RAPORT ZADANIE 1 ETAP 1

Warszawa, 29 grudnia 2020



www.ksmvision.pl



Zakres raportu

ZADANIE 1: Opracowanie modelu matematycznego przestrzennego ogniwa perowskitowego z układem optycznym

W ramach wykonanych prac opracowano koncepcję konstrukcji optycznej prowadzenia wiązki świetlnej w układzie z ogniwem perowskitowym wykonanym na giętkim podłożu, w zakresie:

- opracowanie ogólnej koncepcji przestrzennej układu zawierającej: soczewkę wejściową, cylinder z ogniwem perowskitowym ułożonym na wewnętrznej powierzchni, zwierciadło;
- dobór kształtu zwierciadła kierującego wewnętrznego (odbicie zwrotne niezaabsorbowanego promieniowania wewnątrz cylindra);
- propozycja parametrów soczewki wejściowej (dobór rozwiązania katalogowego lub opracowanie konstrukcji) z uwzględnieniem porównania tradycyjnych soczewek refrakcyjnych i soczewek Fresnela;
- 4) wybór materiału z uwzględnieniem kosztów materiału i formowania (np. soczewka Fresnela wykonana metoda wtryskową z PMMA);
- 5) ocena efektywności warstw odbijających promieniowanie termiczne (usunięcie promieniowania podgrzewającego powierzchnię ogniw).
- 1. Opracowanie założeń do projektu układu optycznego do wykorzystania w przestrzennych strukturach ogniw perowskitowych (m. in. opracowanie konstrukcji zwierciadła kierującego wewnętrznego)

Celem tej części zadania było zaprojektowanie geometrii układu optycznego z szczególnym uwzględnieniem soczewki na wejściu układu oraz zwierciadła kierującego wewnętrznego, która umożliwi uzyskanie jak największej wydajności paneli perowskitowych (nie uwzględniając natężenia padającego światła oraz strat związanych ze zjawiskiem dyspersji). Podczas projektowania przyjęto następujące założenia konstrukcji.

- Część główna to cylinder o wymiarach 200 mm (wysokość) x 200 mm (średnica cylindra).
- Ogniwo perowskitowe wykonane na giętkim podłożu rozłożone zostały na całej powierzchni wewnętrznej ściany cylindra.
- Cały układ zawiera elementy optyczne: sferyczna skupiająca **soczewka** na wejściu układu (górna część cylindra) oraz **zwierciadło umieszczone na przeciwległym końcu cylindra**.
- Współczynnik odbicia ogniwa perowskitowego wynosi 0.2 (20% światła jest odbijane, 80% pochłaniane, brak transmisji przez ogniwo, pomijane straty absorpcyjne folii zabezpieczającej ogniwo)
- Pole okrągłej apertury wejściowej wynosi: 0.031416 m²
- Pole powierzchni bocznej (powierzchnia perowskitu) wynosi: 0.125664 m²
- Teoretyczna wydajność ogniwa zależna jest od cosinusa kąta padających promieni: $W(\alpha) = \cos \alpha$

Podczas projektowania, najważniejsze jest by uzyskać jak uzysk pola powierzchni materiału aktywnego z uwzględnieniem aspektów wydajności ogniwa ułożonego w walec w stosunku do pola powierzchni i wydajności ogniwa oświetlonego zwyczajnie (tzn. takiego, które pokrywałoby powierzchnię apertury



wejściowej cylindra i było oświetlone bezpośrednio bez użycia dodatkowych elementów optycznych). Stosunek ten można wyznaczyć z wykorzystaniem równania wyprowadzonego poniżej.



Rys. 1.1 Schemat podziału oświetlonych powierzchni

Teoretyczna wydajność ogniwa oświetlonego zwyczajnie (nieuwzględniająca natężenia padającego światła):

$$W_{pz} = P_z * W_z = \pi * r^2 * \cos(90^\circ) = \pi * r^2$$

gdzie:

W_{pz} – wydajność ogniwa na powierzchni oświetlonej zwyczajnie W_z – wydajność ogniwa zależna od cosinusa kąta padania (w tym przypadku stała i równa 1) P_z – powierzchnia oświetlonego ogniwa

Wydajność ogniwa zwiniętego w walec:

$$W_{pw} = P_w * W_w = 2 * \pi * r * h * W_w$$

 $W_{pw}-wydajność ogniwa na powierzchni zwiniętej w walec$

 $W_{\!w}-wydajność ogniwa zależna od cosinusa kąta padania$

 $P_w - powierzchnia$ oświetlonego ogniwa

Stosunek wydajności:

$$\frac{W_{pw}}{W_{pz}} = \frac{2 * \pi * r * h * W_w}{\pi * r^2}$$

w tym przypadku h = 2r

$$\frac{W_{pw}}{W_{pz}} = \frac{4 * \pi * r^2 * W_w}{\pi * r^2} = 4 * W_w$$

Tel: + 48 501 483 434 / + 48 608 571 909 • biuro@ksmvision.pl • www.ksmvision.pl



W etapie początkowym zaprojektowano cztery różne konfiguracje układu. Wszystkie konfiguracje wspomniane w tym podpunkcie projektowane były według następujących założeń:

