



**ĆWICZENIE  
70**

**POMIARY FOTOMETRYCZNE**

**Cel ćwiczenia:** pomiar światłości oraz natężenia oświetlenia z zastosowaniem metod fizycznych (część A) i wizualnych (część B); poznanie budowy i zasady działania fotometru Lummera–Brodhuna.

**Zagadnienia:** radiometria a fotometria; podstawowe wielkości fotometryczne i ich jednostki; wizualne i fizyczne metody pomiarów fotometrycznych.

**1 Wprowadzenie**

Zagadnieniem pomiaru energii przenoszonej przez promieniowanie elektromagnetyczne zajmuje się gałąź optyki zwana **radiometrią**. Mierzy ona moc promieniowania źródeł oraz wielkości pochodne. Człowieka najbardziej interesuje fragment tego promieniowania, zwany światłem widzialnym, obejmujący zakres długości fal od 380 do 780 nm. Co więcej – istotna jest nie tyle bezwzględna moc promieniowania, ale raczej wrażenie, jakie wywoła ona w ludzkim oku. Ze względu na kształt krzywej czułości względnej ludzkiego oka istnieje konieczność przeliczenia wielkości radiometrycznych na inne, uwzględniające skuteczność wywoływania wrażeń wzrokowych – i tym zajmuje się kolejna gałąź optyki, **fotometria**.

Podstawową wielkością radiometryczną jest moc promieniowania  $\Phi_P$ , zwana strumieniem energii, wyrażana w watach. Opisuje ona całkowitą ilość energii wypromieniowanej przez źródło w jednostce czasu. Aby lepiej scharakteryzować źródło światła stosuje się wielkości pochodne:

- kierunkowe natężenie (intensywność) źródła promieniowania  $I_P$  (kierunek zwykle określany jest dwoma kątami  $(\varphi, \vartheta)$  układu współrzędnych sferycznych), równe ilorazowi mocy  $d\Phi_P$  przez kąt bryłowy  $d\omega$ , w którym promieniowanie to jest wysyłane:

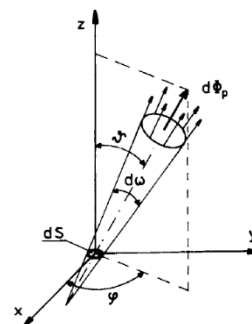
$$I_P(\varphi, \vartheta) = \frac{d\Phi_P(\varphi, \vartheta)}{d\omega} \quad \frac{W}{sr}; \quad (1)$$

- luminancję energetyczną (radiancję)  $L_P$  rozciągłego źródła promieniowania o powierzchni  $S$ , określaną jako stosunek natężenia promieniowania  $I_P(\vartheta)$ , wysyłanego przez elementarną powierzchnię świecąca  $dS$  pod kątem  $\vartheta$  względem normalnej do tej powierzchni, do rzutu powierzchni świecącej  $dS$  na płaszczyznę prostopadłą do rozpatrywanego kierunku  $\vartheta$ :

$$L_P(\varphi, \vartheta) = \frac{dI_P(\vartheta)}{dS \cos \vartheta} = \frac{d\Phi_P(\vartheta)}{d\omega dS \cos \vartheta} \quad \frac{W}{m^2 sr}. \quad (2)$$

Zależności powyższe ilustruje Rys.1.

**Rys.1.** Strumień energii  $d\Phi_P(\vartheta)$  emitowany z powierzchni  $dS$  w kąt bryłowy  $d\omega$

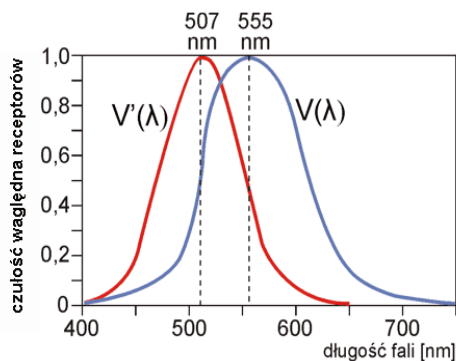


Aby scharakteryzować z kolei ilość światła padającą na odbiornik (detektor, ludzkie oko), wprowadza się wielkość zwaną natężeniem napromienienia (irradiancją)  $E_P$  – jest to stosunek strumienia  $\Phi_P$ , padającego na powierzchnię odbiornika, do wielkości tej powierzchni  $S$ :

