
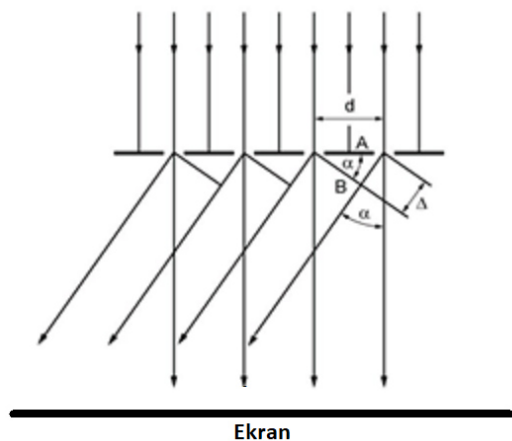
 <b>POLITECHNIKA OPOLSKA</b>	KATEDRA FIZYKI	
	LABORATORIUM FIZYKI	
<b>WYZNACZANIE DŁUGOŚCI FALI ŚWIETLNEJ ZA POMOCĄ SIATKI DYFRAKCYJNEJ</b>		

## WSTĘP

Fale świetlne (często w skrócie zwane światłem), będące widzialną częścią widma promieniowania elektromagnetycznego, związane są z rozchodzeniem się w przestrzeni zmiennego pola elektrycznego i magnetycznego, przy czym wektor natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  jest zawsze prostopadły do wektora natężenia pola magnetycznego  $\vec{H}$ . Kierunki drgań wektorów  $\vec{E}$  i  $\vec{H}$  są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali, tak więc fala świetlna jest falą poprzeczną. W ośrodkach jednorodnych fale elektromagnetyczne rozchodzą się prostoliniowo. Jeżeli jednak światło przechodzi przez niewielkie szczeliny lub otwory o rozmiarach porównywalnych z długością fali, obserwujemy odchylenie od prostoliniowości, czyli tzw. ugięcie światła. Zjawisko ugięcia (dyfrakcji) światła można wyjaśnić w oparciu o zasadę Huyghensa, głoszącą, że każdy punkt do którego dotrze zaburzenie (fala) staje się źródłem nowej fali cząstkowej. Wypadkowe zaburzenie rozchodzące się w ośrodku jest sumą wszystkich fal cząstkowych.

Bardzo małe wartości długości widzialnych fal świetlnych sprawiają, że w życiu codziennym bardzo rzadko obserwujemy efekty dyfrakcji światła. W laboratoriach zjawisko dyfrakcji w połączeniu ze zjawiskiem interferencji znalazło zastosowanie przy wyznaczaniu długości fal świetlnych. Najprostszym przyrządem służącym do tego celu jest siatka dyfrakcyjna, czyli szereg równomiernie rozmieszczonych szczelin wytworzonych w nieprzeźroczystym materiale. Średnią odległość pomiędzy środkami dwu sąsiednich szczelin nazywamy stałą siatki i zwykle oznaczamy symbolem  $d$ . Przejście światła przez siatkę dyfrakcyjną skutkuje powstaniem na ekranie jej obrazu dyfrakcyjnego. Obraz siatki stanowi szereg jasnych prążków rozdzielonych ciemnymi obszarami.



**Rys. 1.** Dyfrakcja i interferencja promieni światła po przejściu przez siatkę dyfrakcyjną.

Niech na powierzchnię siatki dyfrakcyjnej o stałą  $d$  pada prostopadle strumień światła monochromatycznego o długości fali  $\lambda$ , Rys. 1. Powstanie jasnych prążków na ekranie wynika z interferencyjnego wzmocnienia ugiętych pod tym samym kątem  $\alpha$  promieni pochodzących z sąsiednich szczelin siatki. Dla każdego dwóch promieni wychodzących z sąsiednich szczelin różnica ich dróg optycznych  $\Delta$  wynosi (1):

$$\Delta = d \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

Warunkiem uzyskania maksymalnego efektu wzmocnienia interferencyjnego jest, aby różnica dróg optycznych interferujących promieni była równa wielokrotności długości fali.