- Oświetlenie realizowane jest jako równoległa wiązka promieni o szerokim spektrum długości fal promieniowania.
- Materiał perowskitowy jest ułożony w kształt walca o średnicy 200 mm i wysokości 200 mm. Powierzchnia aktywna skierowana do środka cylindra. Brak transparentności materiału.
- Brak soczewki na wejściu układu.
- Zwierciadło stożkowe na dnie cylindra.

Konfiguracja 1.1

Celem tej konfiguracji było dobranie kąta zwierciadła stożkowego, które umożliwi oświetlenie całej powierzchni wewnętrznej walca.

Konfiguracja 1.1a

Geometria została dobrana tak, by promień padający na środek zwierciadła umieszczonego na dnie został odbity na górną krawędź ogniwa. Taka konfiguracja pozwala wykorzystać całe wpadające światło na równomierne oświetlenie ogniwa.

Parametry konfiguracji:

- Zwierciadło na dnie to zwierciadło stożkowe, skierowane wierzchołkiem do wnętrza cylindra
- Kąt rozwarcia stożka wynosi 150°
- Ściana boczna walca oświetlona zostaje pod kątem 60° do normalnej
- Wydajność ogniwa oświetlonego pod kątem 60° spadnie do 50% na całej powierzchni

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta 1.6x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.

Konfiguracja 1.1b

Geometria została dobrana tak, by promień padający na zwierciadło tuż przy ściance został odbity na górną krawędź ogniwa.

Parametry konfiguracji:

- Zwierciadło na dnie to zwierciadło stożkowe, skierowane wierzchołkiem na zewnątrz cylindra
- Kąt rozwarcia stożka wynosi 135°
- Ściana boczna walca oświetlona zostaje pod kątem 45° do normalnej
- Wydajność ogniwa oświetlonego pod kątem 45° spadnie do 70.7% na całej powierzchni

Stosunek wydajności wynosi:

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta 2.26x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.







Rys. 1.2 Konfiguracja nr 1.1a







Rys. 1.3 Konfiguracja nr 1.1b



Celem tej konfiguracji było dobranie kąta zwierciadła stożkowego, które umożliwi oświetlenie połowy powierzchni wewnętrznej walca światłem bezpośrednio odbitym od zwierciadła, a drugą połowę światłem odbitym od perowskitu

Konfiguracja 1.2a

Parametry konfiguracji:

- Zwierciadło na dnie to zwierciadło stożkowe, skierowane wierzchołkiem do wnętrza cylindra
- Kąt rozwarcia stożka wynosi 118°
- Ściana boczna walca oświetlona zostaje pod kątem 27° do normalnej
- Wydajność ogniwa oświetlonego pod kątem 27° spadnie do 89.1% na dolnej połowie powierzchni, oraz tej samej wartości przemnożonej przez współczynnik odbicia na drugiej połowie

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta 1.71x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.

Konfiguracja 1.2b

Parametry konfiguracji:

- Zwierciadło na dnie to zwierciadło stożkowe, skierowane na zewnętrz cylindra
- Kąt rozwarcia stożka wynosi 117°
- Ściana boczna walca oświetlona zostaje pod kątem 27° do normalnej
- Wydajność ogniwa oświetlonego pod kątem 27° spadnie do 89.1% na dolnej połowie powierzchni, oraz tej samej wartości przemnożonej przez współczynnik odbicia na drugiej połowie

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta 1.71x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.







Rys. 1.4 Konfiguracja nr 1.2a





Rys. 1.5 Konfiguracja nr 1.2b



Konfiguracje 1.1 oraz 1.2 nie uwzględniają użycia soczewki na wejściu układu. W dalszej części zadania zaprojektowano układy wykorzystujący soczewkę. Ze względu na wpływ soczewki na bieg promieni fali płaskiej przez nią przechodzącą, zwierciadła umiejscowione na dnie cylindra musiały zostać ponownie zaprojektowane. Wszystkie konfiguracje wspomniane w tym podpunkcie projektowane były według następujących założeń:

- Oświetlenie realizowane jest jako równoległa wiązka promieni (fala płaska)
- Materiał perowskitowy jest ułożony w kształt walca o średnicy 200 mm i wysokości 200 mm
- Soczewka na wejściu układu
- Zwierciadło na dnie cylindra
- Odbicia od perowskitu są nieuwzględnione

