

Nazwisko

Data

Nr na liście

Imię

Wydział

Dzień tyg.

Godzina

Ćwiczenie 158

Badanie zjawiska dyfrakcji na pojedynczej i podwójnej szczelinie

Długość fali światła lasera, λ [nm]		Odległość szczelin od ekranu, l [m]	
---	--	---------------------------------------	--

Długość fali lasera odczytujemy z jego obudowy.

Tabela I. Wyznaczanie szerokości szczelin

Symbol szczeliny			
Współrzędna maksimum dyfrakcyjnego	[mm]		
Współrzędna minimum dyfrakcyjnego	[mm]		
Odległość	[mm]	x'	x''
Odległość średnia, x	[mm]		
Obliczona szerokość szczeliny, a	[mm]		
Podana szerokość szczeliny, a_r	[mm]		
Błąd względny procentowy, B_p	[%]		

Tabela II. Wyznaczanie odległości między szczelinami

Symbol pary szczelin					
Współrzędna maksimum, $n = 0$	[mm]				
Współrzędna maksimum	[mm]	Rząd maksimum, $n = 1$		Rząd maksimum, $n = 2$	
Odległość	[mm]	x_1'	x_1''	x_2'	x_2''
Średnia odległość, x_n	[mm]				
Obliczona odległość szczelin, d_n	[mm]				
Średnia obl. odległość szczelin, d	[mm]				
Podana odległość szczelin, d_r	[mm]				
Błąd względny procentowy, B_p	[%]				

Podczas obliczeń zwracaj uwagę na jednostki! Zalecamy wykonanie obliczeń na pracowni – zwykle potrzebne są konsultacje z prowadzącym.

158: Badanie zjawiska dyfrakcji na pojedynczej i podwójnej szczelinie

CEL

Celem doświadczenia jest badanie natury światła poprzez analizę zjawiska dyfrakcji na pojedynczej i podwójnej szczelinie. Zjawisko dyfrakcji promieni świetlnych jest ściśle związane z falową naturą światła. Polega ono na uginaniu się prostoliniowego biegu promieni świetlnych, napotykających na swej drodze przeszkody.

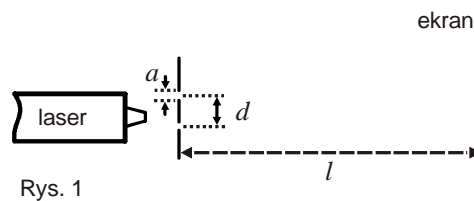
TEORIA

Dyfrakcja i interferencja światła

Zjawiska dyfrakcji i interferencji promieni świetlnych wskazują na falową naturę światła. Światło, przechodzące przez szczeliny o wymiarach porównywalnych z długością fali, ulega ugięciu, bowiem zgodnie z *zasadą Huygensa*, każda szczelina staje się źródłem nowej fali i wysyła promienie we wszystkich kierunkach.

Zjawisko uginania się fali na otworach bądź krawędziach przesłony nazywamy *dyfrakcją*, czyli *uginaniem prostoliniowego biegu promieni*. Ugięte wiązki (ewentualnie zebrane za pomocą soczewki), padające w to samo miejsce ekranu, ulegają interferencji.

Interferencją fal nazywamy nakładanie się fal o tej samej częstotliwości, powodujące wzmocnienie lub osłabienie natężenia fali wypadkowej. W tych miejscach ekranu, w których ugięte promienie spotykają się w zgodnych fazach, następuje ich wzmocnienie i powstają jasne prążki interferencyjne.



Rys. 1

Układ do badania dyfrakcji i interferencji (doświadczenie Younga) jest przedstawiony na rys. 1.

Interferencja na dwóch wąskich szczelinach ($a < \lambda$).

Światło jest falą elektromagnetyczną. Amplituda tej fali A , czyli natężenie pola elektrycznego, zależy od czasu t i współrzędnej przestrzennej r zgodnie ze wzorem

$$A = A_0 \sin \left[2\pi \left(\frac{ct - r}{\lambda} \right) + \delta \right], \quad (1)$$

gdzie: c – prędkość światła, λ – długość fali, δ – faza początkowa.