$$E_P = \frac{d\Phi_P}{dS} \quad \frac{W}{m^2}. \quad (3)$$

Wielkości stosowane w fotometrii mają podobne nazwy jak ich radiometryczne odpowiedniki. Istnieje więc odpowiednio: strumień świetlny  $\Phi$ , kierunkowe natężenie źródła światła  $I$  (zwane w skrócie światłością) oraz luminancja  $L$  do scharakteryzowania źródła oraz natężenie oświetlenia  $E$ , opisujące ilość światła padającą na odbiornik. Różnica pomiędzy nimi wynika, jak wspomniano wyżej, z faktu, iż oko ludzkie ma różną czułość względną na różne długości fali i

określona wartość energii promieniowania może spowodować różne wrażenie ilości światła w oku, a to nas przecież na co dzień najbardziej interesuje. Czułość ludzkiego oka zależy od warunków oświetlenia i przedstawia ją Rys.2 poniżej.



**Rys.2.** Krzywa czułości względnej ludzkiego oka  $V(\lambda)$  w zależności od warunków oświetlenia: niebieska – oświetlenie dzienne (fotopowe); czerwona – oświetlenie nocne (skotopowe)

W fotometrii, ze względów historycznych, przyjęto jako podstawową dla układu SI jednostkę światłości. Jest nią kandela [cd], która od 1979 roku definiowana jest jako światłość, jaką w danym kierunku ma źródło emitujące promieniowanie monochromatyczne o częstotliwości  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, którego natężenie promieniowania (czyli wielkość radiometryczna) w tym samym kierunku wynosi  $1/683$  W/sr. Za pomocą tej podstawowej wielkości fotometrycznej definiuje się, pośrednio lub bezpośrednio, wszystkie pozostałe. Częstotliwość  $540 \cdot 10^{12}$  Hz odpowiada w próżni długości fali  $\lambda = 555$  nm to jest fali, na którą przypada maksimum czułości oka dla widzenia dziennego. Z tej definicji wynika sposób przeliczania wszystkich wielkości radiometrycznych na fotometryczne: trzeba uwzględnić opisany wyżej przelicznik jednostki radiometrycznej W/sr na kandelę dla „wzorcowej” długości fali  $\lambda = 555$  nm oraz krzywą czułości względnej ludzkiego oka  $V(\lambda)$ . Dlatego, aby policzyć strumień świetlny  $\Phi$  tak, jak odbiera go ludzkie oko, należy strumień energetyczny  $\Phi_p$ , zmierzony dla każdej długości fali świetlnej  $\lambda$ , pomnożyć przez krzywą czułości  $V(\lambda)$ , następnie scałkować po całym zakresie widzialnym 380-780 nm i wymnożyć przez współczynnik przeliczeniowy  $K_m = 673$  lm/W, wynikający z powyższej definicji kandel:

$$\Phi = K_m \int \Phi_p(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

Wynik podawany jest w lumenach [lm] – jednostkach strumienia świetlnego. Ze względu na związek między wielkościami fotometrycznymi, analogicznymi do radiometrycznych, lumen to oczywiście kandela razy steradian [cd·sr] ale nie można porównywać bezpośrednio lumenów z watami – przelicznik zależy od długości fali, jest największy dla  $\lambda = 555$  nm i wynosi właśnie  $K_m = 673$  lm/W. W praktyce całkowanie sprowadza się do sumowania po dyskretnych wartościach długości fali  $\lambda$  co 10 nm, ponieważ z taką dokładnością wyznaczono już w latach 30-tych XX wieku krzywą czułości  $V(\lambda)$ . UWAGA: Nie należy mylić podanego wyżej stosunku lm/W z informacjami, podawanymi przez producentów na opakowaniach źródeł światła – tam podaje się tzw. sprawność świetlną  $\eta$ , czyli stosunek uzyskanej mocy świetlnej (w lumenach) do mocy elektrycznej (w watach), zużywanej przez źródło.

Przez analogię, nie wdając się już w szczegółowe wyjaśnienia, zanotujmy, że jednostką luminancji  $L$  w fotometrii jest nit [nt], równy [cd/m<sup>2</sup>], oraz używany powszechnie stilb [sb], równy [cd/cm<sup>2</sup>] – nit jest po prostu „małą” jednostką i wyniki pomiarów, podawane w nitach, byłyby zapisywane za pomocą zbyt dużych liczb. Jednostką natężenia oświetlenia  $E$  z kolei jest luks [lx] równy [lm/m<sup>2</sup>].