Zastosowanie soczewki w układzie wprowadza dodatkową zależność kąta rozchodzenia się promienia świetlnego w zależności od tego jak daleko padł od osi optycznej soczewki. Oznacza to, że promienie padające na ścianki perowskitu będą padały pod różnymi kątami. W takim wypadku należy wprowadzić poprawkę równania na wydajność ogniwa:



Rys. 1.6 Geometria wiązki promienia przechodzącego przez soczewkę

$$W = \cos(\alpha) = \frac{y}{c} \qquad y = 100 \ mm$$
$$c = \sqrt{x^2 + y^2}$$
$$W = \frac{100}{\sqrt{x^2 + 10000}}$$

Wzór wydajności na ściance przy zmiennym kącie padania:

$$W = \int_{x_1}^{x_2} \frac{100}{\sqrt{x^2 + 10000}} \, dx = 100 * \sinh^{-1} \left(\frac{x}{100}\right) \Big|_{x_1}^{x_2}$$



Celem jest dobranie średnicy promienia soczewki wraz z jej ogniskową oraz kąta zwierciadła stożkowego, które umożliwi oświetlenie powierzchni wewnętrznej walca wiązką odbitą od zwierciadła.

Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 100 mm, a jej ogniskowa 100 mm.
- Zwierciadło na dnie to zwierciadło stożkowe, skierowane do wnętrza cylindra
- Kąt rozwarcia stożka wynosi 150°
- Ściana boczna walca oświetlona zostaje pod zmiennym kątem od 15° do 60° w stosunku do normalnej

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta 2.82x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.



Rys. 1.7 Konfiguracja nr 2.1



Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 100 mm, a jej ogniskowa 50 mm
- Soczewka umieszczona jest 100 mm przed otworem cylindra
- Zwierciadło na dnie to zwierciadło stożkowe, skierowane na zewnątrz cylindra

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec jest niemożliwa do obliczenia ze względu na straty światła przez wypromieniowanie – konfiguracja jest niezadowalająca





Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 100 mm, a jej ogniskowa 50 mm
- Soczewka umieszczona jest 100 mm przed otworem cylindra
- Zwierciadło na dnie to zwierciadło sferyczne

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec jest niemożliwa do obliczenia ze względu na straty światła przez wypromieniowanie – konfiguracja jest niezadowalająca



Rys. 1.9 Konfiguracja nr 2.3



Konfiguracje 2.4 – 2.6 oraz 3.1

Konfiguracje 2.4 – 2.6 zostały zaprojektowane tak by część promieniowania po załamaniu na soczewce padała bezpośrednio na ściankę, natomiast pozostała część na zwierciadło, które następnie odbija te promienie na ściankę. Zostało to przedstawione na rysunkach konfiguracji.

Promienie odbite od zwierciadła padają na ściankę pod innymi kątami niż te padające bezpośrednio po załamaniu. Należy to uwzględnić podczas wyznaczania wydajności ogniwa. Podział promieniowania oblicza się następującymi wzorami:



Rys. 1.10 Schemat podziału światła

% światła padającego na ściankę po załamaniu na soczewce:

$$\left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right) * 100\%$$

% światła padającego na ściankę po odbiciu na zwierciadle:

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 * 100\%$$

Niestety zastosowane zwierciadła wprowadzają krzywiznę, która bardzo mocno komplikuje obliczenia wydajności części oświetlonej przez promienie odbite przez te zwierciadła. *Z tego względu dla tych konfiguracji będą przedstawione wyniki wydajności tylko na powierzchni, na którą promienie padają bezpośrednio po załamaniu na soczewce*.

W dalszych pracach nad projektem użyty zostanie program pozwalający na dokładne i pełne obliczenia wydajności na całej powierzchni aktywnej.



Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 100 mm, a jej ogniskowa 100 mm
- Soczewka umieszczona jest 100 mm przed otworem cylindra
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnętrz cylindra o promieniu krzywizny równym 192.5 mm.
- 75% promieniowania kierowane jest przez soczewkę na połowę ścianki, natomiast 25% na zwierciadło po czym odbite na pozostałą połowę ścianki.
- Połowa ściany bocznej walca oświetlona zostaje przez soczewkę pod zmiennym kątem od 45° do 63° w stosunku do normalnej, druga połowa zostaje oświetlona przez zwierciadło pod zmiennym kątem od 27° do 68°.

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta w przybliżeniu 2.56x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.