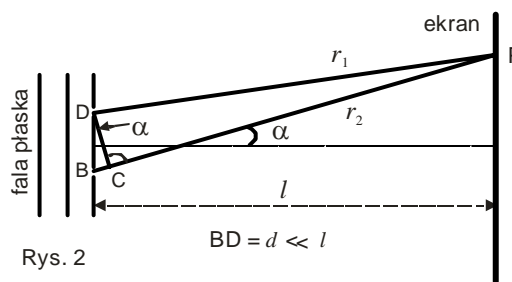
Jeżeli monochromatyczne (jednobarwne) światło pada na przesłonę z dwiema szczelinami, rys. 2, to natężenie fali w punkcie P na ekranie jest sumą natężeń fal cząstkowych, docierających do P z punktów B i D .

Z dodania dwóch funkcji zgodnych z równaniem (1) wynika, że amplituda fali wypadkowej A'_0 jest równa $A'_0 = 2A_0$ w punktach, w których różnica dróg docierających promieni spełnia warunek

$$r_2 - r_1 = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Zatem w wyniku interferencji uzyskamy *wzmocnienie fali* w tych punktach ekranu, dla których różnica dróg nakładających się promieni jest równa całkowitej wielokrotności długości fali λ .

Zerową wartość amplitudy fali wypadkowej ($A'_0 = 0$), czyli wygaszenie fali uzyskujemy, gdy różnica dróg promieni równa jest nieparzystej wielokrotności połowy długości fali,



Rys. 2

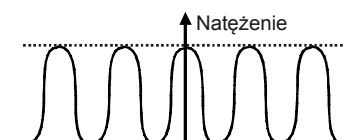
$$r_2 - r_1 = (2n+1) \frac{\lambda}{2}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Jeżeli odległość ekranu od szczelin l jest znacznie większa, niż odległość pomiędzy szczelinami d , ($l \gg d$), to $r_2 - r_1 = BC = d \sin \alpha$. Mamy, więc, następujące warunki wystąpienia maksimum i minimum interferencyjnych:

$$d \sin \alpha_n = n\lambda \quad \text{— warunek wystąpienia maksimum rzędu } n, \quad (4)$$

$$d \sin \alpha_n = (2n+1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{— warunek wystąpienia minimum rzędu } n. \quad (5)$$

Warunki te określają kąty ugięcia promieni, pod którymi na ekranie zobaczymy prążki jasne (wzmocnienie) i ciemne (wygaszenie). Otrzymany na ekranie rozkład natężeń fali świetlnej przedstawia rysunek 3.



Rys. 3

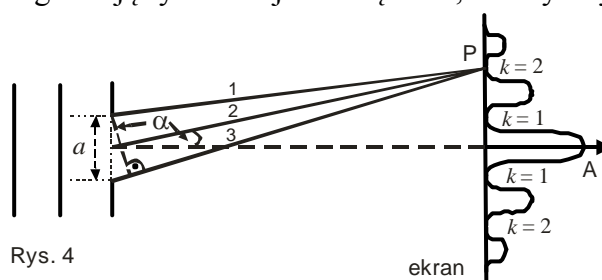
Dyfrakcja na szczelinie o szerokości $a > \lambda$.

Gdy fala świetlna pada na pojedynczą szczelinę, na ekranie otrzymujemy obraz dyfrakcyjny złożony z jasnych i ciemnych prążków — tym razem jednak jasne prążki nie mają jednakowego natężenia, rys. 4. Najjaśniejszym prążkiem jest prążek rzędu zerowego, położony na wprost szczeliny. Prążki położone na prawo i na lewo od niego mają tym mniejsze natężenie, im wyższy jest ich rząd. Dyfrakcja spowodowana jest nakładaniem się fal pochodzących z różnych części szczeliny.