Oprócz podanych zależności definicyjnych, istnieją też inne związki między wielkościami fotometrycznymi, które umożliwiają obliczenie jednych wielkości poprzez pomiar innych. Prawdziwe są one przy pewnych dodatkowych założeniach, które są jednak łatwe do spełnienia w praktyce laboratoryjnej. Jednym z najbardziej znanych praw fotometrii, które znajdzie zastosowanie w proponowanych metodach pomiaru, jest tzw. fotometryczne prawo odległości,

zwane też prawem Lamberta-Beera. Mówi ono, że istnieje prosty związek pomiędzy światłością  $I$  punktowego źródła światła, znajdującego się w odległości  $r$  od detektora, a natężeniem oświetlenia  $E$ , mierzonego na tym detektorze:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad (5)$$

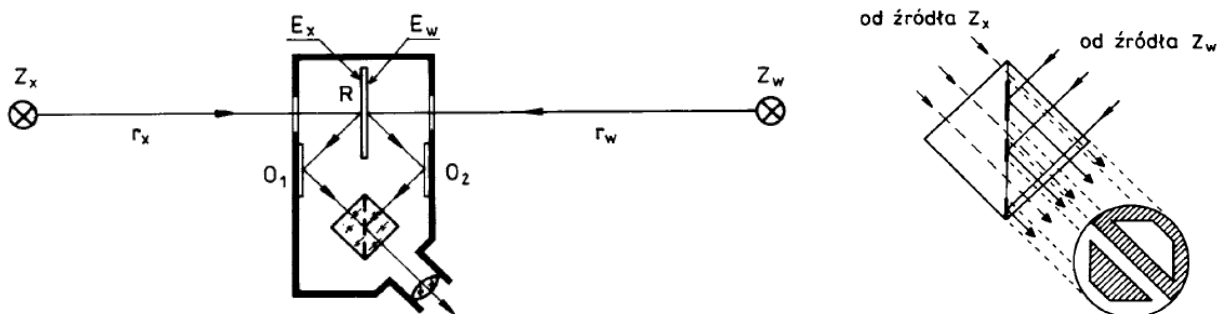
gdzie  $\alpha$  jest kątem, jaki tworzy normalna do płaszczyzny detektora z kierunkiem obserwacji źródła. Powyższe równanie nazywa się też często fotometrycznym prawem odległości. Można je stosować również dla niepunktowych źródeł światła, gdy odległość źródła od oświetlanej powierzchni jest dostatecznie duża w stosunku do wymiarów źródła. Odległość, od której stosuje się fotometryczne prawo odległości nazywa się graniczną odległością fotometryzacji. Nie jest ona wartością stałą, lecz zależy od wymaganej dokładności pomiaru.

## 2 Zasady pomiarów i układy pomiarowe

Wszystkie wielkości fotometryczne można wyznaczać metodami wizualnymi (subiektywnymi), gdy detektorem jest ludzkie oko, bądź fizycznymi (obiektywnymi), gdy jest nim detektor fotoelektryczny. Początkowo fotometria oparta była głównie na obserwacjach wzrokowych. Jednak szybki rozwój techniki i elektroniki spowodował, że metody wizualne coraz częściej zastępowano metodami fizycznymi. W fotometrii fizycznej odbiornikami światła najczęściej są fotokomórki i ogniwa fotoelektryczne, coraz rzadziej fotopowielacze. Metody obiektywne mają w stosunku do metod subiektywnych istotne zalety: lepszą dokładność i powtarzalność pomiaru, większą szybkość pomiaru, możliwość zastosowania urządzeń cyfrowych i rejestrujących. Wymagają co prawda przeliczania wielkości radiometrycznych (które tak naprawdę są mierzone) na fotometryczne ale to również, w dobie mikrokomputerów, przestało być problemem. Innym rozwiązaniem jest stosowanie detektorów, których krzywa czułości jest zbliżona do krzywej czułości ludzkiego oka.

