o wysokim stopniu kolimacji wprowadza się dodatkowe oznaczenia klasy:				
Klasa symulatora	5A	4A	3A	2A
Kąt dywergencji wiązki promieniowania, β	0,125°	0,25°	0,5°	1°

Tablica 2

Tolerancje widmowego natężenia napromienienia dla symulatorów słonecznych klasy A i B

Przedział długości fali	Szerokość pasm w przedziałach	Liczba pasm w przedziałach	E (AMO) przypadające na przedział	E (AM1) przypadające na przedział	Dopuszczalne wartości wsp. R dla danej szerokości pasma ^x
nm	nm	-	$\frac{W}{m^2}$	$\frac{W}{m^2}$	-
KLASA A					
250-400	10	15	115	38	0,60 - 1,40
400-700	10	30	516	393	0,80 - 1,20
700-1000	50	6	306	230	0,60 - 1,40
1000-2500	100	15	363	248	0,60 - 1,40
Razem		66	1300	909	
KLASA B					
250-400	50	3	115	38	0,35 - 1,65
400-700	100	3	516	393	0,50 - 1,50
700-1000	150	2	306	230	0,35 - 1,65
1000-2500	500	3	363	248	0,20 - 1,80
Razem		11	1300	909	

^x Współczynnik R zdefiniowany jest niżej

Widmo symulatora nie jest dokładnie dopasowane do widma promieniowania słonecznego; zmienia się ono także w procesie starzenia zastosowanego źródła promieniowania. W tabelicy 2 zostały określone wymagania dotyczące widma symulatorów, tzn. jego zgodności z założonym rozkładem AMO lub AM1. Natężenie napromienienia E_{λ} , przypadające na daną szerokość pasma, uzyskane z symulatora, jest porównywane z odpowiednią wartością dla AMO dla tej samej szerokości pasma przy pomocy wzoru

$$R = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda}(\text{AMO})}$$

Tolerancje dotyczące widma dla symulatorów klasy A i B zawarte w tabelicy 2 są ujęte przez współczynnik R.

Dla powyższych obliczeń widmo zostało podzielone na 4 szerokie przedziały,

takie, w których współczynnik pochłaniania materiałów badanych próbek jest stały lub wykazuje liniową zależność w funkcji długości fali. W przypadku, gdy przebieg współczynnika pochłaniania w funkcji długości fali ma charakter nieliniowy, konieczne jest dokładniejsze porównanie i każdy z powyższych przedziałów powinien być podzielony na dodatkową liczbę pasm o szerokości podanej w tabelicy 2. Dla każdego z tych pasm współczynnik R jest obliczany i porównywany z określonymi w tabelicy 2 wartościami dopuszczalnymi. Gdy obliczone współczynniki R mieszczą się w podanych przedziałach tolerancji dla klasy A w przypadku 2/3 liczby pasm w całym obszarze widma 250 + 2500 nm, pozwala to na zaliczenie widma symulatora do klasy A. Podobnie postępuje się w przypadku klasy B, przy czym współczynnik R dla 8 spośród 11 pasm danego obszaru widma musi wówczas znaleźć się w obrębie podanego w tabelicy 2 przedziału tolerancji.

Analogiczny tryb postępowania przyjęto przy klasyfikacji symulatorów z filtrem dopasowującym do AM1.

Jeżeli widmo symulatora nie spełnia ustalonych wymagań ani dla klasy A, ani dla klasy B, zaliczane jest do klasy C.

4. OPIS SPOTYKANYCH ROZWIĄZAŃ SYMULATORÓW

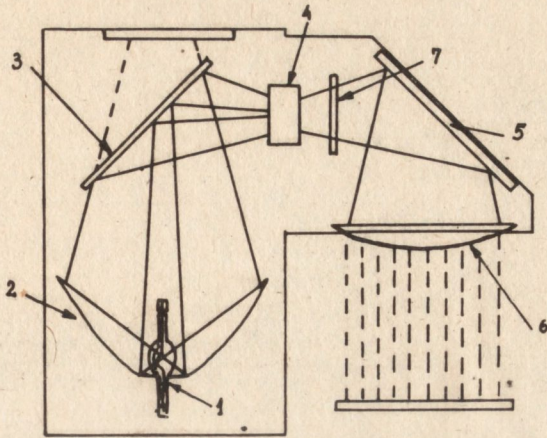
W literaturze, dotyczącej badań ogniw fotowoltaicznych spotykane są na ogół uproszczone rozwiązania symulatorów, odzwierciedlających promieniowanie typu AM1, w których stosuje się żarówkę halogenową [3]. Otrzymany w ten sposób rozkład widmowy różni się znacznie od rzeczywistego widma słonecznego typu AM1.

Bardziej skomplikowaną wersję symulatora podano w pracy [1], gdzie źródłem promieniowania jest żarówka halogenowa zaopatrzona w filtr wodny i filtr Corning Glass typu I-62. Dokładność odwzorowania rozkładu widma słonecznego wynosi $\pm 40\%$ dla przedziału widmowego od 500 do 1000 nm. Stosowanie w/w rozwiązań do pomiarów ogniw fotowoltaicznych wymaga skomplikowanych przeliczeń, uwzględniających odstępstwa otrzymanego rozkładu od znormalizowanego rozkładu widma słonecznego.