Warunek wystąpienia minimum w obrazie dyfrakcyjnym ma postać

$$a \sin \alpha_k = k\lambda, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

a – szerokość szczeliny, k – rząd minimum.



Rys. 4

Przy tym warunku promienie 1 i 2 będą w fazach przeciwnych i w punkcie P nie będzie światła — promień przechodzący przez górną połowę szczeliny i promień z dolnej połowy, odległy od niego o $a/2$ będą się wzajemnie neutralizować.

Lasery

Do badania zjawisk dyfrakcji i interferencji bardzo pożądane jest zastosowanie laserowych źródeł światła. Wiązka światła laserowego jest mało rozbieżna (silnie ukierunkowana), monochromatyczna (wąska linia widmowa) i w wysokim stopniu spójna. *Spójność* można zdefiniować jako stabilność fazy fali zarówno w przestrzeni jak i w czasie (stabilność w przestrzeni oznacza ustalony związek faz pomiędzy oddzielnymi falami, a stabilność w czasie – niezmiennosc fazy w pojedynczej fali). Poniżej omówiono mechanizm powstawania światła laserowego.

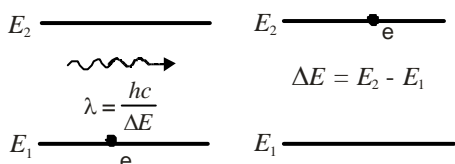
Energia elektronu w atomie lub cząsteczce nie może być dowolna — zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej, tylko pewne jej wartości są dozwolone. Mówimy, że elektrony mogą obsadzać jedynie określone poziomy energetyczne w atomie lub cząsteczce. Świecenie par i gazów związane jest ze zmianą energii elektronów w atomach. Przy przejściu elektronu z jednego poziomu energetycznego na inny, emitowana jest lub pochłaniana porcja (kwant) energii ΔE , od której zależy długość fali promieniowania emitowanego lub pochłanianego:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}; \quad c \text{ – prędkość światła, } h \text{ – stała Plancka.} \quad (7)$$

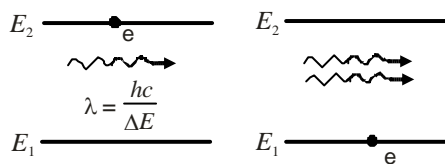
W normalnych warunkach praktycznie wszystkie atomy gazu znajdują się w stanie podstawowym — elektrony przyjmują możliwie najniższe energie, tzn. obsadzają orbity położone najbliżej jądra.

Niech promieniowanie o długości fali danej wzorem (7), pada na atom o poziomach energetycznych odległych o ΔE . Rozpatrzmy dwa przypadki:

1. Atom znajduje w niższym stanie energetycznym. Możliwa jest wówczas *absorpcja promieniowania* i przejście do stanu wyższego, rys. 6. Po pewnym czasie ($10^{-9} \div 10^{-6}$ s) następuje przejście do stanu 1, połączone z emisją promieniowania.
2. Atom w chwili początkowej znajduje się w wyższym stanie energetycznym. Pod wpływem promieniowania o długości fali odpowiadającej różnicy energii poziomów (1) i (2) możliwy jest *proces emisji wymuszonej*, rys. 7. Promieniowanie emitowane przy przejściu do stanu niższego ma dokładnie ten sam kierunek, częstotliwość i fazę co fala padająca. W efekcie, przy przejściu przez ośrodek promieniowanie ulega wzmocnieniu.



