



Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

LABORATORIUM

Elementy i Układy Optoelektroniczne (Advanced Optoelectronics)

Ćwiczenie opracował: dr inż. Damian Pucicki

Ćwiczenie nr 3

Pomiary radiometryczne opraw świetlnych i modułów oświetleniowych

I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania

- promieniowanie optyczne, wielkości charakteryzujące (energia, długość fali, częstotliwość, temperatura barwowa),
- wielkości radiometryczne – energia promieniowania, strumień promieniowania, irradiacja (natężenie), emitancja,
- sposoby pomiarów strumienia promieniowania – całkująca kula Ulbrichta oraz przestrzennego rozsyłu światła (metoda Russela),
- krzywa fotometryczna i bryła fotometryczna.

II. Program zajęć

- Pomiar krzywych fotometrycznych źródła światła (diody LED emitującej światło białe) umieszczonego kolejno w dwóch oprawach, różniących się optyką formującą strumień światła, we wskazanych płaszczyznach przestrzeni,
- Zestawienie uzyskanych wyników w formie brył fotometrycznych charakteryzujących wybrane oprawy świetlne,
- Porównanie wyznaczonych strumieni energetycznych i oszacowanie strat opraw świetlnych.

Wykonując pomiary PRZESTRZEGAJ przepisów BHP

Materiały źródłowe:

1. Ransen O., Candelas, Lumens and Lux; <http://www.ransen.com/photometric/Candelas-Lumens-And-Lux-Chapter-Samples.pdf>; dostęp dnia 14.11.2015
2. http://cmf.p.lodz.pl/iowczarek/materiały/fotometria/strumie_wietlny.html; dostęp dnia 15.11.2015
3. Ziętek B., Optoelektronika, Wydawnictwo UMK, 2004
4. <http://www.lenalighting.pl/bank-wiedzy/rozsył-swiatlosci/>; dostęp dnia 10.10.2015
5. <http://www.swiatlo.tak.pl/1/index.php/wykres-swiatlosci/>; dostęp dnia 10.10.2015
6. <http://www.ransen.com/photometric/understanding-photometric-polar-diagrams.htm>; dostęp dnia 10.10.2015
7. <http://www.spectrocolor.pl/pl/produkty/pomiar-rozsyłu-swiatelnego/kula-ulbrichta.html> dostęp dnia 09.10.2016

Instrukcję do ćwiczenia opracowano na podstawie prac inżynierskich:

- Stanowisko do pomiarów krzywych fotometrycznych oraz całkowitego strumienia świetlnego autorstwa Ewy Śzwaby, PWr 2016 r.
- Oprogramowanie stanowiska do pomiarów krzywych fotometrycznych oraz całkowitego strumienia świetlnego, Tomasz Wilka, PWr. 2017

1 Cel ćwiczenia

W ostatnich latach sposoby oświetlenia zyskały kluczową rolę chociażby w zakresie dekoracji wnętrz czy motoryzacji. Liczne badania wskazują również na istotny wpływ jasności i barwy światła na nastrój człowieka czy zdolność koncentracji. Badanie i formowanie przestrzennego rozsyłu światła ma także uzasadnienie m.in. w technice motoryzacyjnej. Analizując zagadnienie konieczności uzyskania granicy światła i cienia można zauważyć konieczność precyzyjnego kształtowania wiązki światła formowanej przez reflektory samochodowe. Z uwagi na duży postęp techniki oświetleniowej dużą uwagę poświęca się zatem sposobom formowania strumienia świetlnego, czyli kształtom wykorzystywanych soczewek i opraw świetlnych. Nieodłączną częścią projektowania opraw świetlnych jest eksperymentalna weryfikacja uzyskanych krzywych fotometrycznych

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z zagadnieniami dotyczącymi pomiarów fotometrycznych (w tym pomiarów krzywych fotometrycznych i brył fotometrycznych), sposobów ich graficznej prezentacji oraz wyznaczenia całkowitego strumienia świetlnego i energetycznego.