Poniżej zostały przytoczone dane dotyczące wybranych symulatorów produkowanych przez amerykańskie firmy ORIEL [4] i ORC [5] oraz firmę japońską Ushio Electric Inc. [6].

Rozwiązanie układu optycznego w wymienionych symulatorach jest oparte na przedstawionej na rys. 3 zasadzie.

Lampa ksenonowa (1) o krótkim łuku jest umieszczona w odbłyśniku asferycznym (2). Promieniowanie źródła zbierane jest przez odbłyśnik i po odbiciu od zwierciadła płaskiego (3), ogniskowane w optycznym integratorze (4), który zapewnia jednorodność wiązki. Po przejściu przez integrator wiązka promieni



Rys. 3. Schemat układu optycznego typowego symulatora słonecznego:
 1 - lampa ksenonowa, 2 - odbłyśnik, 3 - zwierciadło płaskie, 4 - integrator,
 5 - zwierciadło płaskie, 6 - soczewka skupiająca, 7 - filtr.

jest odchylana o 90° za pomocą drugiego zwierciadła płaskiego. (5) i kierowana na soczewkę skupiającą (6), dającą w efekcie wiązkę równoległą. W symulatorze firmy ORIEL integrator składa się z dwóch odpowiednio usytuowanych względem siebie elementów, z których każdy ma postać "siatki" złożonej z elementarnych soczewek płaskowypukłych. Przypuszcza się, że z uwagi na wymagany rozkład widmowy symulowanego promieniowanie, elementy te są wykonane ze szkła krzemionkowego.

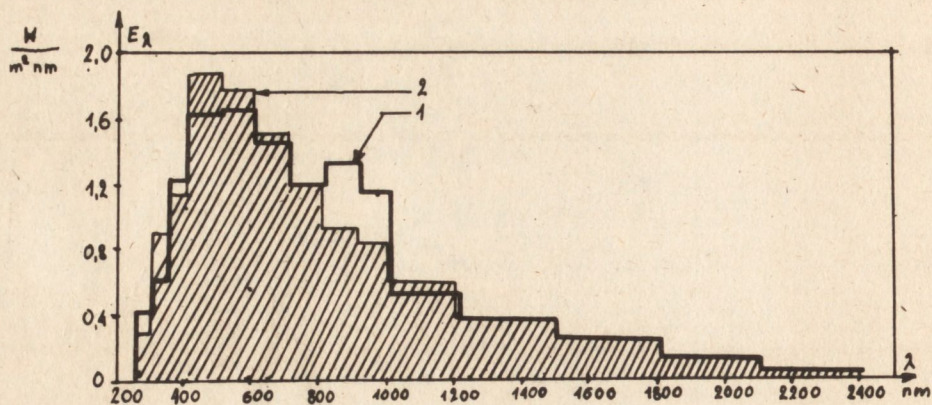
W symulatorze tym zastosowano również zwierciadło zimne w miejsce zwierciadła płaskiego, znajdującego się na drodze promieni między odbłyśnikiem i integratorem.

Symulator firmy Ushio Electric Inc. posiada integrator w postaci pęku światłowodów o odpowiednio dobranych długościach i przekrojach.

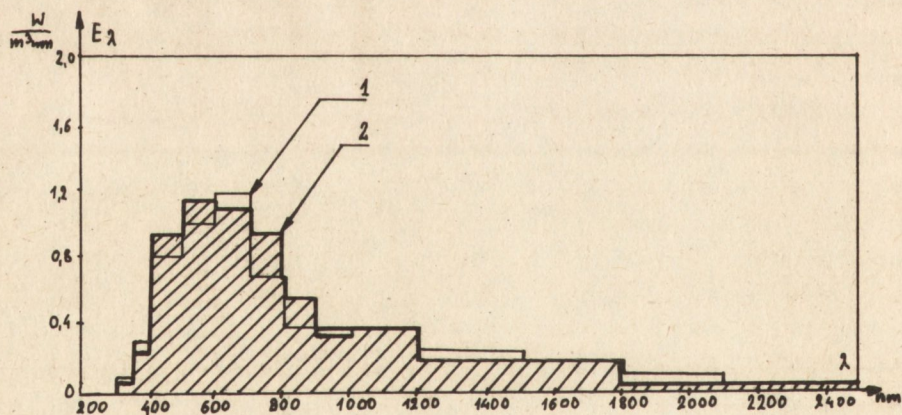
Na rysunku 4 pokazano pasmowy rozkład natężenia napromienienia AMO dla symulatora słonecznego produkcji firmy ORIEL (linia 1), w porównaniu z rozkładem promieniowania słonecznego (linia 2, ograniczająca obszar zakreskowany).

Odpowiednio na rysunku 5 przedstawiono rozkłady AM2 dla symulatora ORIEL (linia 1) i naturalnego promieniowania słonecznego (linia 2, ograniczająca obszar zakreskowany).

Rysunek 6 ukazuje pasmowy rozkład natężenia napromienienia wg danych firmy Ushio Electric Inc. Linia 1 przedstawia rozkład E_λ , uzyskany dla symulatora produkcji tej firmy oraz rozkładu naturalnego promieniowania słonecznego (linia 2, ograniczająca obszar zakreskowany).