Rys. 6



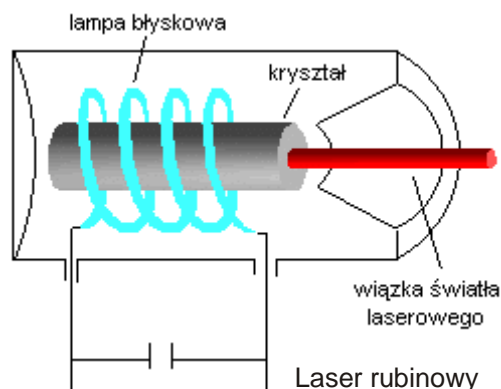
Rys. 7

Prawdopodobieństwa absorpcji i emisji wymuszonej są jednakowe. Wypadkowy efekt będzie wzmocnieniem, jeśli w chwili początkowej większość atomów była w wyższym stanie energetycznym, co oznacza inwersję (odwrócenie) obsadzeń poziomów energetycznych. *Laser*, skonstruowany po raz pierwszy w 1960 r, jest urządzeniem wykorzystującym do generacji fali świetlnej wspomnianą inwersję obsadzeń. Wzbudzenie atomów prowadzące do inwersji obsadzeń nazywane jest *pompowaniem optycznym*.

Typowym przedstawicielem lasera gazowego jest *laser helowo–neonowy* ($\lambda = 632,8$ nm). Podstawową częścią tego lasera jest rura szklana lub kwarcowa wypełniona mieszaniną helu i neonu, pod bardzo małym ciśnieniem (ciśnienia cząstkowe: $p_{He} \approx 130$ Pa, $p_{Ne} \approx 13$ Pa). Do rury wlutowane są elektrody, do których przykładają się napięcie powodujące wyładowanie elektryczne i, w efekcie, wzbudzenie atomów wewnątrz rury. Wzbudzone atomy emitują spontanicznie światło (we wszystkich kierunkach), widziane w postaci świecenia rury laserowej. Obsadzenia poszczególnych poziomów zależą od parametrów wyładowania.

W neonie występuje taka para poziomów, dla których wyładowanie w rurze powoduje, że obsadzenie poziomu górnego jest większe niż dolnego. Promieniowanie o długości fali odpowiadającej przejściu pomiędzy tymi stanami jest wzmacniane przy przejściu przez ośrodek. Pierwsze kwanty takiego promieniowania, rozpoczynające proces emisji wymuszonej, pochodzą z emisji spontanicznej. Promieniowanie to jest wzmacniane, dopóki nie opuści rury laserowej — im dłuższą drogę przebywa wewnątrz rury, tym jest silniejsze. Najlepsze warunki wzmocnienia istnieją dla promieniowania emitowanego wzdłuż rury. Dodanie zwierciadeł półprzepuszczalnych na końcach rury powoduje, że promieniowanie przechodzi przez ośrodek wielokrotnie i jeszcze bardziej się wzmacnia.

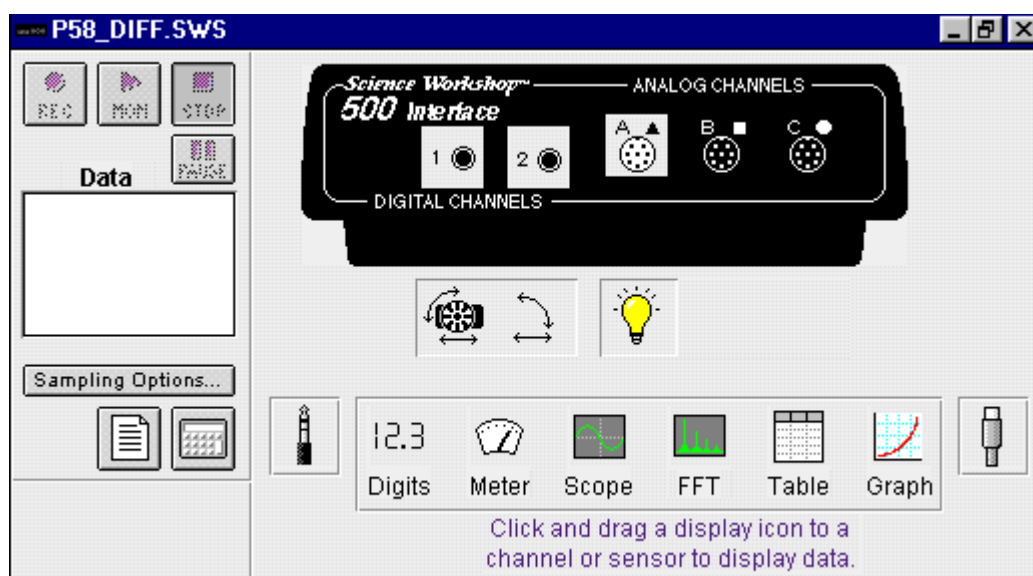
Powszechne są również *lasery krystaliczne*, np. laser rubinowy, którego osnową jest kryształ szafiru (Al_2O_3) domieszkowany jonami Cr^{3+} , ($\lambda = 694,3$ nm). Efekt laserowy uzyskuje się w kryształ w kształcie cylindrycznego pręta o średnicy ok. 1 cm i długości do kilkunastu cm. Na końcach pręta rubinowego są naniesione zwierciadła odbijające. Promieniowanie "pompujące" jest wytwarzane przez lampę błyskową wypełnioną ksenonem, umieszczoną wokół kryształu. Absorbując zielone światło lampy błyskowej atomy chromu ulegają wzbudzeniu.



