

Wyznaczanie współczynnika sprawności świetlnej źródła światła

Wymagania do ćwiczenia

1. Światło jako fala elektromagnetyczna.
2. Fotometria.
3. Energia fali elektromagnetycznej.

Literatura

1. S. Szczeniowski, *Fizyka doświadczalna*, PWN, Warszawa 19801, str. 202-205,
2. S. Pieńkowski: *Fizyka doświadczalna optyka*, Warszawa 1955, PWN, str. 437-442.
3. OpenStax, Fizyka dla szkół wyższych. [Tom 2, Rozdział 16: Fale elektromagnetyczne.](#)

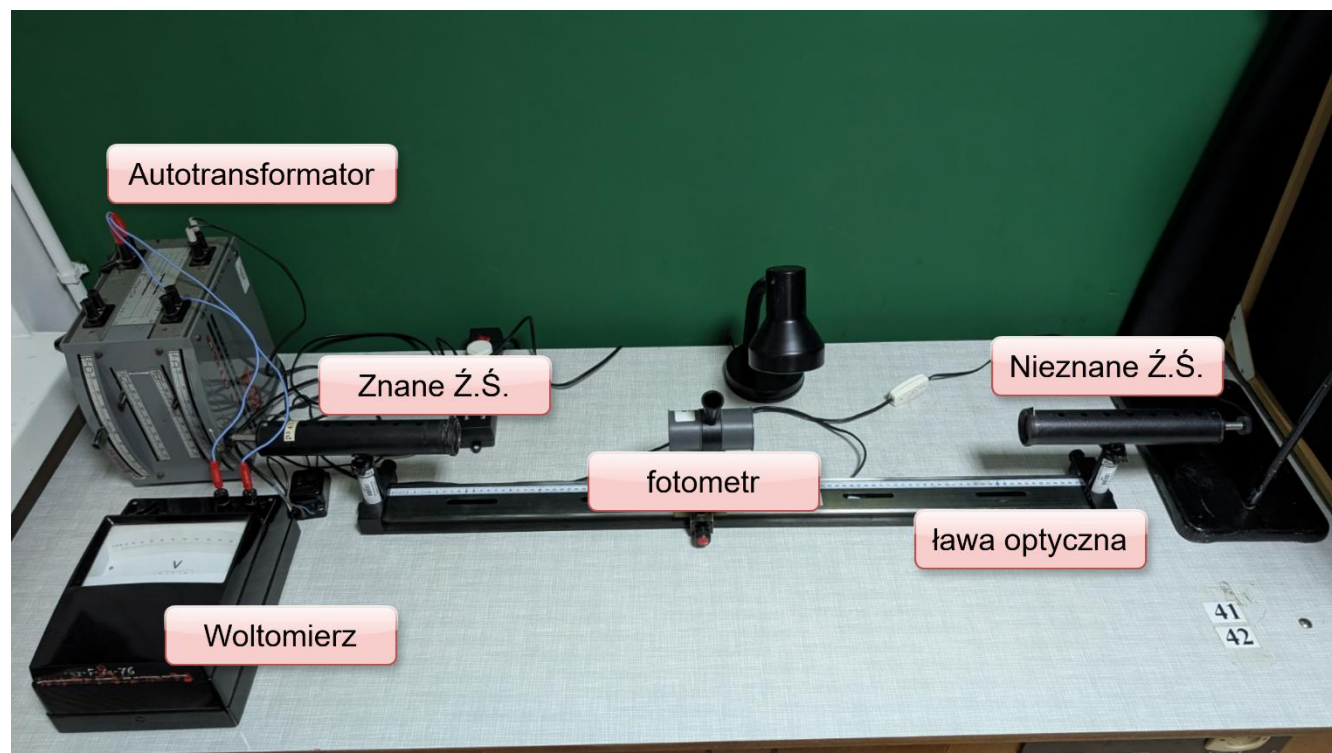
Przykładowe pytania

1. Co nazywamy falą elektromagnetyczną?
2. Proszę omówić wielkości charakteryzujące falę elektromagnetyczną.
3. W jaki sposób fale elektromagnetyczne przenoszą energię?
4. Co nazywamy światłem?
5. Co to jest strumień światła i jaką ma jednostkę?
6. Co to jest natężenie światła i jaką ma jednostkę?
7. Co to jest współczynnik sprawności świetlnej źródła i jaką ma jednostkę?
8. Proszę omówić pojęcie wrażliwości widmowej oka i podać jej jednostkę.
9. Proszę omówić pojęcie maksymalnej wrażliwości widmowej oka i podać jej jednostkę.
10. Co to jest względna wrażliwość oka?
11. Co to jest moc promieniowania źródła i moc promieniowania widzialnego?
12. Co to jest współczynnik sprawności energetycznej źródła?