2 Wiadomości wstępne

Część widzialną promieniowania elektromagnetycznego nazywamy potocznie światłem. Za wartości graniczne przyjmuje się długości fal od 400 do 780 nm, jednak są to wartości umowne, zależne od wrażliwości ludzkiego oka. Promieniowanie podlegające prawom optyki geometrycznej, zwane **promieniowaniem optycznym**, obejmuje zakres fal o długości od 10 nm do 1 mm i dzieli się je na trzy zakresy: podczerwień (780 nm – 1 mm), światło widzialne i ultrafiolet (10 nm – 400 nm).

Całkowita moc promieniowania świetlnego emitowanego ze źródła światła, które może wywołać określone wrażenie wzrokowe to **strumień świetlny Φ** . Jednostką strumienia świetlnego jest **lumen (lm)** [1]. W warunkach widzenia fotopowego (tzn. takiego, przy którym postrzegane są wrażenia barwne) strumień świetlny można opisać następującym wzorem [2]:

$$\Phi = K_m \int_{400nm}^{780nm} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

gdzie:

- $\Phi_e(\lambda)$ – rozkład widmowy strumienia energetycznego [W],
- $V(\lambda)$ – skuteczność świetlna widmowa względna,
- K_m – skuteczność świetlna promieniowania ($683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$),
- λ – długość fali elektromagnetycznej.

Wyrażana w kandelach (cd) światłość I jest to stosunek wartości strumienia świetlnego $d\Phi$, wysyłanego przez źródło światła w pewnym kącie bryłowym $d\Omega$, do wartości tego kąta [3].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2)$$

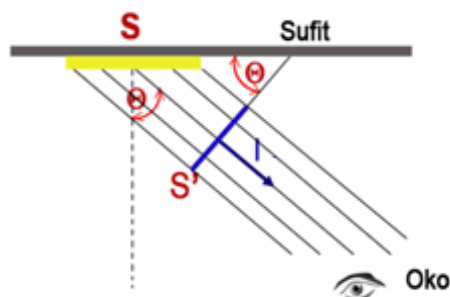
Luminancja L to stosunek światłości pola powierzchni elementu świecącego w danym kierunku do pola powierzchni pozornej tego elementu. Jest miarą jaskrawości obserwowanych obiektów.

$$L = \frac{dI}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (3)$$

gdzie:

- Φ – wielkość strumienia świetlnego [lm],
- θ – kąt między normalną do powierzchni i określonym kierunkiem,
- S – powierzchnia źródła światła [m^2],
- Ω – wielkość kąta bryłowego [sr].

Luminancja jest wielkością wektorową a jej wartość zależy od kierunku obserwacji i nie jest zależna od odległości obserwatora od obiektu. Jednostką luminancji jest **kandela na metr kwadratowy (cd/m^2) lub nit (nt)** [4]. Na rysunku 1. zobrazowano omawiane pojęcie.



Rys. 1. Wyjaśnienie pojęcia luminancji obserwowanej powierzchni [3]

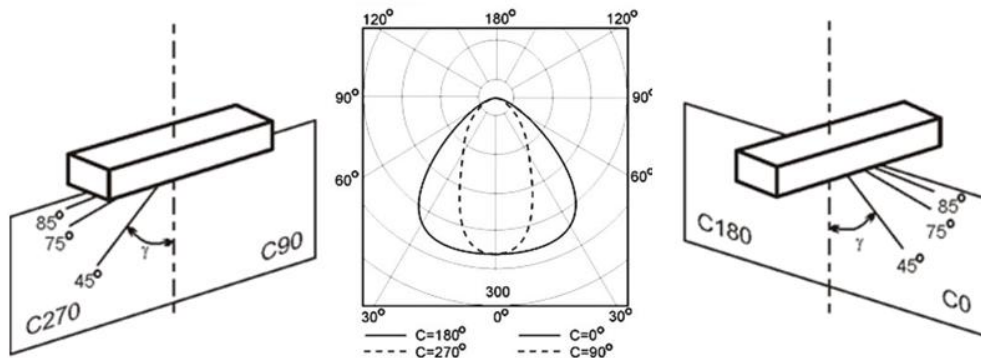
Iloraz strumienia świetlnego $d\Phi$, padającego na powierzchnię dS , do pola tej powierzchni to **natężenie oświetlenia E** .

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (4)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest **luks (lx)** [1].