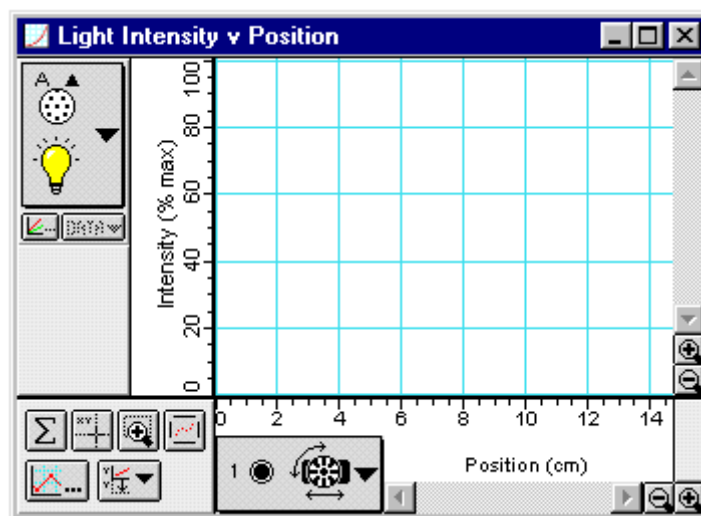
Efekt laserowy uzyskuje się także w półprzewodnikowych złączach p–n, świecących pod wpływem stałego prądu elektrycznego przepływającego przez złącze w kierunku przewodzenia. Inwersję obsadzeń uzyskuje się w cienkiej warstwie przy złączu, w obszarze typu p. Oznacza to, że więcej elektronów znajduje się w paśmie przewodnictwa, niż na górnych poziomach pasma walencyjnego. Powracającym do pasma walencyjnego elektronom może towarzyszyć emisja promieniowania elektromagnetycznego. W zależności od konstrukcji diody oraz natężenia prądu płynącego przez złącze, światło emitowane przez źródło złączowe jest albo niespójne — mamy wówczas do czynienia z diodą elektroluminescencyjną, albo jest ono spójne — źródło jest wtedy laserem złączowym. Najlepsze rezultaty emisji laserowej uzyskuje się w tzw. heterozłączach, czyli złączach powstałych na styku dwóch warstw o różnym składzie chemicznym (bazowym materiałem półprzewodnikowym do produkcji heterozłącz jest arsenek galu GaAs). Lasery półprzewodnikowe cechuje duża sprawność przemiany energii elektrycznej na promienistą, bardzo długi czas pracy użytecznej, mały pobór mocy i małe wymiary.

Okna ćwiczenia 158

Okno podstawowe „P58_DIFF.SWS” — zawiera przyciski sterowania



Okno „Light Intensity vs Position” — przedstawia wykres zależności natężenia światła od położenia.