Konfiguracja 2.5

Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 100 mm, a jej ogniskowa 40 mm
- Soczewka umieszczona w otworze cylindra.
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnętrz cylindra o promieniu krzywizny równym 191.5 mm.
- 93.50% promieniowania kierowane jest przez soczewkę na ściankę, natomiast 6.25% na zwierciadło po czym odbite na pozostałą część ścianki.
- 60% ściany bocznej walca oświetlone zostaje przez soczewkę pod zmiennym kątem od 22° do 58° w stosunku do normalnej, pozostałe 40% zostaje oświetlone przez zwierciadło pod zmiennym kątem od 32° do 68°

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta co najmniej 2.77x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.

Konfiguracja 2.6

Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 200 mm, a jej ogniskowa 50 mm
- Soczewka umieszczona w otworze cylindra.
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnętrz cylindra o promieniu krzywizny równym 179.23 mm.
- 88.89% promieniowania kierowane jest przez soczewkę na połowę ścianki, natomiast 11.11% na zwierciadło po czym odbite na pozostałą połowę ścianki.
- 50% ściany bocznej walca oświetlone zostaje przez soczewkę pod zmiennym kątem od 22° do 58° w stosunku do normalnej, pozostałe 50% zostaje oświetlone przez zwierciadło pod zmiennym kątem od 32° do 68°



Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec wzrasta co najmniej 2.63x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.



Rys. 1.11 Konfiguracja 2.4





Rys. 1.12 Konfiguracja 2.5





Rys. 1.13 Konfiguracja 2.6



Zaprojektowano układ uwzględniający odbicia światła od powierzchni ogniwa perowskitowego oraz realne wymiary dostarczonych ogniw przez firmę SOULE Technologies. Układ ten został zaprojektowany w taki sposób, by światło odbite od powierzchni ogniwa nie zostało stracone, lecz ponownie skierowane na inną część ogniwa i przez nie zaabsorbowane.

Parametry konfiguracji:

- Promień soczewki wynosi 200 mm, a jej ogniskowa 40 mm
- Soczewka umieszczona w otworze cylindra.
- Zwierciadła na dnie to skupiające zwierciadła sferyczne, skierowane na zewnętrz cylindra o promieniu krzywizny równym 331 mm.
- Perowskit umieszczony na ściankach tworzy cylinder o średnicy 200 mm i wysokości 230 mm. Część aktywna ma 210 mm wysokości.
- 97.75% promieniowania kierowane jest przez soczewkę na część ścianki, natomiast 2.25% na zwierciadło po czym odbite na pozostałą część ścianki.
- Wydajność ogniwa oświetlonego przez soczewkę pod kątem 22° spadnie do 92.72% początkowej wydajności i będzie spadać wraz ze zwiększaniem kąta do 37.46% dla kąta 68°. W przypadku światła odbitego od zwierciadła, wydajność ogniwa oświetlonego pod kątem 22° spadnie do 92.72% początkowej wydajności i będzie spadać wraz ze zwiększaniem kąta do 74.31% dla kąta 42°.

Całkowita wydajność ogniwa ułożonego w walec NIE UWZGLĘDNIAJĄC PROMIENIOWANIA ODBITEGO OD ZWIERCIADŁA NA DNIE wzrasta co najmniej 2.99x w stosunku do pola powierzchni oświetlonego normalnie z pełną wydajnością.





Rys. 1.14 Konfiguracja 3.1





Rys. 1.15 Schemat konfiguracji 3.1

Wnioski - opracowanie założeń do projektu układu optycznego do wykorzystania w przestrzennych strukturach ogniw perowskitowych (m. in. opracowanie konstrukcji zwierciadła kierującego wewnętrznego)

Analizując przeprowadzone modelowanie matematyczne i symulacje kilku zaprezentowanych powyżej konfiguracji, **najlepsze teoretyczne wyniki udowodnione wzrostem wydajności w stosunku do ogniwa o wymiarze apertury wejściowej układu oświetlonego normalnie można uzyskać wykorzystując konfigurację 3.1**. Konfiguracja ta zakłada użycie soczewki o średnicy 200 mm i ogniskowej 40 mm oraz zwierciadła stożkowego o kącie rozwarcia równym 112° i promieniu krzywizny tworzącej stożka równym 331 mm.

2. Zaproponowania (dobór rozwiązania katalogowego lub opracowanie konstrukcji) soczewki wejściowej z uwzględnieniem porównania tradycyjnych soczewek refrakcyjnych i soczewek Fresnela

Wybór materiału umożliwiającego wykonanie układu optycznego jest ściśle powiązany z wybraną konfiguracją. Możemy wyróżnić 3 główne typy takich układów.