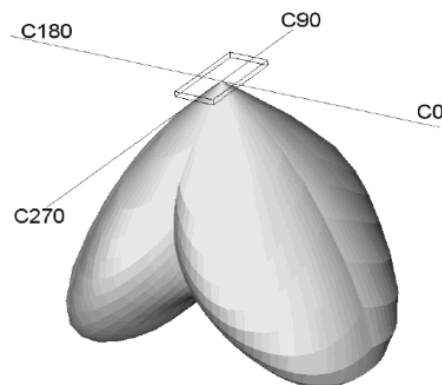
Krzywa fotometryczna przedstawia rozkład dowolnej wielkości fotometrycznej oprawy świetlnej (źródła światła). Pomiary wykonuje się zwykle w dwóch płaszczyznach (co zilustrowano na rys. 2):

- w płaszczyźnie równoległej przechodzącej przez wzdłużną oś oprawy, płaszczyzny **C90-C270**,
- w płaszczyźnie prostopadłej do osi oprawy, płaszczyzny **C0-C180** [4].



Rys. 2. Przykładowy wykres światłości dla dwóch płaszczyzn wraz ze szkicem ułożenia płaszczyzn pomiarowych względem oprawy świetlnej [5]

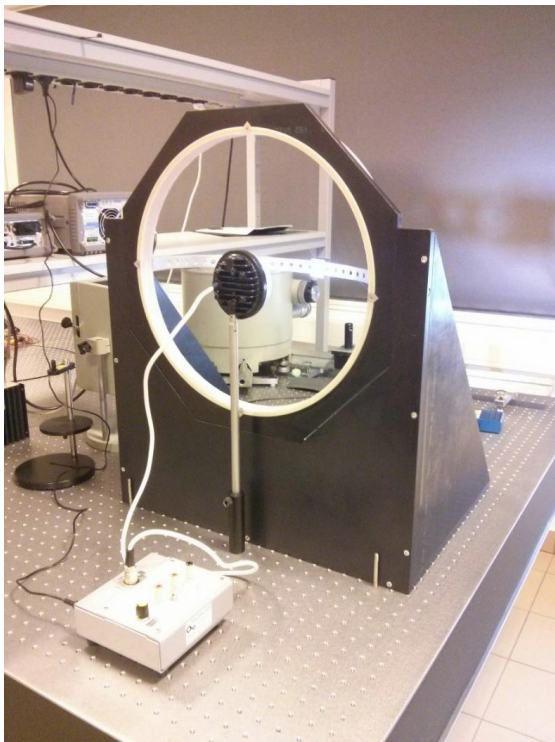
Pełny obraz przestrzennego rozsyłu strumienia światła przez źródło można uzyskać wykonując pomiar krzywych fotometrycznych w różnych płaszczyznach, tworząc tym samym **bryłę fotometryczną** (rysunek 3.). Bryła fotometryczna jest objętością zamkniętą utworzoną przez końce wektorów światłości o początku w źródle światła. Długość wektorów świetlnych odpowiada wartości światłości mierzonej w danym kierunku, co w naszym przypadku będzie prezentowane paletą kolorów.



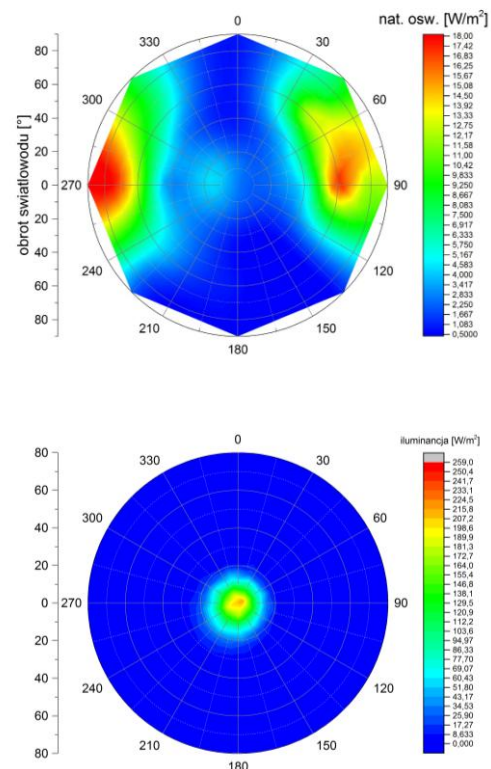
Rys. 3. Przykładowy bryła fotometryczna z zaznaczonymi kierunkami płaszczyzn pomiarowych [6]