UWAGA! W TYM ĆWICZENIU UŻYWANE JEST ŹRÓDŁO ŚWIATŁA LASEROWEGO. NIE WOLNO GO KIEROWAĆ W KIERUNKU TWARZY! GROZI USZKODZENIEM WZROKU!

WYKONANIE ĆWICZENIA

POTRZEBNE WYPOSAŻENIE	
• Interfejs „Science Workshop 500”	• Ława optyczna, statywy
• Czujnik ruchu obrotowego	• Sonda światłowodowa
• Laser	• Slajd z pojedynczą szczeliną
	• Slajd z podwójną szczeliną

W części pierwszej ćwiczenia za pomocą sondy światłowodowej mierzone będzie natężenie promieniowania światła laserowego po przejściu przez pojedynczą szczelinę, a w części drugiej — po przejściu przez podwójną szczelinę. Za pomocą czujnika ruchu obrotowego zmierzone zostaną względne położenia maksimum uzyskanych w wyniku zjawiska dyfrakcji światła laserowego.

Program *Science Workshop* umożliwia przedstawienie wykresów natężenia promieniowania świetlnego w funkcji położenia.

Przygotowanie układu pomiarowego

Przygotowanie Komputera

1. Włącz zasilanie stołu (patrz deska rozdzielcza stołu – przy Twojej lewej nodze gdy siedzisz na wprost komputera) – przekręć czerwoną „gałkę” w kierunku strzałek (powinna wyskoczyć), przekręć kluczyk jak w samochodzie i puść. Automatycznie włączy się interfejs. Komputer włącz przyciskiem power.
2. Automatycznie uruchomi się system operacyjny *Windows* i program „*Science Workshop*”. Otwórz (File \Rightarrow Open) w katalogu *Library\Physics* dokument **P58_DIFF.SWS**. Na ekranie zobaczymy (po zamknięciu okna Experiment Notes) okno podstawowe P58_DIFF i okno wykresu Light Intensity vs Position, przedstawiające zależność natężenia światła od położenia.

Dyfrakcja na pojedynczej szczelinie

PRZEBIEG I REJESTRACJA POMIARÓW


1. Włącz źródło światła laserowego.
2. Ustaw slajd z pojedynczą szczeliną na drodze światła, w odległości około 10 cm od lasera.
3. Zaobserwuj prążki światła czerwonego na białej kartce papieru ustawionej prostopadle przed sondą światłowodu. Ustaw źródło światła (laser) względem slajdu ze szczeliną tak, aby na kartce, która stanowi ekran, widoczne były wyraźne, ostre prążki.
4. Ustaw końcówkę światłowodu na drodze światła laserowego w odległości powyżej 150 cm od slajdu ze szczeliną. Istnieje możliwość regulacji czułości sensora światła — ustawia prowadzący. Należy zwrócić uwagę na właściwe ustawienie czoła światłowodu — na wysokości prążków powstałych na kartce.
5. W celu rozpoczęcia pomiarów, naciśnij przycisk **REC**.
6. Przesuwaj powoli i płynnie końcówkę światłowodu obracając pokrętkę czujnika ruchu, tak aby znajdowała się ona w świetle lasera.
7. Obserwuj zmianę natężenia światła w funkcji położenia w oknie wykresu i tak dobierz prędkość przesuwu końcówki światłowodu, aby otrzymać w miarę ciągły zbiór punktów pomiarowych. Na wykresie powinno pojawić się maksimum natężenia dla rzędu zerowego i znacznie mniejsze maksima, odpowiadające kolejnym wzmocnieniom światła laserowego.
8. Po zakończeniu przesuwu światłowodu, naciśnij przycisk **STOP**.