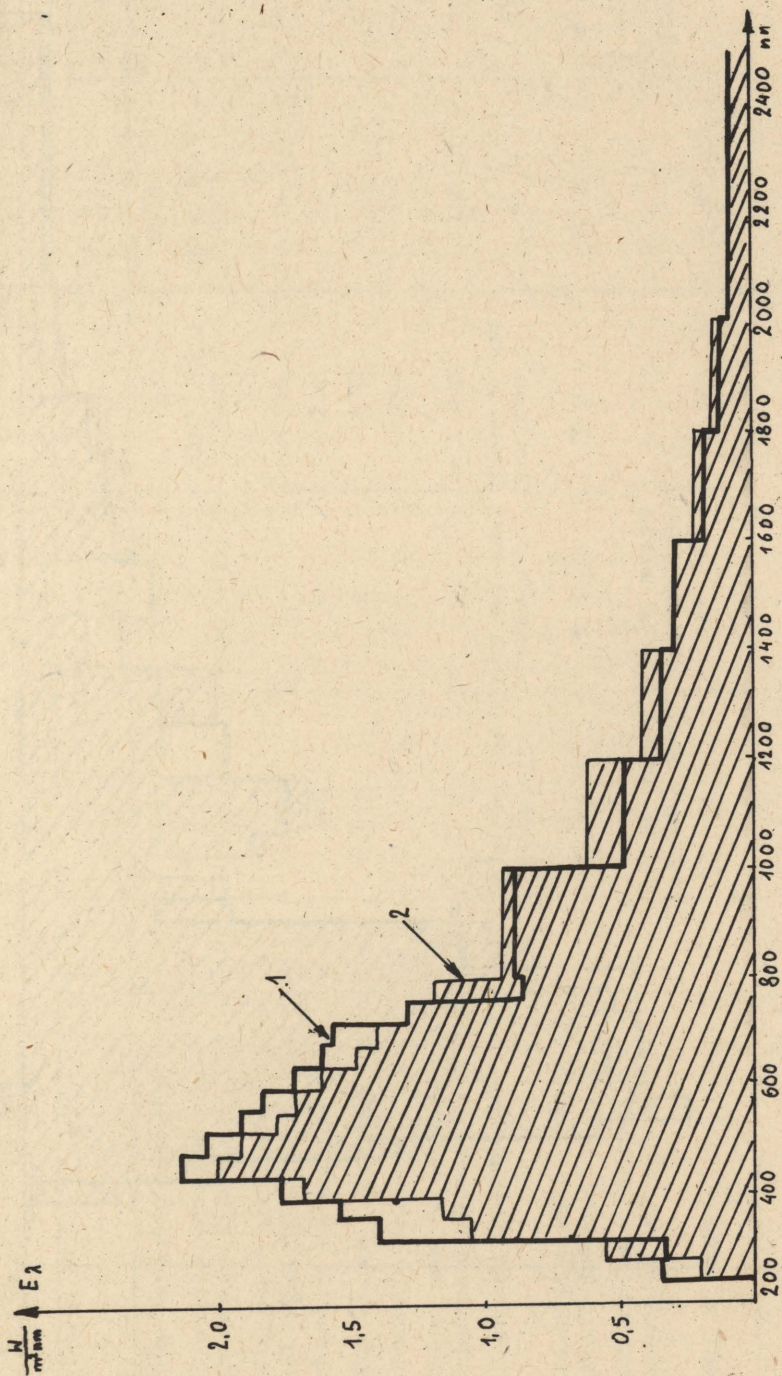


Rys. 4. Pasmowy rozkład natężenia napromienienia typu AMO dla: 1 - symulatora firmy ORIEL, 2 - naturalnego promieniowania słonecznego.