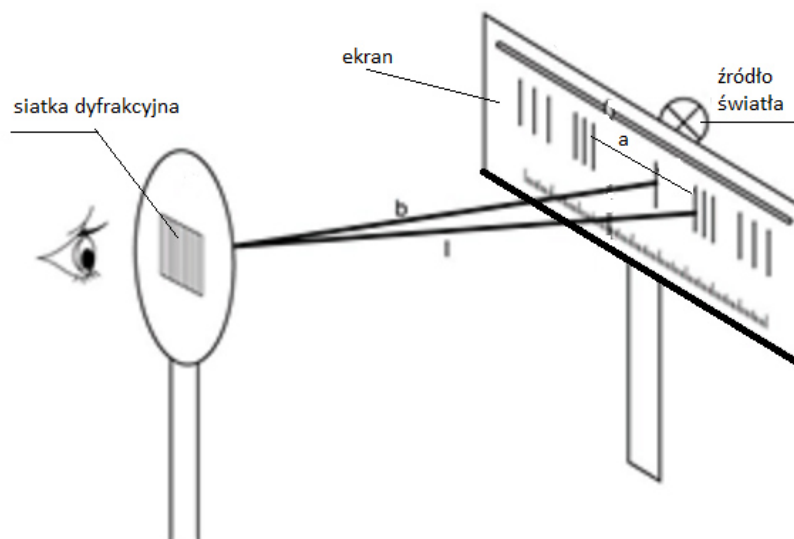
$$\Delta = n \cdot \lambda \quad (2)$$

We wzorze (2) wartościami parametru  $n$  są kolejne liczby całkowite:  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  Łącząc (1) i (2) otrzymujemy wzór (3) pozwalający wyznaczać wartości kątów odchylenia  $\alpha_n$  od pierwotnego kierunku promienia padającego na powierzchnię siatki promieni, dla których wzmocnienie interferencyjne wywołało maksymalny efekt w postaci jasnego prążka na ekranie:

$$d \cdot \sin \alpha_n = n \cdot \lambda \quad (3)$$

Związane z wartością  $n = 0$  miejsce pojawienia się na ekranie jasnego prążka (tzw. prążka „zerowego”) leży na kierunku wiązki światła padającego na powierzchnię siatki. Dla  $n = \pm 1$  na ekranie obserwuje się pierwsze prążki dyfrakcyjne pod kątami  $\pm \alpha_1$ , dla  $n = \pm 2$  – drugie prążki, itd.

## OPIS UKŁADU POMIAROWEGO



Rys. 2. Układ pomiarowy z siatką dyfrakcyjną, szczeliną i źródłem światła.

Na układ pomiarowy (Rys. 2.) składają się z:

- dwóch źródeł światła (1): pełniące rolę wzorca długości fali lampy sodowej emitującej światło monochromatyczne o dobrze znanej długości, oraz lampa mikroskopowa,
- siatki dyfrakcyjnej (2),
- kompletu filtrów interferencyjnych przepuszczających światło z zakresu wąskiego pasma długości fal,
- ekranu ze wąską szczeliną w środku (3), wyposażonego w skalę z podziałką milimetrową służącą do odczytywania położeń prążków.

Światło lampy sodowej lub przechodzące przez filtr światło lampy mikroskopowej po przejściu przez szczelinę pada na siatkę dyfrakcyjną. Obserwacja ekranu przez siatkę dyfrakcyjną umożliwia zauważenie na nim obrazu szeregu prążków dyfrakcyjnych po obu stronach szczeliny. Jest to obraz pozorny powstający na siatkówce oka obserwatora. Dochowując warunki: ustawienia w jednej osi optycznej źródła światła, szczeliny ekranu i siatki dyfrakcyjnej, oraz prostokątności głównych płaszczyzn ekranu i siatki do osi optycznej, uzyskamy efekt równych odległości od szczeliny prążków dyfrakcyjnych tego samego rzędu.

Kąt  $\alpha_n$  pod którym na ekranie widoczny jest  $n$ -ty prążek (3) można wyrazić następująco:

$$\sin \alpha_n = \frac{n \cdot \lambda}{a} \quad (4)$$

Oznaczając symbolem  $l_n$  odległość  $n$ -tego prążka dyfrakcyjnego od siatki dyfrakcyjnej, a przez  $a_n$  odległość tego prążka od szczeliny, kąt z zależności (4) możemy obliczyć korzystając zależności trygonometrycznej:

$$\sin \alpha_n = \frac{a_n}{l_n} \quad (5)$$

Przyjmując symbol  $b$  do oznaczenia odległości siatki dyfrakcyjnej od ekranu, z twierdzenia Pitagorasa otrzymujemy:

$$l_n = \sqrt{a_n^2 + b^2} \quad (6)$$

Łącząc wzory (4), (5) i (6) otrzymujemy:

$$\lambda = \frac{d \cdot a_n}{n \cdot \sqrt{a_n^2 + b^2}} \quad (7)$$

Zależność (7) zostanie wykorzystana w ćwiczeniu w którym na podstawie obserwacji prążków dyfrakcyjnych i pomiarów wielkości  $a$  i  $b$  zostaną wyznaczone wartości:

- a) stałej siatki dyfrakcyjnej  $d$  w przypadku użycia lampy sodowej, emitującej światło o średniej wartości długości fali  $\lambda_{Na} = 589,28 \text{ [nm]}$ ,  $u(\lambda_{Na}) = 0,37 \text{ [nm]}$ ,
- b) długości fali  $\lambda$  światła przepuszczanego przez filtr interferencyjny, na podstawie wartości  $d$  wyznaczonej w punkcie a).