Typ układu	Materiał	Metoda wytworzenia
refrakcyjne układy optyczne (elementy prototypowe i precyzyjne)	Szkło optyczne (blok lub precyzyjne prasówki)	Cięcie, frezowanie lub szlifowanie, docieranie, polerowanie narzędziami z wykładzinami plastycznymi, centrowanie.



refrakcyjne układy optyczne w zastosowaniach oświetleniowych	Szkło optyczne (prasówki lub podczas wytopu szkła)	Prasówki - frezowanie, docieranie, polerowanie wykładzinami elastycznymi, centrowanie. Formowanie na gorąco w czasie produkcji szkła.		
(elementy o zmniejszonej precyzji wykonania)	Tworzywa sztuczne (w formie rozdrobnionego nasypu do roztopienia lub płyt)	Techniki formowania na gorąco: - wtryskiwanie, - wytłaczanie na gorąco.		
Standardowe odbiciowe układy optyczne	Materiał podłoża (metal, kryształ, szkło, tworzywo sztuczne) z pokryciem warstwą odbijającą (metale, warstwy dielektryczne).	W zależności od materiału: szkło – obróbka jak elementów refrakcyjnych, metal – toczenie, frezowanie, polerowanie, tworzywo sztuczne – formowanie na gorąco. Warstwa odbiciowa – naparowanie lub napylanie, procesy elektrochemiczne.		

Tabela 2.1 Materiał optyczny w zależności od typu układu optycznego

W rozważanym zastosowaniu, w którym brana jest pod uwagę koncentracja energii z dużych powierzchni, tradycyjne układy refrakcyjne są mało atrakcyjne ze względu na ich dużą masę, koszt materiału i koszt wykonania. Elementy odbiciowe z kolei wymagają złamania kierunku osi optycznej i wymuszają specyficzną konstrukcję układu. Ze względów na brak aberracji chromatycznych świetnie sprawdzają się w wyspecjalizowanych przyrządach obserwacyjnych (teleskopy zwierciadlane), gdzie źródło światła jest polichromatyczne. W zakresie zastosowań w układach koncentratorów optycznych nie są jednak spotykane.



Rys. 2.1 Wizualizacja różnic konstrukcyjnych soczewki standardowej i soczewki Fresnela [1].

W szeregu układów nieobrazujących, gdzie priorytet ma transfer energii świetlnej i niski koszt, najczęściej spotyka się zastosowanie tworzyw sztucznych. W porównaniu ze szkłem optycznym są one lekkie, łatwo formowalne, tanie. Przy formowaniu termicznym elementom optycznym można nadawać złożony kształt, niekiedy niemożliwy do uzyskania przy stosowaniu obróbki konwencjonalnej. Konstrukcja elementu optycznego może być rozbudowana o elementy bazowe i dystansowe, co bardzo ułatwia montaż i wpływa na zmniejszenie kosztów. Mikrogeometria powierzchni odpowiada typowym wymaganiom dla optyki instrumentalnej, w rutynowo produkowanych niewielkich elementach optycznych (do 10 mm średnicy) odchyłki kształtu powierzchni mogą być utrzymane w granicach $\lambda/10$. Są jednak niestabilne termicznie, a dopuszczalna temperatura użytkowania nie jest wysoka (przeważnie około 80°C).



Warto podkreślić, iż soczewki Fresnela są jednym z produktów dedykowanych do współpracy z ogniwami solarnymi. Są one opisane jako soczewki Fresnela typu CPV - Concentrated Photovoltaic. Soczewki Fresnela dostępne są katalogowo, dzięki czemu można zamówić pojedyncze sztuki do zbudowania prototypu układu w przyszłości. W konfiguracjach układu przedstawionych w pkt. 1 zaproponowano wykorzystanie dwóch rodzajów soczewek o ogniskowych 100 mm i 40 mm.

1. Soczewka Fresnela, średnica 200 mm, ogniskowa 100 mm





(źródło: https://www.knightoptical.com/stock/default/fresnel-lens-100mmf-lx200mmdia.html)

Soczewka Fresnela dostępna katalogowo w ofercie firmy Knight Optical, o średnicy 200 mm oraz ogniskowej 100 mm, koszt tej soczewki to 111.20 USD.



Rys. 2.3 Opis geometrii soczewki Knight Optical (https://www.https://www.knightoptical.com).



2. Soczewka Fresnela, średnica 200 mm, ogniskowa 40 mm

		_
4	100	
		-

7.87" x 7.87", 1.57" Focal Length, Fresnel Lens Stock #13-460

Dimensions (inches):	7.87 x 7.87	Dimensional Tolerance (inches):	±0.05
Dimensions (mm):	200.0 x 200.0	Effective Focal Length EFL (mm):	40.00
Effective Focal Length EFL (inches):	1.57	Center Thickness CT (inches):	0.08
Groove Density (grooves/inch):	100	Substrate:	Acrylic
Coating:	Uncoated	Thickness Tolerance (%):	±40
Index of Refraction n _d :	1.49	Operating Temperature (°C):	80 (Maximum)
Transmission (%):	92 (from 400-1100nm)	Туре:	Fresnel Lens
Wavelength Range (nm):	400 - 1100		

Wavelength Range (nm):

Rys. 2.4 Specyfikacja soczewki Fresnela firmy Knight Optical

(źródło: https://www.edmundoptics.eu/p/787-x-787-157-focal-length-fresnel-lens/42293/)

Soczewka Fresnela dostępna katalogowo w ofercie firmy Edmund Optics, o średnicy 200 mm oraz ogniskowej 40 mm (o charakterystyce spektralnej przedstawionej na rys. poniżej), koszt tej soczewki to 100 USD.