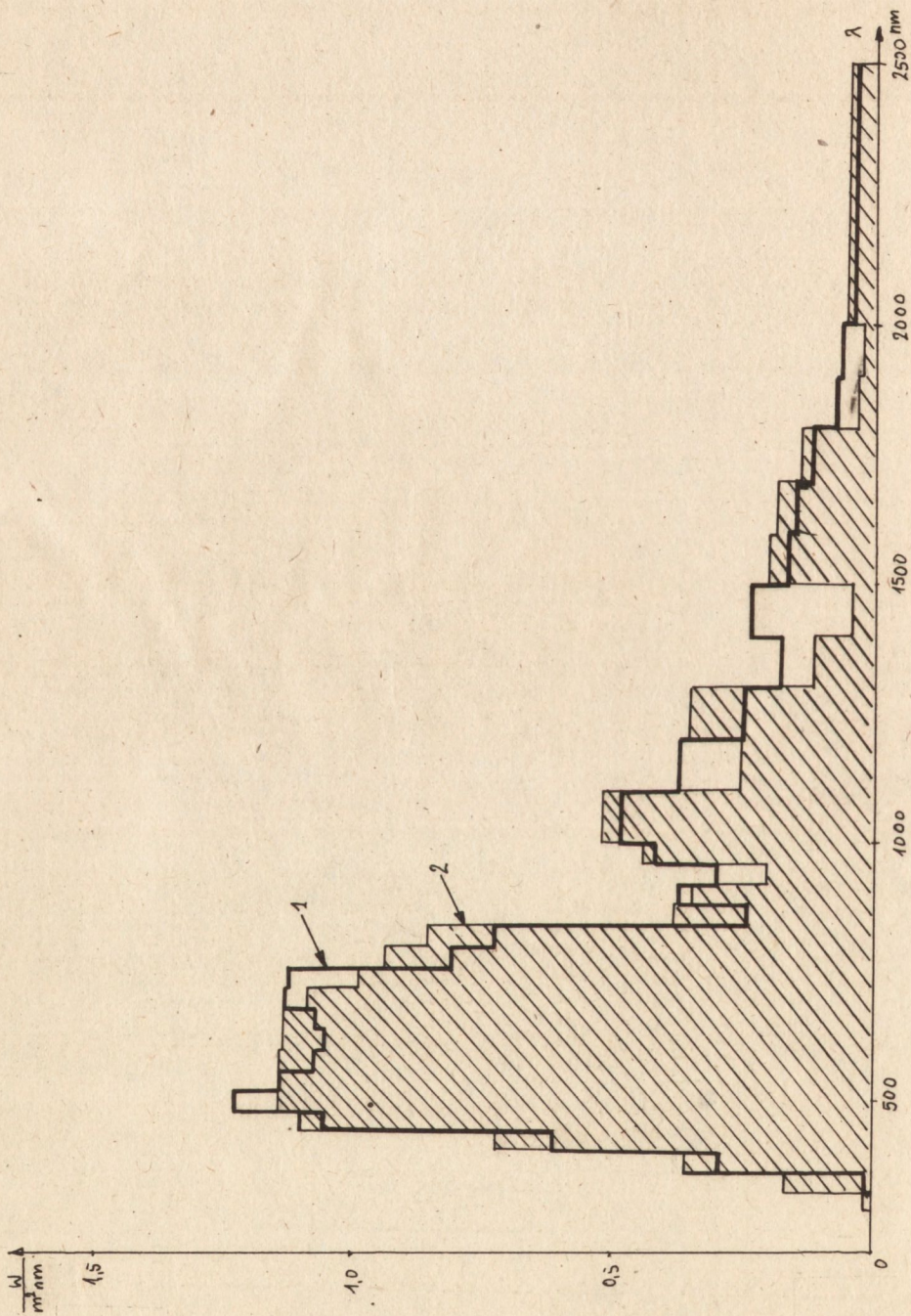


Rys. 5. Pasmowy rozkład natężenia napromienienia typu AM2 dla: 1 - symulatora firmy ORIEL, 2 - naturalnego promieniowania słonecznego.

Na rysunku 7 podano rozkład natężenia napromienienia dla AM2 w przypadku symulatora firmy Ushio (linia 1) i promieniowania słonecznego (linia 2, ograniczająca obszar zakreskowy).



Rys. 6. Pasmowy rozkład natężenia napromienienia typu AMO dla: 1 - symulatora firmy Ushio Electric, 2 - naturalnego promieniowania słonecznego.



Rys. 7. Pasmowy rozkład natężenia napromienienia typu AM2 dla: 1 - symulatora firmy Ushio Electric, 2 - naturalnego promieniowania słonecznego.

Wybrane dane techniczne symulatorów promieniowania słonecznego

	ORIEL		SS-1000		ORC		Ushio Electric Inc.
	300 W	1000 W	SS-1000	SS-4500	SS-4500	SS-4500	
Moc lampy ksenonowej	W	1000 W	SS-1000	SS-4500	SS-4500	SS-4500	Ushio Electric Inc.
Symulowany rozkład promieniowania	-	AMO, AM2	AMO, AM1, AM2	AMO, AM1, AM2	AMO, AM1, AM2	AMO, AM1, AM2	1000 AMO, AM2
Odległość źródła światła od integratora	mm	~ 361	-	~ 446	-	-	~ 333
Średnica zwierciadła	mm	~ 192	-	~ 176	-	-	~ 190
Ogniskowa soczewki	mm	~ 244	-	~ 328	-	-	~ 210
Średnica soczewki	mm	~ 150	-	~ 164	-	-	~ 190
Efektywna średnica powierzchni oświetlanej	mm	51	51	152	152	152	100
Kierunek oświetlenia	-	pionowy lub poziomy	pionowy lub poziomy	pionowy lub poziomy	-	-	pionowy
Równomierność natężenia napromienienia	%	± 5	± 5	± 5	± 5	± 5	> ± 5
Stabilność czasowa natężenia napromienienia	%	± 1 (w 30 min. po zapłonie lampy)	± 1 (w 30 min. po zapłonie lampy)	-	-	-	> ± 2/godz. (w 20 min. po zapłonie lampy)
Kąt kółimacji	-	± 4°	± 6°	± 2°	± 4°	± 4°	-

W tablicy 3 zestawiono dane charakterystyczne dla wybranych symulatorów promieniowania słonecznego.

5. WŁAŚCIWOŚCI ŹRÓDEŁ PROMIENIOWANIA I ELEMENTÓW OPTYCZNYCH

Poniżej przedstawiono wybrane właściwości elementów, które mogą posłużyć do budowy symulatorów słonecznych.