13. Co nazywamy współczynnikiem wydajności wizualnej źródła?
14. Jak zbudowany jest fotometr?
15. Proszę omówić zasadę działania fotometru.

Przyrządy pomiarowe

Fotometr, woltomierz, żarówka wzorcowa, żarówka badana, transformator.



WPROWADZENIE DO TEMATYKI ĆWICZENIA

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy zapoznać się z instrukcją do ćwiczenia „Wyznaczanie natężenia nieznanego źródła światła z pomocą fotometru”.



Współczynnik sprawności świetlnej źródła światła.

Stosunek strumienia świetlnego Φ do mocy P pobranej przez źródło światła nazywamy współczynnikiem sprawności świetlnej źródła wyrażaną w lm/W:

$$\eta = \frac{\Phi}{P} = \frac{4\pi I}{P}, \quad (1)$$

gdzie: I – światłość źródła światła. Współczynnik sprawności η ma stałą wartość dla danego promieniowania.

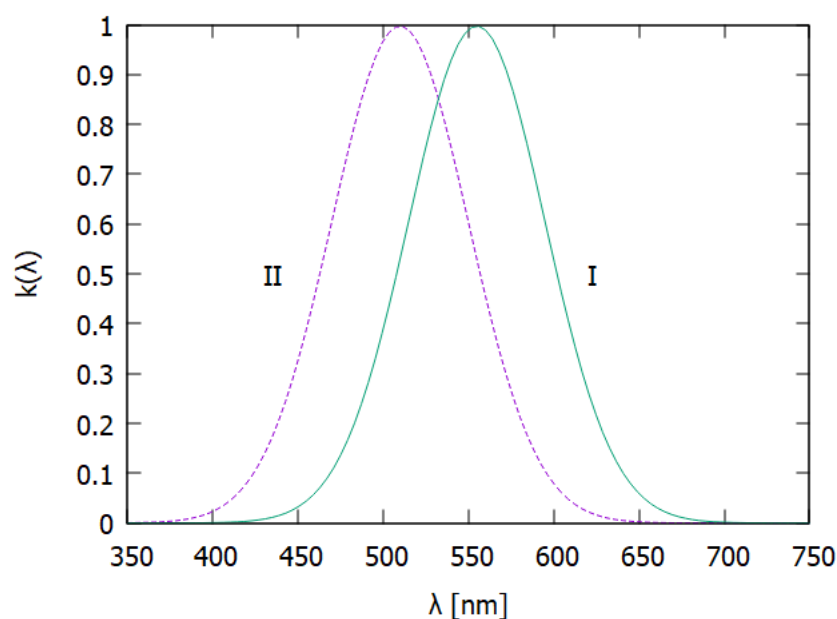
Okazuje się, że wrażliwość oka zależna jest od długości światła.

Względną wrażliwość widmową oka $k(\lambda)$, definiujemy się jako:

$$k(\lambda) = \frac{w(\lambda)}{w_{\max}} \cdot 100\%,$$

Gdzie $w(\lambda)$ – wrażliwość widmowa oka na promieniowanie o długości fali λ , $w_{\max}$ – maksymalna wrażliwość widmowa oka.

Krzywą wrażliwości widmowej oka $k(\lambda)$ w zależności od λ przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Krzywa względnej wrażliwości widmowej oka