Wielkością, którą mierzy się bezpośrednio w każdym pomiarach fotometrycznych jest natężenie oświetlenia  $E$  – czyli to, co rejestruje detektor. Ze względu na zależności między wielkościami fotometrycznymi często, przy pewnych dodatkowych założeniach ograniczających i dzięki specyficznej technice pomiaru, możemy zmierzyć inne wielkości fotometryczne, jak np. luminancję czy światłość kierunkową. W szczególności wszystkie pomiary wzrokowe oparte są na porównywaniu luminancji dwóch pól oświetlonych porównywanymi promieniowaniami, pochodzącymi z dwóch różnych źródeł. Tę zasadę wykorzystuje się w przyrządach zwanych fotometrami. W ćwiczeniu, realizowanym w naszym Laboratorium, używamy właśnie jednego z takich fotometrów, od nazwiska konstruktorów zwanego fotometrem Lummera-Brodhuna. Warto dodać, że jeden z twórców urządzenia, Otto Lummer, był przed II wojną światową profesorem Uniwersytetu Wrocławskiego.

Na Rys.3 przedstawiono schematycznie fotometr Lummera-Brodhuna. W takim właśnie układzie realizowana będzie część B ćwiczenia. Najważniejszym elementem tego urządzenia jest główca fotometryczna, mogąca przesuwac się na ławie optycznej między dwoma źródłami światła  $Z_w$  i  $Z_x$ , z których pierwsze jest źródłem wzorcowym o znanej światłości  $I_w$ , a drugie źródłem badanym, o nieznannej na razie światłości  $I_x$ .



**Rys.3.** Układ fotometru Lummera-Brodhuna (po lewej) i bieg światła w kostce fotometrycznej (po prawej)

Głowica fotometryczna zawiera płytkę gipsową R rozpraszającą światło, której jedna strona jest oświetlana strumieniem świetlnym emitowanym przez źródło  $Z_w$ , a druga strumieniem pochodzącym od źródła  $Z_x$ . Światło rozproszone na płytce R po odbiciu od zwierciadeł pada na kostkę fotometryczną Lummera-Brodhuna. Kostka ta składa się z dwu równoramiennych pryzmatów prostokątnych, które są sklejone płaszczyznami przeciwprostokątnymi (Rys.3). Na jednej z powierzchni przeciwprostokątnych jest wytrawiony wzorek tak, że powierzchnie te w niektórych miejscach do siebie przylegają, a w pozostałych dzieli je warstwa powietrza. Światło biegnące od źródła  $Z_x$  przechodzi przez kostkę w miejscach styku i dociera do oka obserwatora, natomiast w miejscach wytrawionych, gdzie pryzmaty dzieli warstwa powietrza, ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Podobnie dzieje się ze światłem biegnącym od źródła  $Z_w$ . W tym przypadku do oka dociera światło odbite od tych fragmentów prawej powierzchni przeciwprostokątnej, która nie styka się z odpowiednią powierzchnią lewego pryzmatu. Tak więc część pola widzenia jest oświetlona przez źródło  $Z_w$ , a część przez źródło  $Z_x$ . Dodajmy, że wzór widziany na prawej części Rys.3 odpowiada wzorowi na kostce, którą zobaczymy w ćwiczeniu – w literaturze znajdziemy też inne propozycje wykonania i inne propozycje wzorów.

Metoda pomiaru sprowadza się do tego, aby znaleźć takie położenie głowicy fotometru na ławie optycznej, przy którym całe pole widzenia jest równomiernie oświetlone. Nasze oko porównuje luminancje odpowiednich fragmentów obu stron płytki gipsowej R co, przy założeniu, że współczynnik odbicia obu stron jest stały, oznacza równość natężeń oświetlenia obydwu stron tej płytki:

$$E_x = E_w. \quad (6)$$

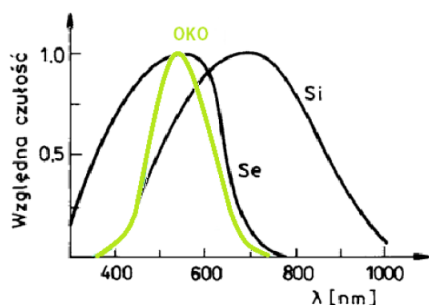
Po dwukrotnym zastosowaniu prawa Lamberta-Beera do obu stron płytki gipsowej i założeniu, że światło pada normalnie na obie strony płytki (to znaczy, kąty  $\alpha$  są równe zeru, patrz równanie 5), możemy ostatecznie otrzymać formułę, która pozwoli na wyznaczenie światłości badanego źródła  $Z_x$ :

$$I_x = I_w \frac{r_x^2}{r_w^2} \quad (7)$$

po zmierzeniu odległości  $r_x$  i  $r_w$  głowicy od obu źródeł.