3 Sposoby pomiaru strumienia świetlnego – układ pomiarowy

Pomiaru całkowitego strumienia świetlnego dokonać można na podstawie pomiaru **przestrzennego rozsyłu światła**, w różnych płaszczyznach i ustawieniach kątowych detektora, a następnie zsumowanie uzyskanych wyników. Na rysunku 4. przedstawiono laboratoryjne stanowisko pomiarowe z ruchomą głowicą umożliwiającą obrót w pełnym zakresie kątów 360° w jednej płaszczyźnie oraz z półokrągłą szyną umożliwiającą przesuw saneczek z detektorem w zakresie 180° w płaszczyźnie prostopadłej. Tak skonstruowane stanowisko umożliwia pomiar bryły fotometrycznej w połowie sfery. Przykładowe wyniki uzyskane w wyniku charakteryzacji dwóch opraw świetlnych pokazano na rysunku 5.



Rys. 4. Stanowisko do pomiarów krzywych oraz brył fotometrycznych.



Rys. 5. Przykładowe wyniki charakteryzacji opraw świetlnych różniących się układem optycznym.

Całkowity strumień świetlny emitowany przez źródło światła można także zmierzyć wykorzystując **kulę całkującą** (lumenomierz, **kula Ulbrichta** – rys. 6.) w połączeniu ze spektrofotometrem lub skalibrowanym detektorem jednokanałowym. Pomiar strumienia świetlnego badanego źródła światła wykonuje się przez porównanie ze wzorcem. Kula całkująca wykorzystuje w swoim działaniu zjawisko całkowitego wielokrotnego odbicia w celu ujednorodnienia natężenia padającego na ścianki wewnętrzne kuli w każdym jej punkcie. Wadą takiego pomiaru jest brak możliwości obserwacji rozkładu przestrzennego strumienia światła.



Rys. 6. Kula Ulbrichta do pomiarów strumienia świetlnego[7]

4 Pomiar

W ćwiczeniu układem detekcyjnym jest spektrofotometr z podłączonym skalibrowanym fotodetekтором kosinusoidalnym. Detektor umieszczony jest w ruchomym uchwycie zamontowanym na ramieniu przymocowanym do obrotowej głowicy stanowiska.

W trakcie ćwiczeń dokonuje się pomiarów fotometrycznych dwóch opraw świetlnych różniących się układem optyki. Diody LED zamontowane w obu oprawach są identyczne. Do zasilania diod wykorzystuje się przeznaczone układy zasilania dostępne na stanowisku wraz oprawą świetlną.

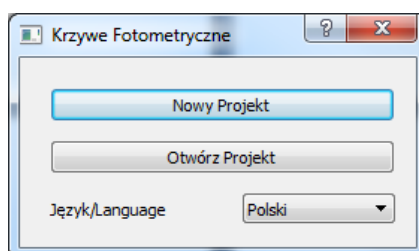
Przed przystąpieniem do pomiarów należy określić kierunek, w którym wybrane źródło światła emituje największą moc i przy takim ustawieniu detektora przeprowadzić kalibrację spektrofotometru.

Wykorzystując oprogramowanie „Krzywe Fotometryczne” dokonać pomiaru parametrów fotometrycznych dwóch wybranych opraw świetlnych. Po zebraniu danych pomiarowych wykreślić krzywe fotometryczne w kilku (w tym dwóch prostopadłych) płaszczyznach oraz bryłę fotometryczną. Zapisać wartość całkowitego strumienia dla dwóch opraw i wytłumaczyć różnice w ich wartościach.