Maksimum wrażliwości widmowej oka przypada na światło o długości fali 555nm , a więc w części żółtej widma (krzywa I). Tego rodzaju przebieg wrażliwości otrzymujemy dla oka adoptowanego na światło dzienne. Oko adoptowane na ciemność wykazuje nieco inną wrażliwość, maksimum występuje dla $\lambda = 510\text{ nm}$ (krzywa II). Jak wiadomo obraz tworzony przez układ optyczny oka powstaje na siatkówce, składającej się ze światłoczułych zakończeń nerwu wzrokowego, zwanych czopkami i pręcikami, które stanowią w układzie optycznym oka jego ekran. Wrażliwość na światło nie jest na całej siatkówce jednakowa. Największa jest tam, gdzie jest największe zagęszczenie czopków (żółta plamka). Pręciki są nawet bardziej wrażliwe na światło niż czopki, nie dają jednak wrażenia barwnych. Dzienna krzywa wrażliwości jest to krzywa wrażliwości czopków, krzywa nocna charakteryzuje zachowanie się pręcików. Maksimum natężenia w widmie światła słonecznego odpowiada długości fali niewiele mniejszej od długości charakteryzującej maksimum wrażliwości oka. Maksymalnej wrażliwości widmowej dziennej oka odpowiada największy współczynnik sprawności świetlnej $W_{max} = 680 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$.



Współczynniki sprawności energetycznej źródła

Rozważmy źródło wysyłające ciągłe promieniowanie elektromagnetyczne, przy czym pewną część tego promieniowania stanowią fale widzialne. Niech moc promieniowania badanego źródła światła w zakresie długości od λ do $\lambda + d\lambda$ będzie równa $e(\lambda)d\lambda$, wówczas całkowita moc promieniowania w całym zakresie długości

$$E = \int_0^{\infty} e(\lambda)d\lambda,$$

gdzie $e(\lambda)$ jest mocą promieniowania przypadającą na długość fali λ . Moc promieniowania widzialnego:

$$E' = \int_{0,38\mu\text{m}}^{0,78\mu\text{m}} e(\lambda)d\lambda.$$

Współczynnik sprawności energetycznej źródła definiujemy jako

$$\eta_{\text{en}} = \frac{E'}{E} = \frac{\int_{0,38\mu\text{m}}^{0,78\mu\text{m}} e(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} e(\lambda)d\lambda}. \quad (2)$$

Źródła światła o jednakowej wydajności energetycznej nie są równoważne pod względem wydajności wizualnej, gdyż np. źródło wysyłające promieniowanie odpowiadające barwie żółtej wywoła dla oka w tych samych warunkach energetycznych wrażenie większej jasności niż źródło wysyłające promieniowanie

odpowiadające barwie czerwonej. W celu uwzględnienia tego faktu określamy współczynnik wydajności wizualnej źródła dla promieniowania przy pomocy wyrażenia:

$$\eta_{\text{wiz}} = \frac{\int_{0,38\mu\text{m}}^{0,78\mu\text{m}} k(\lambda)e(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty e(\lambda)d\lambda} \quad (3)$$

Współczynniki wydajności wizualnej najlepszych termicznych źródeł światła używanych w praktyce sięgają zaledwie 0,12.



Wyznaczenie światłości badanego źródła światła

Ze znajomości światłości wzorcowego źródła światła I_w oraz odległości fotometru od wzorcowego źródła światła r_1 i odległości fotometru od badanego źródła światła r_2 wyliczyć można nieznaną wartość światłości źródła światła I_b .

Zgodnie ze wzorem na natężenie oświetlenia danej powierzchni $E = I/r^2$ otrzymujemy:

$$E_w = \frac{I_w}{r_1^2} \quad \text{oraz} \quad E_b = \frac{I_b}{r_2^2}$$

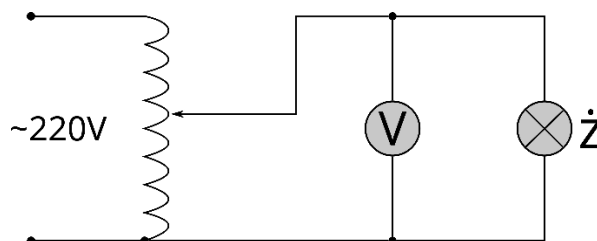
Z równości oświetleń $E_w = E_b$ wynika:

$$I_b = I_w \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (4)$$



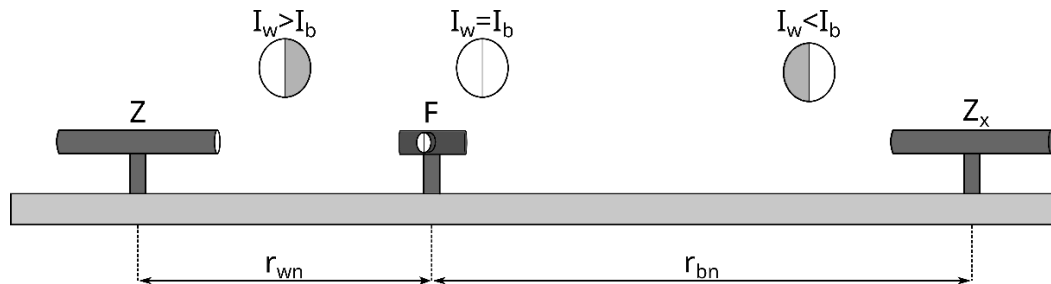
Metodologia wykonania pomiarów:

1. Połączyć obwód według schematu.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego napięcia zasilającego żarówkę badaną

2. Ustawić na ławie obydwie żarówki (wzorcową Z i badaną Z_x) oraz fotometr F . Zmierzyć odległość l między źródłami. Odległość tę mierzymy pomiędzy otworami obu źródeł. Zapisać ją w tabeli, razem ze światłością $I_w = 19 \text{ cd}$ wzorcowego źródła światła. Zanotować wielkość działki elementarnej na skali woltomierza.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego światłości badanej żarówki

3. Postępując się autotransformatorem ustawić napięcie zasilające żarówkę badaną na $U = 100 \text{ V}$.
4. Ustawić fotometr w takim położeniu, aby oświetlenie jego obu połówek było jednakowe. Odczytać odległość fotometru od wzorcowego źródła światła r_1 i odległość fotometru od żarówki badanej r_2 . Wyniki zapisać w tabeli.
5. Przesunąć fotometr w dowolne inne położenie, a potem powtórzyć – łącznie 10 razy – pomiary z punktu 4.
6. Przeprowadzić pomiary z punktów 3,4,5 dla kolejnych napięć, zmieniając je co 20 V do wartości 200 V .
7. Przeprowadzić pomiary z punktów 3,4,5 dla kolejnych napięć, zmieniając je co 20 V od 110 V do 190 V . Jeżeli zabraknie czasu, przerwać pomiary z tego punktu.



Tabela pomiarowa

I_w [cd]	l [cm]		U [V]	r_1 [cm]	r_2 [cm]		U [V]	r_1 [cm]	r_2 [cm]
19									



Obliczenia

1. Dla każdego napięcia obliczyć średnie odległości $\bar{r}_1$ i $\bar{r}_2$ na podstawie $n = 10$ pomiarów. Niepewności $u(\bar{r}_1)$ obliczyć metodą typu A dla każdego napięcia osobno na podstawie 10 wyników r_1 ($u(\bar{r}_2)$ nie liczyć)
2. Obliczyć niepewności $u(U)$ i $u(l)$ metodą typu B.
3. Dla każdej wartości napięcia obliczyć światłość badanego źródła światła I_b z zależności (4).
4. Obliczyć niepewności $u(I_b)$ metodą przenoszenia niepewności dla każdej wartości napięcia U . Jednak ponieważ mierzone wielkości r_1 i r_2 są skorelowane (dodatni błąd popełniony przy danym ustawieniu r_1 fotometru powoduje ujemny błąd dla r_2), to do obliczenia pochodnych w niepewności złożonej $u(I_b)$ wykorzystać fakt, że $r_2 = l - r_1$, gdzie l i r_1 są nieskorelowane, co daje:

$$I_b = I_w \frac{(l - \bar{r}_1)^2}{\bar{r}_1^2}, \quad u(I_b) = \sqrt{\left[\frac{\partial I_b}{\partial \bar{r}_1} u(\bar{r}_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial I_b}{\partial l} u(l) \right]^2}$$