5.1. Źródła promieniowania

Naturalne promieniowanie słoneczne posiada rozkład widmowy zbliżony do ciała doskonale czarnego o temperaturze 6000 K. Krzywa rozkładu widmowego w zakresie nadfioletu jest stroma: wraz ze wzrostem długości fali bardzo szybko rosną wartości natężenia napromienienia E_{λ} . W zakresie widzialnym występuje maksimum funkcji i liczne maksima lokalne. Dla podczerwieni przebieg krzywej jest bardziej łagodny, zaś wartości E_{λ} są stosunkowo niewielkie.

Dla potrzeb symulacji promieniowania słonecznego wystarczająca jest znajomość średniej wartości E_{λ} w wybranych przedziałach widmowych.

Sztuczne źródło światła użyte w systemie symulacji promieniowania słonecznego musi posiadać widmo ciągłe dla zakresu od 250 do 2500 nm. Jego ciało świecące powinno mieć stosunkowo małe wymiary, co umożliwi zaprojektowanie układu optycznego wytwarzającego skolimowaną wiązkę.

W związku z tym mogą być wzięte pod uwagę następujące źródła światła:

- żarówki halogenowe o żarniku skupionym,
- wyładowcze lampy halogenkowe o krótkim łuku,
- lampy ksenonowe o krótkim łuku.

5.1.1. Żarówki halogenowe

W żarówce halogenowej światło wytwarzane jest przez ciało rozgrzane do stanu żarzenia (żarnik) wskutek przepływu przez nie prądu. Żarnik w postaci skrętki wolframowej jest umieszczony najczęściej w bańce ze szkła krzemionkowego, napełnionej gazem obojętnym z domieszką halogenu. W żarówkach tych ma miejsce cykl regeneracyjny, w którym dzięki właściwościom chlorowców, w czasie świecenia zachodzi ciągły proces regeneracji żarnika.

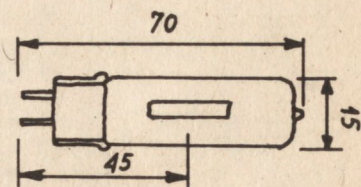
Przykładowe kształty skrętki żarnika skupionego żarówek halogenowych pokazano na rysunku 8, zaś na rysunku 9 przedstawiono żarówkę halogenową projekcyjną o mocy 1000 W.

Obecnie wytwarza się żarówki halogenowe o mocach zawartych w przedziale od 150 do 10 000 W.

Rozsył światłości dla żarówki halogenowej o żarniku skupionym jest zbliżony do rozsyłu światłości żarówek tradycyjnych.



Rys. 8. Przykładowe kształty skrętki żarnika żarówki halogenowej



Rys. 9. Żarówka halogenowa typu HFAA 1000 W.

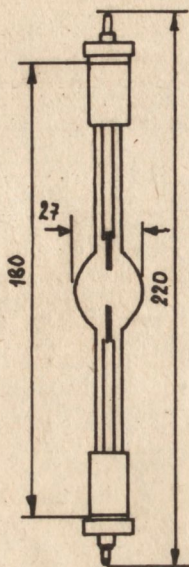
Krzywa rozkładu widmowego promieniowania żarówki halogenowej jest zbliżona do krzywej rozkładu widmowego promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze ok. 3000 K.

5.1.2. Wyładowcze lampy halogenkowe

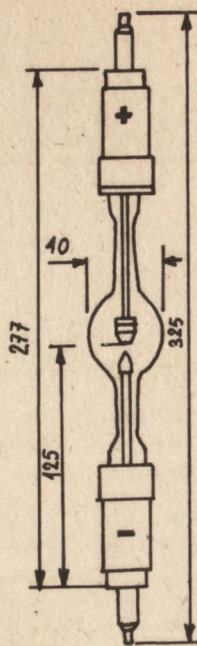
W lampach halogenkowych światło wytwarzane jest w wyniku wyładowania elektrycznego w mieszaninie pary metalu i produktów rozkładu halogenków. W lampach tych elektrody wolframowe są umieszczone w bańce ze szkła krzemionkowego, wypełnionej parami rtęci i metali ziem rzadkich (dysproz, holm, tal i inne). Domieszka bromu, podobnie jak w żarówkach halogenowych, przeciwdziała parowaniu elektrod i osadzaniu się wolframu na ściankach bańki. Lampę halogenkową wysokociśnieniową o krótkim łuku typu HMI firmy OSRAM pokazano na rysunku 10.

Obecnie produkowane są lampy halogenkowe o mocach 200 W, 575 W, 1200 W, 2500 W i 4000 W.

Lampy halogenkowe posiadają widmo prawie ciągłe, obejmujące przedział od 260 nm do dalekiej podczerwieni. Charakteryzuje je barwa światła zbliżona do światła dziennego (podobnie jak iluminant D_{55}). Na skład widmowy promieniowania tych lamp i rozmieszczenie maksimum krzywej widmowego natężenia napromienienia ma wpływ ilość i rodzaj dodatków.



Rys. 10. Lampa halogenkowa typu HMI 1200 W.



Rys. 11. Lampa ksenonowa typu XBO 900 W.

5.1.3. Lamy ksenonowe

Lamy ksenonowe są to źródła, w których światło wytwarzane jest przez wyładowanie elektryczne w gazie.