5 Instrukcja użytkowania programu „Krzywe fotometryczne”

Okno Powitalne

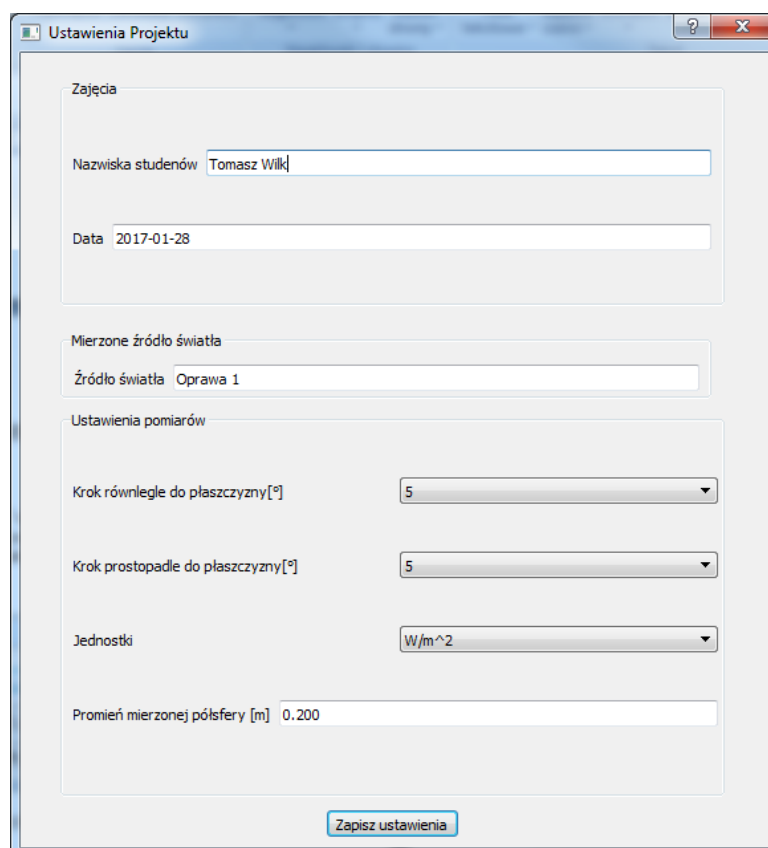
Po otwarciu aplikacji „Krzywe Fotometryczne” użytkownik ma możliwość stworzenia nowego projektu lub otworzenia już istniejącego (Rysunek 9). Język obsługi aplikacji (polski lub angielski) odczytywany jest automatycznie z ustawień systemu operacyjnego, jednak pozostawiono również opcję ręcznej zmiany.



Rys. 8. Okno wyboru ukazujące się po otwarciu aplikacji

Moduł Ustawienia

Jeśli zostanie wybrana pierwsza opcja, to istnieje możliwość ustawienia parametrów projektu (Rys. 9). Nazwisko studenta, data oraz nazwa źródła światła będą pojawiać się później na wykresach. Kroki pomiarowe definiują gęstość pomiaru (co 5°, 10°, 15°). Jednostki pomiaru natężenia światła zostały także zdefiniowane na etapie wymagań: W/m², μW/cm², lm/m²



Rys. 9. Okno konfiguracyjne programu

Główne okno

Po akceptacji ustawień przyciskiem „Ustaw”, otworzone zostaje główne okno programu (Rys. 10.) zawierające tabelę w której można wpisywać wyniki pomiarów. Kolumny oznaczone są „równoleżnikami” (współzrędnymi na „południku”, szerokością geograficzną) półsfery w stopniach rozpoczynając od ich punktu wspólnego („bieguna”). Wiersze analogicznie podpisano współzrędną południków. Student ma możliwość wpisywania wartości pomiarów natężenia promieniowania.

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
55	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
65	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
70	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Rys. 10.1 Główne okno aplikacji "Krzywe fotometryczne"