Opisany powyżej schemat pomiaru jest najprostszym z możliwych – w literaturze można znaleźć inne rozwiązania, na przykład z użyciem dodatkowego źródła porównawczego, ale opis wszystkich stosowanych technik wykracza poza zakres tematyczny wykonywanego ćwiczenia.

We współczesnych pomiarach fotometrycznych coraz częściej stosuje się pomiary fizyczne, oparte o detektory fotoelektryczne. Obecnie, ze względu na prostotę budowy, dostępność i cenę, są to najczęściej półprzewodnikowe ogniwa fotoelektryczne (fotoogniwa). Ich działanie oparte jest na właściwościach złącza metal-półprzewodnik. Strumień światła, docierający do warstwy zaporowej na złączu metal-półprzewodnik, generuje nośniki prądu elektrycznego. Ilość tych nośników jest (w pewnym zakresie) proporcjonalna do padającego na detektor strumienia świetlnego, a więc także do natężenia oświetlenia powierzchni czynnej fotoogniwa. Powstały w wyniku prąd fotoelektryczny zależy od mierzonego natężenia oświetlenia – funkcję, wyrażającą zależność prądu fotoelektrycznego  $i$  od natężenia oświetlenia fotoogniwa  $E$  nazywa się jego charakterystyką świetlną, natomiast stosunek prądu fotoelektrycznego  $i$  do strumienia świetlnego  $\Phi$  określa się mianem czułości fotoogniwa. Charakterystyczną cechą omawianych tu detektorów jest silna zależność ich czułości od składu widmowego światła (Rys.4). W szczególności, fotoogniwa selenowe wyróżniają się tym, że ich czułość spektralna jest nieco zbliżona do skuteczności widmowej oka, wyrażonej funkcją  $V(\lambda)$ .

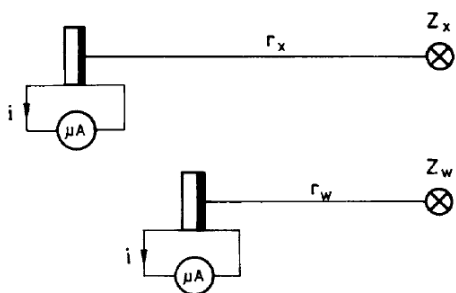


**Rys.4.** Charakterystyki widmowe fotoogniw selenowego i krzemowego a krzywa czułości względnej ludzkiego oka  $V(\lambda)$  (zielona)

Odstępstwo charakterystyk widmowych detektorów od krzywej czułości ludzkiego oka może być problemem zwłaszcza, jeżeli mierzymy źródła, których charakterystyki spektralne promieniowania mocno się różnią od charakterystyki źródła wzorcowego. Jeżeli natomiast źródło wzorcowe i badane mają podobne charakterystyki spektralne (na przykład oba źródła to żarówki wolframowe tyle, że o różnych mocach) to jedynym problemem mogłaby być nieliniowość charakterystyki świetlnej (czyli zależności  $i=f(E)$ ). Można oczywiście wyznaczyć wspomnianą charakterystykę  $i=f(E)$  używanego detektora doświadczalnie i używać dalej tej charakterystyki do wyznaczania nieznanych natężeń oświetlenia  $E$  – jest to tzw. metoda odchyłowa. Innym podejściem jest metoda zrównania – polega ona na takiej konfiguracji układu pomiarowego, aby prąd  $i$  miał tę samą wartość przy oświetleniu detektora źródłem wzorcowym i badanym, co oznacza te same wartości mierzonego natężenia oświetlenia  $E$  i w efekcie umożliwia wyznaczenie innych wielkości fotometrycznych, opisujących źródło. I tak na przykład, można wyznaczyć światłość kierunkową nieznanego źródła wykorzystując fotometryczne prawo odległości, ustawiając detektor kolejno w pewnej odległości  $r_x$  od źródła badanego  $Z_x$  a następnie  $r_w$  od źródła wzorcowego  $Z_w$  tak, aby miernik podłączony do detektora wskazywał te same wartości prądu fotoelektrycznego  $i$  (Rys.5). Wtedy również wartości natężeń oświetlenia  $E$  są w obu przypadkach równe i, z prawa Lamberta-Beera, mamy:

$$\frac{I_x}{r_x^2} = \frac{I_w}{r_w^2} \quad (8)$$

(zakładamy, że kąt padania światła na powierzchnię detektora jest ten sam).