Lampa ksenonowa (rys. 11) ma elektrody wolframowe umieszczone w bańce ze szkła krzemionkowego, wypełnionej ksenonem pod ciśnieniem od kilku do kilkudziesięciu atmosfer. Większość lamp ksenonowych o krótkim łuku jest zasilana prądem stałym. Elektroda ujemna (mniejsza) ma w nich postać stożka ściętego, zakończonego powierzchnią sferyczną, zaś elektroda dodatnia (większa) - stożka ściętego. Długość łuku występującego między tymi elektrodami wynosi 0,5 - 9 mm, zależnie od typu lampy. Obecnie produkowane są lamy o mocy od 75 do 6500 W.

Skład widmowy promieniowania lamp ksenonowych jest zbliżony do ciała czarnego o temperaturze ok. 6000 K. Krzywa rozkładu widmowego lamp ksenonowych posiada dodatkowo maksima pochodzące od linii spektralnych ksenonu. Maksymalne ilości energii są wypromieniowywane w przedziałach 450 - 500 nm oraz 800 - 1000 nm.

Charakter krzywej rozkładu widmowego nie zależy od mocy lampy ksenonowej. Zwiększenie mocy nie powoduje zmiany składu widmowego promieniowania,

lecz tylko proporcjonalny wzrost energii wypromieniowywanej dla danej długości fali.

Lampy ksenonowe są produkowane w wersji zwykłej i bezozonowej. Lampy ksenonowe bezozonowe (oznaczenie OFR), wytwarzają podczas pracy znacznie mniej szkodliwego dla zdrowia ozonu, jednak w obszerze nadfioletu wypromieniowują one mniej energii niż zwykłe lampy ksenonowe. Najwięcej promieniowania w zakresie nadfioletu zapewniają lampy ksenonowe o bańkach ze szkła zwanego Suprasil, które charakteryzuje się większą przepuszczalnością dla krótszych fal, niż inne rodzaje szkła krzemionkowego.

5.2. Materiały i elementy optyczne

Poza źródłem światła, zasadniczy wpływ na rozkład widmowy otrzymanego promieniowania mają elementy formujące wiązkę świetlną użyte w symulatorze takie, jak: odbłyśniki, soczewki, zwierciadła płaskie i filtry. Właściwości tych elementów są uzależnione od cech materiałów, użytych do ich wykonania. Materiały te scharakteryzowane są przez odpowiednie współczynniki, określające rozdział padającego na nie strumienia energetycznego.

5.2.1. Materiały przepuszczające

Wielkością, charakteryzującą właściwości materiałów, stosowanych do wykonania elementów przepuszczających, jest widmowy współczynnik przepuszczania określający udział przepuszczanego przez materiał strumienia energetycznego w strumieniu padającym, dla danej długości fali λ .

Najczęściej stosowanymi materiałami przepuszczającymi są:

- szkło optyczne (kron) - jest dobrym materiałem przepuszczającym w zakresie widzialnym, jednak pochłania promieniowanie nadfioletowe oraz częściowo - promieniowanie w obszarze podczerwieni; nie jest też odporne na działanie wysokich temperatur,
- naturalne szkło krzemionkowe - otrzymuje się z rozdrobnionych i stopionych kryształów kwarcu. Szkło takie charakteryzuje się większą odpornością termiczną i większą przepuszczalnością w zakresie nadfioletu w porównaniu ze szkłem optycznym,
- syntetyczne szkło krzemionkowe - jest dobrym materiałem przepuszczającym, ze względu na: duże wartości współczynnika τ_λ w szerokim zakresie widma od nadfioletu do bliskiej podczerwieni, mały współczynnik rozszerzalności cieplnej, dużą odporność na zarysowania i gwałtowne zmiany temperatury. Syntetyczne szkło krzemionkowe (bezpostaciowy dwutlenek krzemu) posiada mniej zanieczyszczeń niż naturalne szkło krzemionkowe. Wzrost czystości oraz brak wtrąceń ciał obcych i smug barwnych w materiale zapewnia większą przepuszczalność w nadfiolecie.

Najwyższą czystość uzyskano, dzięki zastosowaniu specjalnej technologii, przy wytwarzaniu syntetycznego szkła krzemionkowego o nazwie Suprasil 1. Charakteryzuje się ono jeszcze lepszą przepuszczalnością w zakresie nadfioletu i w średniej podczerwieni, niż syntetyczne szkło krzemionkowe.

5.2.2. Materiały odbijające

Użyteczność materiałów na elementy odbijające do określonych zastosowań opisuje widmowy współczynnik odbicia mierzony stosunkiem strumienia energetycznego odbitego do padającego na daną powierzchnię, dla danej długości fali λ .

Najczęściej stosowanymi materiałami na powierzchnie odbijające są: srebro, złoto, rod i aluminium.

Srebro - ma współczynnik odbicia większy niż aluminium, ale szybciej się utlenia i matowieje. Srebro jest stosowane często na elementy odbijające promieniowanie w bliskiej podczerwieni, ponieważ posiada w tym obszarze większy współczynnik odbicia niż aluminium, natomiast w nadfiolecie ma bardzo małe wartości współczynnika odbicia. W przedziale widzialnym aż do średniej podczerwieni srebro wykazuje największy współczynnik odbicia spośród dostępnych pokryć metalicznych.