## WYKONANIE POMIARÓW

1. Jeżeli konieczne, dokonać korekty równoległości ustawienia płaszczyzny siatki dyfrakcyjnej względem ekranu.
2. Zmierzyć odległość  $b$  siatki od ekranu.
3. Włączyć lampę sodową. Odczekać na ustabilizowanie jej świecenia – ok. 5 min. Po tym czasie muszą być wyraźnie widoczne trzy rzędy prążków dyfrakcyjnych o intensywnej żółtej barwie. Możliwa jest także obserwacja słabych prążków o innych barwach, które należy zignorować, ponieważ są skutkiem obecności w lampie śladowych ilości pierwiastków zanieczyszczeń produkcyjnych.
4. Z użyciem liniału lub skali ekranu odczytać położenia prążków w lewej ( $a_{nL}$ ) i prawej ( $a_{nP}$ ) części ekranu.
5. Oszacować niepewności wzorcowania i eksperymentatora pomiarów bezpośrednich.
6. Wyniki zapisać w Tabeli Pomiarów 1.
7. Wyłączyć lampę sodową. Na jej miejsce postawić lampę mikroskopową, włączyć ją. W widocznym przed szczeliną łożu umieścić pierwszy z filtrów.
8. Dla każdego z filtrów wykonać pomiary zgodnie z pkt. 4-6. Wyniki zapisać w Tabeli Pomiarów 2.

TABELA POMIARÓW 1 – światło lampy sodowej

b	$\Delta_e(b)$	n	$a_{nL}$	$\Delta_e(a_{nL})$	$a_{nP}$	$\Delta_e(a_{nP})$
[mm]	[mm]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
		1				
		2				
		3				

$$\Delta_d(b) = \Delta_d(a_{nL}) = \Delta_d(a_{nP}) =$$

TABELA POMIARÓW 2 – światło filtrowane

filtr	barwa prążków	n	$a_{nL}$	$\Delta_e(a_{nL})$	$a_{nP}$	$\Delta_e(a_{nP})$
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1		1				
		2				
		3				
2		1				
		2				
		3				
3		1				
		2				
		3				

*Z obudów filtrów przepisać widoczne tam parametry.  
Można je wykorzystać do późniejszego wnioskowania po wykonaniu opracowania.*

## WYKONANIE OBLICZEŃ

1. Dla pomiaru odległości  $b$  i położenia  $a_{nL}$  (lub  $a_{nP}$ ) dowolnego z prążków wykonać przykłady oszacowania rozszerzonej ( $k = 2$ ) całkowitej wartości niepewności pomiaru bezpośredniego, np.  $U(a_{nL})$ ,  $U(b)$ :

$$U(a_{nL}) = k \cdot u(a_{nL}) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(a_{nL}))^2 + (\Delta_e(a_{nL}))^2}{3}} \quad (8)$$

$$U(b) = k \cdot u(b) = k \cdot \sqrt{\frac{(\Delta_d(b))^2 + (\Delta_e(b))^2}{3}}$$

2. Dla jednej pary prążków wykonać przykład obliczenia średniej wartości ich odległości  $a_n$  od szczeliny:

$$a_n = \frac{|a_{nL} - a_{nP}|}{2} \quad (9)$$

3. Oszacować wartość niepewności  $U(a_n)$ :

$$U(a_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial a_n}{\partial a_{nL}} \cdot U(a_{nL})\right)^2 + \left(\frac{\partial a_n}{\partial a_{nP}} \cdot U(a_{nP})\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{2} \cdot U(a_{nL})\right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \cdot U(a_{nP})\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{(U(a_{nL}))^2 + (U(a_{nP}))^2} \quad (10)$$

4. Wykonać pozostałe obliczenia i zapisać otrzymane wartości w Tabelach Wyników:

TABELA WYNIKÓW 1 – światło lampy sodowej

b	U(b)	n	a <sub>n</sub>	U(a <sub>n</sub> )
[mm]	[mm]		[mm]	[mm]
		1		
		2		
		3		

TABELA WYNIKÓW 2 – światło filtrowane

filtr	n	a <sub>n</sub>	U(a <sub>n</sub> )
		[mm]	[mm]
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		