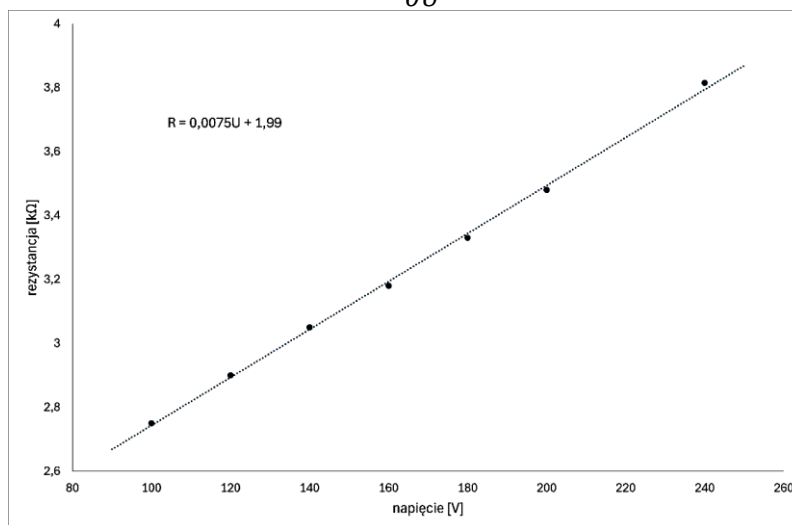
Wyznaczyć i podać wyrażenia na powyższe pochodne.

5. Znaleźć wartości rezystancji żarówki R odpowiadające każdej wartości napięcia U . Można ją wyznaczyć z wykresu (rys. 4), jednak dokładniej można ją obliczyć za pomocą zależności odpowiadającej temu wykresowi

$$R = 1990 + 7.5 \cdot U$$

Obliczyć niepewność $u(R)$ metodą przenoszenia niepewności:

$$u(R) = \frac{\partial R}{\partial U} u(U)$$



Rys. 4. Zależność rezystancji żarówki od napięcia zasilającego

6. Korzystając z zależności $P = \frac{U^2}{R}$ obliczyć moc prądu P wydzielaną w żarówce dla każdej wartości napięcia U . Wartość rezystancji żarówki wyznaczyć na podstawie wykresu (rys. 2).
7. Obliczyć niepewności $u(P)$ dla każdej wartości napięcia metodą przenoszenia niepewności:

$$u(P) = \sqrt{\left[\frac{\partial P}{\partial U} u(U)\right]^2 + \left[\frac{\partial P}{\partial R} u(R)\right]^2}$$

Wyznaczyć i podać wyrażenia na powyższe pochodne.

8. Obliczyć współczynnik wydajności świetlnej η dla badanej żarówki z zależności (1) dla każdego napięcia.
9. Obliczyć niepewność współczynnika wydajności świetlnej $u(\eta)$ korzystając z prawa przenoszenia niepewności:

$$u(\eta) = \sqrt{\left[\frac{\partial \eta}{\partial I} u(I)\right]^2 + \left[\frac{\partial \eta}{\partial P} u(P)\right]^2}$$

Wyznaczyć i podać wyrażenia na powyższe pochodne.

10. Wyniki obliczeń podać w tabeli obliczeniowej (niżej). Wykreślić zależność $\eta(P)$ współczynnika wydajności świetlnej od mocy pobieranej przez żarówkę. Na wykresie zaznaczyć niepewności $u(\eta)$ i $u(P)$.

We wnioskach przede wszystkim zapisać poprawnie ostateczne wyniki pomiarów z niepewnościami.

Obliczenia nadobowiązkowe – dokładniejsze obliczenie niepewności $u(P)$ z punktu 7:

11. Błędy pomiarowe napięcia są skorelowane z błędami oporu, bo opór R wyznacza się z napięcia U . Dlatego niepewność $u(P)$ nie można wyznaczyć ze zwykłego prawa przenoszenia niepewności dzięki $u(U)$ i $u(R)$, bezpośrednio bazując na wzorze $P = U^2/R$. Jednak gdy do tego wzoru wstawimy zależność oporu od napięcia $R = 1990 + 7.5 \cdot U$ obowiązującą dla badanej żarówki, to tak otrzymany wzór może być podstawą do obliczenia niepewności $u(P)$ z niepewności $u(U)$ zwykłą metodą przenoszenia niepewności. Tak obliczone niepewności $u(P)$, a potem $u(\eta)$ (dla każdego U) zaleca się porównać z tymi wyznaczonymi według punktów 7 i 9.



Tabela obliczeniowa

U [V]	$u(U)$ [V]	$u(\bar{r}_1)$ [cm]	I_b [cd]	$u(I_b)$ [cd]	R [Ω]	$u(R)$ [Ω]	P [W]	$u(P)$ [W]	η [lm/W]	$u(\eta)$ [lm/W]