Złoto - łączy dobrą odporność na utlenienie z wysokim współczynnikiem odbicia dla podczerwieni (jest najpowszechniej używanym materiałem odbijającym w tym obszarze). Współczynnik odbicia w podczerwieni kształtuje się powyżej 98%, w zakresie widzialnym spada od ok. 90% przy 700 nm do ok. 30% przy 400 nm. Chociaż jest możliwe skonstruowanie wielowarstwowych pokryć odbijających, które mogą mieć wyższe współczynniki odbicia niż złoto dla pewnych długości fali, to jednak użyteczny zakres dla złota jest większy.

Czyste złoto jest miękkie i łatwo rysuje się, w związku z tym stosuje się dielektryczne powłoki zabezpieczające, które jednak obniżają wartości współczynnika odbicia w podczerwieni.

Rod - jest odporny na ścieranie i utlenianie nawet w wysokiej temperaturze. Przylega dobrze do podłoża niklowego. Jest stosowany wyłącznie do pokrywania zwierciadeł elipsoidalnych i paraboloidalnych, współpracujących ze źródłami światła o bardzo dużej mocy. Odbija dobrze w zakresie od nadfioletu do podczerwieni.

Glin (aluminium) - jest powszechnie używanym materiałem na pokrycia odbijające. Charakteryzuje się dużym współczynnikiem odbicia w nadfiolecie, zakresie widzialnym i podczerwieni. Jednak powierzchnie aluminiowe ulegają utlenieniu, są miękkie i podatne na zarysowania.

Tlenek glinu powoduje nieznaczne rozproszenie w całym widmie i wyraźnie obniżenie współczynnika odbicia w zakresie nadfioletu. Na wartość współczyn-

nika odbicia ma również wpływ kąt padania wiązki promieniowania na powierzchnię odbijającą.

Aluminiem zabezpieczone - jest najlepszym metalicznym pokryciem do ogólnych zastosowań, odbijającym w zakresie widzialnym i podczerwieni. Aluminium zabezpieczone jest pokryte warstwą ochronną (np. tlenkami krzemu, tlenkami glinu, fluorkiem magnezu, germanem) która hamuje proces jego utleniania, a co za tym idzie zapobiega obniżaniu się w czasie wartości współczynnika odbicia. Pokrycia zabezpieczające zmieniają rozkład widmowy współczynnika odbicia, uzyskany dla niezabezpieczonego metalu, ponieważ w pewnych obszarach widma pochłaniają promieniowanie padające. Współczynnik odbicia zabezpieczonego aluminium zależy nie tylko od rodzaju, lecz również od grubości warstwy pokrycia.

5.2.3. Filtry interferencyjne.

Filtry interferencyjne umożliwiają wykorzystanieżądanego przedziału widma lub zmianę rozkładu widmowego energii w szerokim jego zakresie.

Filtry interferencyjne wąskopasmowe pozwalają na wyodrębnienie przedziałów długości fal o szerokości kilku nanometrów lub mniejszej, bez udziału elementów rozszczepiających wiązkę promieniowania (t.j. pryzmatów czy siatek dyfrakcyjnych).

Dzięki filtrom interferencyjnym można mierzyć energię pojedynczej linii widmowej. W przypadku filtrów szklanych i żelatynowych nie jest możliwe tak dokładne wyodrębnienie wąskich przedziałów widma.

Filtry interferencyjne mają postać wielowarstwowych cienkich pokryć. Przeważnie są to warstwy dielektryka, niekiedy jednak stosuje się również warstwy metaliczne w pomocniczych strukturach blokujących.

Filtry interferencyjne można podzielić na dwie podstawowe grupy: filtry przepuszczające tylko długości fal większe lub tylko mniejsze od żądanej długości fali oraz filtry szerokopasmowe, które przepuszczają fale o długościach, mieszczących się w wymaganym przedziale, eliminując jednocześnie fale spoza tego przedziału.

Kształt krzywej widmowego współczynnika przepuszczania lub odbicia filtru interferencyjnego jest wynikiem interferencji odbitych fal, pochodzących z odbić pomiędzy obszarami granicznymi warstw. Interferencja ta, wzmacniająca pewne długości fal a wygaszająca inne, zależy od struktury filtru. W filtrach pozbawionych warstwy blokującej, absorpcja w określonym wymaganiami przedziale długości fal jest niewielka (z powodu odpowiedniego doboru materiałów konstrukcyjnych). Można więc przyjąć, że część energii, która nie jest przepuszczana przez filtr, zostaje odbita.

W filtrach szerokopasmowych przynajmniej jedna strona ma błyszczący "metaliczny" wygląd, nawet jeżeli warstwa nie zawiera metalu.

Widmowy współczynnik odbicia dla obu stron filtra interferencyjnego może różnić się znacznie z powodu różnego położenia i wpływu materiałów pochłaniających użytych do blokowania. Według przyjętej reguły, filtr interferencyjny powinien być zwrócony w kierunku źródła światła stroną "metaliczną", aby zmniejszyć obciążenie cieplne.

Przyczyną obniżenia maksymalnych wartości współczynnika przepuszczania poniżej poziomu 100% dla kompletnego filtra jest głównie zjawisko absorpcji w pomocniczych strukturach blokujących.