**Rys.5.** Zasada pomiaru światłości kierunkowej źródła  $Z_x$  metodą zrównania przy pomocy detektora fotoelektrycznego

Równanie (8) umożliwia wyznaczenie nieznannej światłości  $I_x$  na podstawie znanej światłości wzorcowej  $I_w$  oraz zmierzonych odległości  $r_x$  i  $r_w$ . W części A ćwiczenia wykonujemy pomiary w układzie detektora fizycznego – jest nim w naszym przypadku fotoogniwo selenowe.

### 3 Zadania do wykonania

#### A) Pomiary:

Część A (pomiary fizyczne przy wykorzystaniu fotoogniwa selenowego):

- a) Wyznaczenie zależności natężenia oświetlenia  $E$  od odległości  $r$  między fotoogniwem a źródłem światła;

- b) Wyznaczenie zależności natężenia oświetlenia  $E$  od kąta padania  $\alpha$  światła na powierzchnię fotoogniwa;
- c) Pomiar przepuszczalności filtrów szarych;
- d) Wyznaczenie światłości  $I$  źródła światła oraz sprawności świetlnej  $\eta$  żarówki w zależności od pobieranej mocy  $P$ .

Część B (fotometria wizualna przy wykorzystaniu układu fotometru Lummera-Brodhuna):

- a) Wyznaczenie światłości (natężenia źródła światła) kilku badanych żarówek o różnej mocy przy wykorzystaniu wzorcowego źródła o znanej światłości;
- b) Pomiar przepuszczalności filtrów szarych;
- c) Zbadanie rozkładu kierunkowego światłości wybranej żarówki.

**B) Opracowanie wyników:**

Część A (pomiar fizyczny przy wykorzystaniu fotoogniwa selenowego):

- a) Na podstawie prawa Lamberta-Beera wyliczyć natężenie oświetlenia  $E$  i obliczyć niepewność jego wyznaczenia; przedstawić na wykresie zależność fotoprądu od natężenia oświetlenia:  $i=f(E)$ , nanieść prostokąty niepewności pomiarowych;
- b) Analogicznie do części a);
- c) Obliczyć przepuszczalności filtrów szarych jako stosunki wartości fotoprądu odpowiadającego natężeniom oświetlenia powierzchni detektora bezpośrednio przez wzorcową lampę oraz poprzez badany filtr, wyznaczyć niepewność pomiaru;
- d) Obliczyć wartość mocy elektrycznej, pobieranej przez źródło, na podstawie zmierzonych wartości napięcia przyłożonego do żarówki oraz natężenia prądu, płynącego przez nią; dla założonej stałej wartości natężenia oświetlenia  $E$  wyznaczyć światłość  $I$  źródła (wykorzystując równanie (8)), sporządzić wykres  $i=f(P)$ ; wyznaczyć współczynnik sprawności świetlnej  $\eta$  żarówki, sporządzić wykres  $\eta=f(P)$ .

Część B (fotometria wizualna przy wykorzystaniu układu fotometru Lummera-Brodhuna):

- a) Obliczyć światłość każdej żarówki wykorzystując zależność (7) oraz niepewność pomiaru światłości;
- b) Obliczyć współczynnik przepuszczalności (transmisji) filtrów oraz niepewność wyznaczenia tej wielkości;
- c) Obliczyć światłość kierunkową dla wszystkich ustawień żarówki (kątown  $\alpha$ ), wykonać wykres zależności  $I=f(\alpha)$  we współrzędnych biegunowych.

**4 Pytania:**

1. Czym zajmuje się radiometria a czym fotometria?
2. Wymień i zdefiniuj podstawowe wielkości radiometryczne, charakteryzujące źródło promieniowania.
3. Wymień i zdefiniuj podstawowe wielkości fotometryczne, charakteryzujące źródło światła.
4. Jak brzmi fotometryczne prawo odległości, jakie są warunki stosowalności tego prawa?
5. Jakich detektorów używa się w fotometrii fizycznej? Jakie są ich podstawowe parametry?
6. Jakie metody pomiarowe stosuje się w fotometrii fizycznej?

opracował Władysław Artur Woźniak