5. Korzystając z danych Tabeli Wyników 1 wykonać przykład obliczenia stałej  $d$  siatki dyfrakcyjnej:

$$d = \frac{n \cdot \lambda_{Na} \cdot \sqrt{a_n^2 + b^2}}{a_n} \quad (11)$$

6. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności stałej siatki dyfrakcyjnej  $U(d)$ :

$$U(d) = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial \lambda_{Na}} \cdot u(\lambda_{Na})\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial b} \cdot U(b)\right)^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial a_n} \cdot U(a_n)\right)^2} =$$

$$d \cdot \sqrt{\left(\frac{u(\lambda_{Na})}{\lambda_{Na}}\right)^2 + \left(\frac{\frac{U(a_n) + U(b)}{a_n}}{1 + \left(\frac{a_n}{b}\right)^2}\right)^2} \quad (12)$$

7. Wykonać pozostałe obliczenia stałej siatki dyfrakcyjnej a wartości wpisać do Tabeli Wyników 4:

TABELA WYNIKÓW 4

n	d	U(d)
	[ $\mu\text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}$ ]
1		
2		
3		

8. Obliczyć średnią wartość stałej siatki dyfrakcyjnej  $d_{\text{sr}}$ :

$$d_{\text{sr}} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \quad (13)$$

9. Oszacować wartość niepewności  $U(d_{\text{sr}})$  z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$U(d_{\text{sr}}) = \sqrt{(U_A(d))^2 + (U_B(d))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (d_{\text{sr}} - d_i)^2}{3 \cdot (3-1)} + \frac{\sum_{i=1}^3 (U(d)_i)^2}{3}} \quad (14)$$

10. Zapisać otrzymany w pkt. 8 i 9 wynik.

*W dalszej części opracowania powoływanie się na stałą siatki dyfrakcyjnej  $d$  oraz  $u(d)$  będzie oznaczało użycie  $d_{\text{sr}}$  i  $u(d_{\text{sr}})$ .*

11. Korzystając z danych Tabeli Wyników 2 wykonać dla dowolnego filtra przykład obliczenia długości fali światła:

$$\lambda = \frac{d \cdot a_n}{n \cdot \sqrt{a_n^2 + b^2}} \quad (15)$$

12. Wykonać przykład oszacowania wartości niepewności stałej siatki dyfrakcyjnej  $u(\lambda)$ :

$$U(\lambda) = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial d} \cdot U(d)\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial b} \cdot U(b)\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial a_n} \cdot U(a_n)\right)^2} = \lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{\frac{U(a_n)}{a_n} + \frac{U(b)}{b}}{1 + \left(\frac{a_n}{b}\right)^2}\right)^2} \quad (16)$$

13. Wykonać pozostałe obliczenia stałej siatki dyfrakcyjnej a wartości wpisać do Tabeli Wyników 5:

TABELA WYNIKÓW 5

filtr	n	$\lambda$	U( $\lambda$ )
		[nm]	[nm]
	1		
	2		
	3		
	1		
	2		
	3		

14. Dla jednego z użytych w ćwiczeniu filtrów wykonać przykład obliczenia średniej wartości długości fali światła przepuszczanego  $\lambda_{\text{sr}}$ :

$$\lambda_{\text{sr}} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{3} \quad (17)$$

15. Oszacować wartość niepewności  $U(\lambda_{sr})$  z uwzględnieniem metody typu A i metody typu B:

$$U(\lambda_{sr}) = \sqrt{(U_A(\lambda_{sr}))^2 + (U_B(\lambda_{sr}))^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (\lambda_{sr} - \lambda_i)^2}{3 \cdot (3-1)} + \frac{\sum_{i=1}^3 (U(\lambda_i))^2}{3}} \quad (18)$$

16. Wykonać pozostałe obliczenia dla pozostałych filtrów a wartości wpisać do Tabeli Wyników 6:

TABELA WYNIKÓW 6

filtr	$\lambda_{sr}$	$u(\lambda_{sr})$
	[nm]	[nm]
1		
2		
3		

17. Przygotować i zapisać wnioski z ćwiczenia.

#### LITERATURA

- [1] SZCZENIOWSKI S.: Fizyka doświadczalna, cz. IV — Optyka, PWN, Warszawa 1983.
- [2] MASSALSKI J., MASSALSKA M.: Fizyka dla inżynierów, cz. I. Fizyka klasyczna, WNT, Warszawa 1971.
- [3] DRYŃSKI T.: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN, Warszawa 1978.
- [4] Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki (praca zbiorowa), Skrypt Nr 279, Politechnika Opolska 2007.