5.2.4. Zwierciadła zimne

Zwierciadła zimne, czyli przepuszczające promieniowanie podczerwone, są interferencyjnymi elementami odbijającymi, selektywnymi widmowo, których działanie jest oparte na tych samych zasadach, które przyjęto dla filtrów interferencyjnych. Zwierciadła zimne odbijają promieniowanie widzialne i przepuszczają promieniowanie podczerwone. Współczynnik odbicia w zakresie widzialnym wynosi ok. 97% (jest znacznie wyższy niż dla aluminium). W związku z tym zwierciadła zimne stosowane są w przypadku, gdy istotna jest duża sprawność układu optycznego, a promieniowanie podczerwone powinno być wyeliminowane.

6. OGRANICZENIA KONSTRUKCYJNE BUDOWY SYMULATORA SŁONECZNEGO NA BAZIE ELEMENTÓW KRAJOWYCH

Układ świetlny-optyczny symulatora promieniowania słonecznego ma zapewnić odpowiednią geometrię promieniowania. Powinien on być tak zaprojektowany, aby urządzenie spełniało wymagania stawiane symulatorom.

Przyjęte w symulatorach znanych firm źródło promieniowania w postaci lampy ksenonowej (1 na rys. 3) charakteryzuje się obszarem emitującym promieniowanie, ograniczonym końcówkami elektrod pokazanych na rysunku 11. Największa luminancja występuje w pobliżu ostrza katody.

Aby skupić maksymalnie energię źródła w jeden punkt, można zastosować odbłyśnik główny (2 rys. 3) w kształcie elipsoidy obrotowej. W tym przypadku w jednym ognisku elipsoidy powinno znajdować się źródło promieniowania, w drugim należy się spodziewać maksymalnego skupienia energii promieniowania.

Poszczególne miejsca odbłyśnika w różny sposób kształtują wiązkę promieniowania, zatem równomierność natężenia napromienienia w płaszczyźnie odwzorowania obszaru źródła, przedstawia wiele do życzenia. Integrator (4) współpracując z obiektywem kolimatora (6) powinien ujednoclić gęstość kątową promieniowania we wszystkich punktach pozornego obszaru źródła (obrazu źródła). Powyższe wymagania między innymi warunkuje otrzymanie prawidłowej równomierności natężenia napromienienia w obszarze elementu napromieniowywanego.

Ponieważ w symulatorze skład widmowy promieniowania musi być precyzyjnie ustalony, czasza zwierciadła powinna być pokryta warstwami odbijającymi, o których mówiono w punkcie 5.2.2. Koszt takiej usługi jest stosunkowo wysoki.

W miejsce zwierciadła o podłożu szklanym można zastosować odbłyśnik wykonany metodą wyoblania z blachy aluminiowej o wysokiej czystości. Powierzchnia czynna odbłyśnika jest następnie polerowana i wybluszczana chemicznie lub elektrolitycznie. Właściwości takiej powierzchni zostały również omówione w punkcie 5.2.2.

Zastosowane w układzie zwierciadła płaskie nie stanowią większego problemu technicznego. Jedyne w przypadku przyjęcia jednego z nich jako zwierciadła zimnego, występują trudności wykonawcze. Wynikają one z ograniczonej możliwości pokrywania metodą próżniową elementów o większych wymiarach. Trudność tą można ominąć poprzez podział zwierciadła na kilka części.

Integrator wykonany z elementów w postaci rastra składającego się z elementów sferycznych jest w kraju niedostępny nie tylko ze względu na skomplikowany kształt, lecz również z uwagi na rodzaj materiału - szkło krzemionkowe.

W tej sytuacji można jedynie myśleć o integratorze składającym się z pęku światłowodów. Istnieje techniczna możliwość wykonania w kraju takiego integratora.

Największą trudność stanowi zakup obiektywu kolimatora, jednosoczewkowego elementu dodatniego wykonanego ze szkła krzemionkowego. Ze wstępnych obliczeń wynika jego średnica - ok. 150 nm. Może być płasko-wypukły lub dwuwypukły, o ogniskowej w przedziale od 200 mm do ok. 330 mm. W Polsce byłoby niezmiernie trudno ułożyć zamówienie na wykonanie takiego elementu. Ponadto istnieje jeszcze problem zakupu materiału. Wobec tego pozostaje jedynie droga importu gotowego obiektywu z drugiego obszaru płatniczego.

Umieszczony na drodze promieniowania filtr korygujący skład widmowy, nie zmienia praktycznie geometrii przebiegu promieniowania, pod warunkiem, że będzie to element płasko-równoległy.

Przedstawione trudności techniczne, związane z wykonaniem w kraju elementów, stosowanych w symulatorach produkcji zagranicznych firm oraz brak środków finansowych na zakup tych elementów, zmuszają do szukania alternatywnego rozwiązania układu świetlno-optycznego.

(Tekst dostarczono 13.IV.1981)

LITERATURA

1. A. Fahrenbruch, R.M. Bube-Solar Cells 1979.
2. ASTM Standard ANSI/ASTM E490-73a.
3. T.L. CHU-IEEE Trans. ED-24 Nr 4. p 442,1977.
4. Katalog firmy Oriel.
5. Katalog firmy ORC.
6. Katalog firmy Ushio-Electric Inc.