Rys. 2.5 Opis geometrii soczewki Edmund Optics oraz jej charakterystyka spektralna (https://www.edmundoptics.co.uk).

Dla porównania soczewki tradycyjne o średnicy 200mm występują dość rzadko i przeważnie są używane do dużych układów oświetleniowych jako kondensory.



Na stronie <u>https://www.edmundoptics.com/f/large-pcx-condenser-lenses/13572/</u> producent zamieszcza oferowne soczewki w grupie "Large PCX Condenser Lenses" wykonane ze szkła n-BK7. Są to soczewki płasko wypukłe. Dla średnicy 200 mm dostępne są tylko soczewki o wartościach ogniskowych 400, 600 i 800 mm. Nie są natomiast oferowane soczewki z ogniskowymi, które zostały wybrane w obliczeniach projektowych. Koszt pojedynczej soczewki (bez warstw) to 250-270 \$. Soczewki z warstwami antyrefleksyjnymi oferowane są do średnicy 75mm.

W podobnych cenach i parametrach można znaleźć soczewki tradycyjne o średnicy 200mm u innych producentów np. <u>https://www.meetoptics.com/lenses/spherical?diameter=150,250</u>

Oprócz tradycyjnych technik obróbki szkła w celu wytworzenia soczewki można również wykorzystać technikę formowania (moldingu) szkła na gorąco. Pozwala to na uzyskanie krótszych ogniskowych. Poniższa fotografia przedstawia przykładowe rozwiązanie. Bardzo charakterystyczna jest duża grubość soczewki i duża masa. Soczewki takie są produkowane tylko przy bardzo dużej liczbie zamówień.



Rys. 2.6 Standardowa soczewka płasko-wypukła (źródło: https://sinoptix.eu/optical-components/lenses/)



3. Wybór materiału z uwzględnieniem kosztów materiału i formowania (np. soczewka Fresnela wykonana metoda wtryskową z PMMA).

Do wykonania soczewek Fresnela stosuje się różne tworzywa sztuczne, załączona tabela pokazuje optyczne i mechaniczne parametry optycznych tworzyw sztucznych.

	Jednostki	РММА	PS	NAS	SAN	PC	TPX	ABS	ADC (CR 39)
Gęstość	g/cm ³	1,17 - 1,20	1,04 - 1,10	1,13	1,07	1,25	0,835		1,32
Współczzalamania n _d (587,6 nm) n _C (656,3 nm) n _F (486,1 nm)	24	1,492 1,489 1,498	1,590 1,585 1,604	1,533-1,567 1,558 1,575	1,567-1,571 1,563 1,578	1,585 1,580 1,599	1,467 1,464 1,473	1,538	1,50
Vd		57,4	31,1	35	37,8	29,9	51,9		58
Termiczna zmiana współczynnika załamania	dn/dT 10 ⁻⁵ /°C	-10,5	-14,9	-14,0	-11,0	-10,7 do -14,3			
Współczynnik rozszerzalności cieplnej a	x10 ⁻⁵ /°C	6-7	6,0 - 9,0	5,5 - 6,0	6,5 - 6,7	6,6 - 7,0		0,83	8 - 14
Zalecana maksymalna temperatura pracy	°C	92	82	93	79-88	124		82	100
Przewodność cieplna	Cal/sec.cm °Cx10 ⁻⁴	4,96	2,4-3,3	4,5	2,9	4,65	4,0		
Rozpraszanie swiatła	%	2	3	3	3	3	5	12	
Przepuszczalność świetlna	%, grubość 3,175 mm	92	88	90	88	89 - 90	90	79 (grubość 6,35 mm)	
Absorpcja (zanurzenie przez 24 godz. W wodzie w temp. 23 °C)	%	0,3	0,2 - 0,03	0,15	0,2-0,35	0,15	0,01		
Odporność na zarysowanie (skala względna od najwyższej 5 do 1)	4	2	3	3		1			

Tablica 9.1. Właściwości tworzyw sztucznych [9.1, 9.2, 9.3]

Rys. 3.1 Właściwości tworzyw sztucznych

Skupiając się na rozważanym zastosowaniu zdecydowanym wyborem w konstrukcji układu optycznego powinna być soczewka Fresnela wykonana z tworzywa sztucznego akrylu (PMMA) lub polistyrenu (PS).