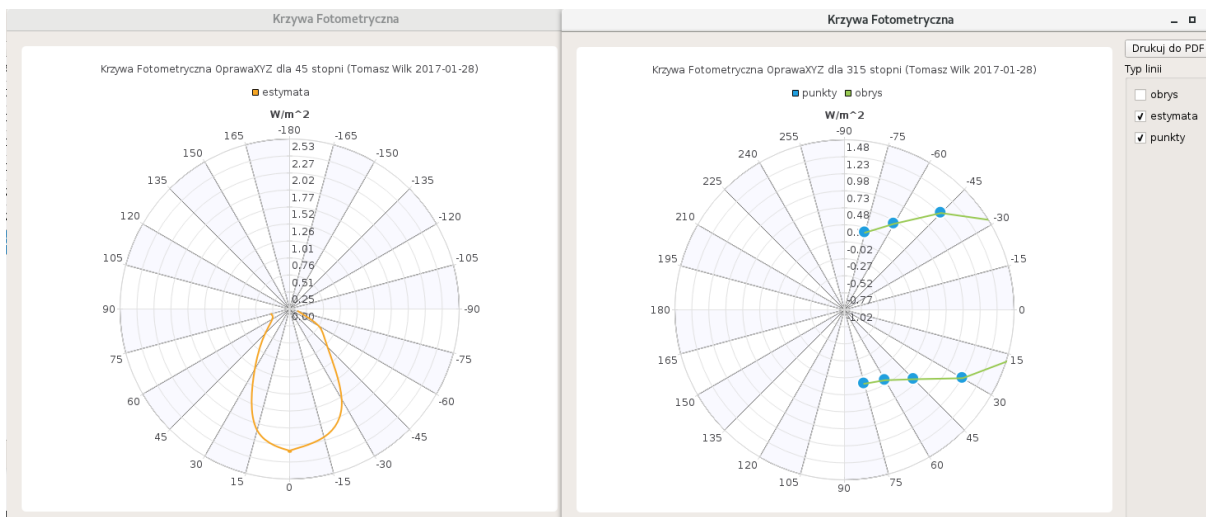
Odpowiednie przyciski w głównym oknie aplikacji umożliwiają:

- zapisanie danych pomiarowych do pliku CSV (comma -separated values)
- odczytanie danych pomiarowych z pliku CSV zapisanych przez aplikację
- zmianę ustawień projektu w oknie z Rysunku 10.
- wyrysowanie krzywej fotometrycznej po wybraniu wierszy z których ma być obrazowana krzywa
- wykreślenie przekroju przez bryłę fotometryczną po wybraniu wiersza dla którego ma być sporządzony graf,
- policzenie strumienia świetlnego,
- narysowanie bryły fotometrycznej w układzie współrzędnych XYZ.

Cztery ostatnie punkty zostały szczegółowo opisane poniżej.

Moduł „Krzywa fotometryczna”

Głównym zadaniem modułu jest narysowanie krzywej fotometrycznej dla zadanego „południka” sfery. W terminologii geograficznej jest to linia na powierzchni sfery łącząca bieguna, w niniejszym opisie zaczyna się w punkcie wspólnym wszystkich południków (na osi świetlnej źródła) i prowadzi do krawędzi półsfery pomiarowej prostopadle do niej. Po wybraniu wiersza w głównym oknie, wartości pomiarów są pobierane z jego linii. Aby uzyskać przekrój przez całość sfery, pobierane są też wartości z komplementarnego do niego wiersza po przeciwnej stronie sfery. To umożliwia narysowanie krzywej w zakresie $\langle -85^\circ, 85^\circ \rangle$.



Rys. 11. Okna z krzywą fotometryczną w układzie współrzędnych biegunowych.

Student ma możliwość wyboru jak wykreślona krzywa ma wyglądać – czy powinna być estymowana (pomarańczowa linia), czy łączyć (zielona linia) wartości pomiarów (niebieskie punkty), co zobrazowano na Rysunku 12. Wykres może być powiększany i obracany za pomocą strzałek na klawiaturze, co zostało przedstawione w niższym oknie.

Wygenerowany obraz może być zapisany do pliku pdf.

Moduł „Przekrój”

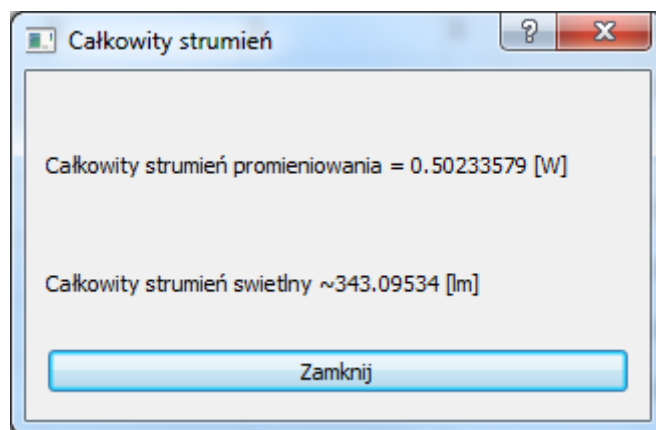
Po wybraniu kolumny z danymi przekroju przez konkretny „równoleżnik” półsfery, program rysuje go we współrzędnych biegunowych w oknie identycznym jak w module „Krzywe fotometryczne”. Opis funkcjonalności nie różni się od zawartego powyżej.