Szkło akrylowe (głównym składnikiem jest polimetakrylan metylu PMMA) było pierwszym tworzywem sztucznym zastosowanym w optyce. Współczynnik załamania 1,49, dobra optyczna przepuszczalność w obszarze widzialnym, w specjalnej wersji przepuszczalny w UV. Małe rozproszenie światła. Miękki, ale odporny na zarysowanie, odporny na promieniowanie UV, mała przewodność cieplna, dobra stabilność kształtu.







Rys. 3.2 Zakresy transmisji wybranych tworzyw sztucznych [3].

PS (polistyren) łączy przepuszczalność i klarowność. Absorpcyjny w obszarze UV, ale ma wysoką przepuszczalność w IR. Duży współczynnik załamania. Tani, łatwy w produkcji, w porównaniu z PMMA łatwiej formowalny, miększy, mniej stabilny. Ze względu na wysoki współczynnik załamania i dużą dyspersję soczewki polistyrenowe pracują w dubletach achromatyzowanych wraz z akrylowymi. Polistyren jest nieco mniej odporny na zarysowanie niż PMMA, także mniej odporny na uderzenia - kruchy.





rozpraszającą [4]

Rys. 3.3 Szklane soczewki Fresnela ze strukturą Rys. 3.4 Soczewka Fresnela o średnicy 200mm z tworzywa sztucznego [5].

Soczewka Fresnela może być zatem optycznym elementem skupiającym o mniejszej grubości i lżejszej niż soczewka standardowa. Może być w tani sposób produkowana na skalę masową poprzez techniki formowania na gorąco. Proces wymaga przygotowania metalowego wzorca (negatywu kształtu powierzchni soczewki Fresnela). Koszt jest uzależniony od średnicy, liczby i głębokości nacięć, materiału i techniki wykonania. W najprostszych wersjach może wynieść kilkanaście tysięcy zł a w najbardziej zaawansowanych nawet kilkadziesiąt tysięcy Euro. Rys. 2.5 pokazuje wzorzec (mold) soczewki wykonany w czasie 60 dni. Przeznaczony jest do produkcji soczewek typu CPV (Concentrated Photovoltaic).





Rys. 3.5 Zdjęcie metalowego wzorca do wytłaczania soczewek Fresnela [6]



Rys. 3.6 Kroki procesu tworzenia soczewki Fresnela w procesie wtryskiwania na gorąco [6].

Przykładowe firmy realizujące wytworzenie wzorca i wykonanie serii soczewek Fresnela

https://www.tecnotticaconsonni.it/en/produzioni/printed-lenses/fresnel-lenses/

"Tecnottica offers to its customers two types of Fresnel lenses: **glass-molded Fresnel lenses** (with the possibility of having the flat back surface polished or satin) and **plastic-molded Fresnel lenses**. We have a large production of many kinds of Fresnel lenses, divided by their **focal lenghts and geometries**, and we also produce **customizable Fresnel lenses** in according to specific customer's requests."

http://www.meiyingoptics.com/sale-10988799-round-shape-200mm-pmma-material-spot-fresnel-lens-fresnel-lens-solar-concentrator-solar-fresnel-lens.html



Product name	Fresnel lens
Application	For solar concentrator or exhibition
Material	РММА
Size	Dia 200mm
Focal length	70/80/85/95/100/120/140/150/160/200/220mm
Groove pitch	0.3mm
Thickness	2mm
Light transmittance	93%

SIZE RECOMMENDED



		Round fresnel lens cata	logue	
No.	OD	Focal length(mm)	Groove pitch(mm)	Thickness(mm)
1	φ20	10/50	0.3	2
2	φ30	15/20/50	0.3	2
3	φ40	28/35/40/43/50/55/60/70/80	0.3	2
4	φ42	28/35/40/43/50/55/60/70/80	0.3	2
5	φ43	40	0.3	2
6	φ50	28/30/35/40/45/50/55/60/70/80/100	0.3	2
7	φ52	35	0.5	2
8	φ55	25/35/40	0.3	2
9	φ60	25/27/30/40/50/60/70/80	0.3/0.5	2
10	φ70	30/40/50/60/70/80	0.3/0.5	2
11	08 φ	35/40/50/60/70/80/90/100	0.3/0.5	2
12	φ90	30/43/50	0.3/0.2	2
13	φ100	36/40/50/60/68/70/80/100/120	0.3/0.1/0.5	2
14	@110	60/70/100/120	0.3/0.5	2
15	@120	50/100/120/220	0.3/0.5	2
16	φ124	120/150/185	0.3/0.5	2
17	@125	1000	0.5	2
18	@130	50/100/140	0.3	2
19	@140	100/120/220	0.3/0.5	2
20	@147	220	0.3	2
21	φ150	55/70/80/90/100/120/140/200/210	0.3/0.5	2
22	@155	55/200	0.5/0.3	2
23	φ160	70/185/290	0.5/0.3	2
24	@164	260	0.3/0.5	2
25	@170	135/150	0.5/0.3	2
26	@175	135/150	0.5/0.3	2
27	@180	80/120/200/240	0.5/0.3	2
28	φ200	70/80//100/120/140/150/160/185/200/220	0.5/0.3	2
29	m202	95	0.5	2
30	(m220	130/240/600	0.5	2
31	@225	370	0.5	2
32	(m230	110	0.3	2
33	@240	290	0.5	2
34	φ250	90/100/120/140/185/230/240/250/260/290/500/1000	0.5/0.3	2