Rys.12. Okna z przekrojami przez bryłę fotometryczną

4.1.6. Moduł „Strumień Świetlny”

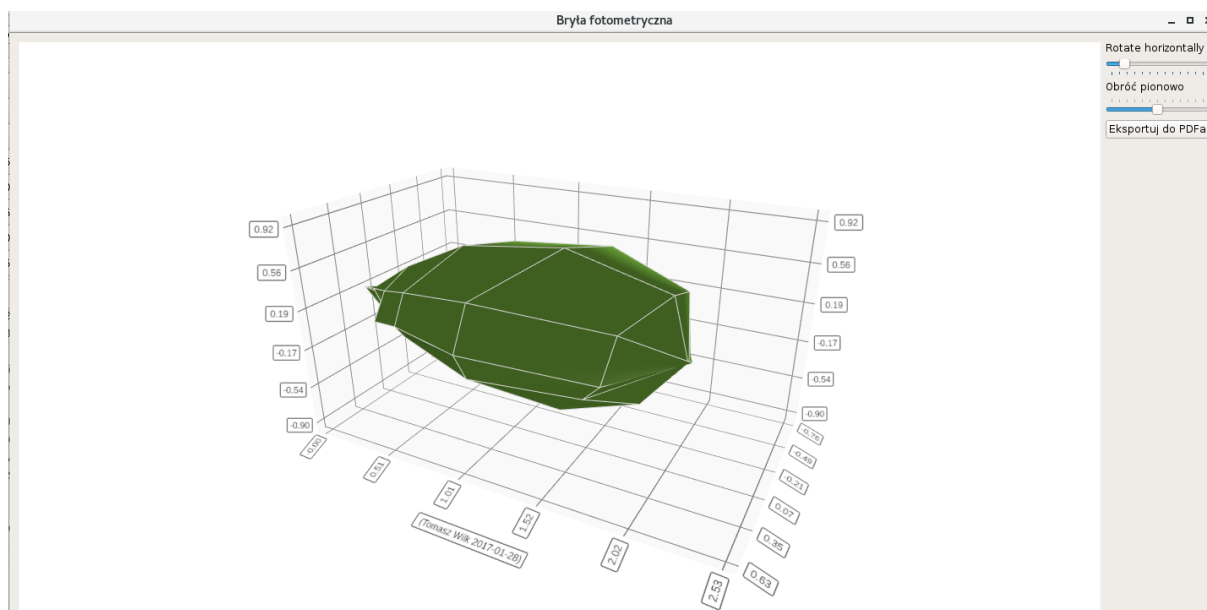
Moduł wylicza całkowity strumień świetlny zgodnie z metodą opisaną w podrozdziale 2.6 biorąc pod uwagę jednostkę natężenia światła ustawioną przez użytkownika we wcześniejszych krokach. Wartość wyświetla się w oknie z możliwością skopiowania jego zawartości (Rys. 13).



Rys. 13. Wartość całkowitego strumienia świetlnego wyliczona przez aplikację

Moduł „Bryła fotometryczna”

Moduł umożliwia wykreślenie bryły fotometrycznej z danych pomiarowych w trójwymiarowym, kartezjańskim układzie współrzędnych (Rysunek 15.) . Student za pomocą suwaków, myszy i przycisków klawiatury, ma możliwość obracania widoku bryły w osi zarówno równoległej jak i prostopadłej do płaszczyzny XY. Po odpowiednim ustawieniu, obraz można zapisać w formacie PDF.



Rys.14. Przykładowa bryła fotometryczna uzyskana z danych wprowadzonych do programu