Rys. 3.7 Opis soczewek Fresnela z katalogu firmy Meiying Optics

Ze względu na prototypowe prace w pierwszej części projektu należy wybrać konstrukcję soczewki dostępną na rynku. Jeżeli w wyniku prac projektowych powstanie koncepcja unikalnego rozwiązania soczewki,



konieczne będzie rozważenie możliwości wyprodukowania dostosowanych soczewek Fresnela do potrzeb rozwijanej konstrukcji.

[1] Sornek, K., Filipowicz, M., Jasek, J., The Use of Fresnel Lenses to Improve the Efficiency of Photovoltaic Modules for Building-integrated Concentrating Photovoltaic Systems, J. sustain. dev. energy water environ. syst., 6(3), pp 415-426, 2018, DOI: https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0204

- [2] "Materiałoznawstwo optyczne i optoelektroniczne", Andrzej Szwedowski, WNT, 1996
- [3] https://www.fresneltech.com/fresnel-lenses
- [4] https://www.tecnotticaconsonni.it/en/produzioni/printed-lenses/fresnel-lenses/
- [5] http://www.gaggione.com/custom_made_fresnel_lenses_for_solar_power.xhtml
- [6] https://www.fresnelfactory.com/production-of-master-mold-for-cpv-fresnel-lens-en.html

[7] Marcel Roeder, Thomas Guenther, André Zimmermann Review on Fabrication Technologies for Optical Mold Inserts Micromachines 2019, 10, 233; https://www.mdpi.com/2072-666X/9/12/653/htm



4. Ocena efektywności i warstw odbijających promieniowanie termiczne (usunięcie promieniowania podgrzewającego powierzchnię ogniw).

Elementy optyczne zawierające warstwę odbijającą promieniowanie z zakresu NIR nazywane są "hot mirror". Są szczególnie użyteczne tam, gdzie strumień energii zawierający część energii z zakresu powyżej 700nm powoduje nagrzewanie się elementów optycznych i mechanicznych co niekorzystnie wpływa na ich funkcjonowanie lub powoduje przyspieszone starzenie się materiałów. Na ogół projektowane warstwy odbijające NIR są projektowane na określone widmo i kąt padania promieniowania (od 0 do 45°). Promieniowanie z zakresu widzialnego powinno być przepuszczane z jak najmniejszymi stratami, które nie powinny przekraczać 10% całkowitej wartości padającego promieniowania. Podłożem jest przeważnie szkło o dużej odporności termicznej zawierającej znaczną zawartość krzemionki. Są to najczęściej szkła borowokrzemowe, kwarc topiony, ale także materiały specjalne jak ceramika czy dewitryfkaty (np. Zerodur).



Rys. 4.1 Charakterystyka "hot mirror" przy ustawieniu pod katem 45 ° oferowanych przez firmę Thorlabs (źródło: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6108)

Wytworzenie warstwy o dobrych parametrach na dużej powierzchni jest kosztowne. Już element od średnicy 25,4 mm oferowany przez firmę Thorlabs kosztuje około 100 Euro/sztuka. Za podobną cenę jest też oferowana warstwa "hot mirror" wytworzona na tańszym ale 2x większym podłożu ze szkła sodowego.

W aspekcie analizowanego rozwiązania stosowanie warstw nie jest zalecane z następujących powodów:

- 1) obniżenie transmisji o kilka % na wejściu układu;
- 2) znaczny koszt wytworzenia;
- 3) technologia wytworzenia warstw wymaga procesów realizowanych w próżni. W przypadku tworzyw sztucznych, które wydają się być najlepszymi materiałami na tanie soczewki wejściowe układu, pokrycie tego typu warstwą nie jest możliwe ze względu na możliwość uszkodzenia komory (wydzielanie dodatkowych gazów przez tworzywa) oraz konieczność podgrzewania podłoża.

Należy szukać więc efektywnego systemu odprowadzania gromadzącego się nadmiernie ciepła poprzez jego konwekcję na obudowie urządzenia.