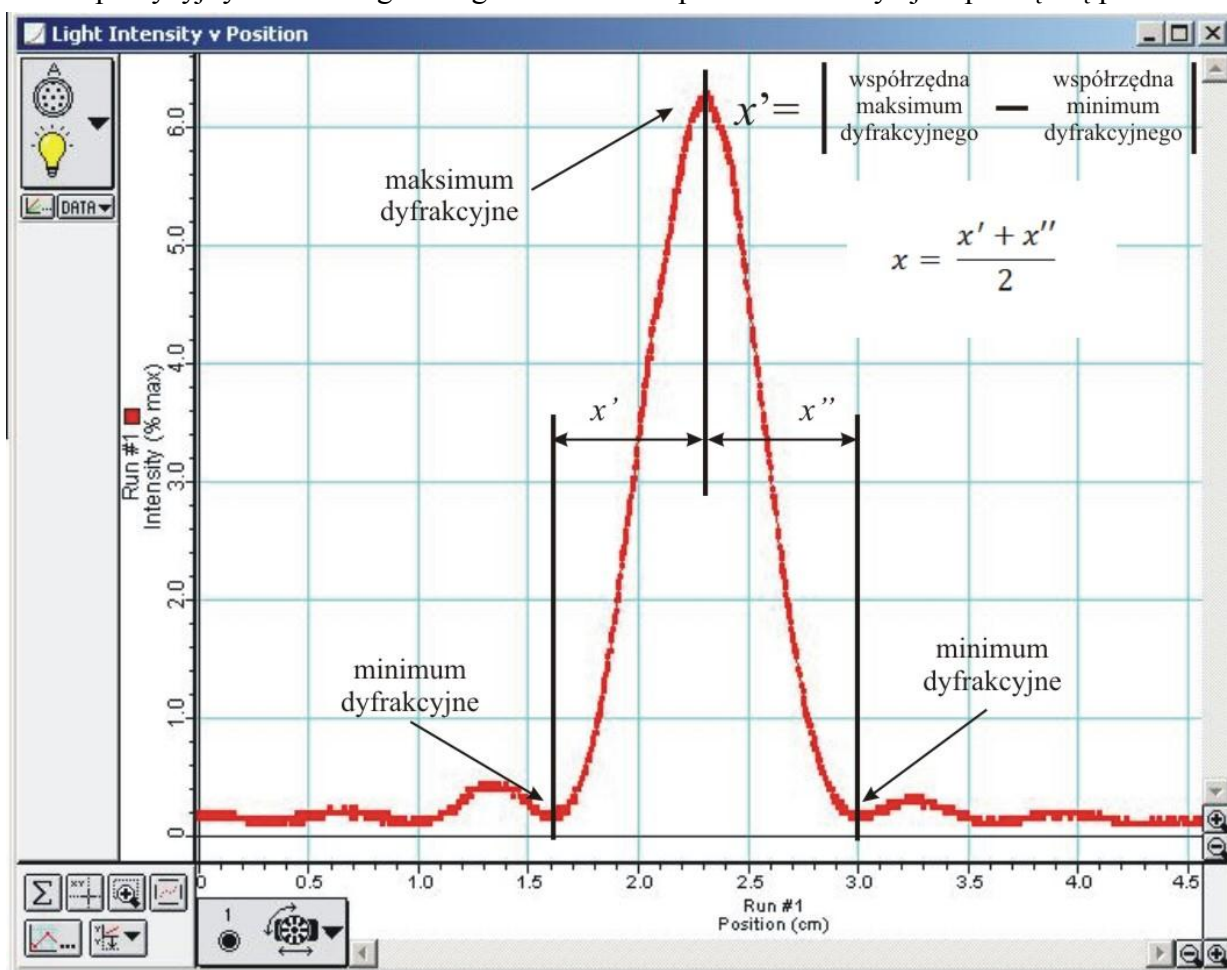
ANALIZA DANYCH

Należy obliczyć szerokość szczeliny a . Zgodnie z równaniem (6), dla $k = 1$: $a = \lambda / \sin \alpha_1$.

Sinus kąta α_1 , pod którym obserwowane jest pierwsze minimum, można obliczyć ze wzoru $\sin \alpha_1 = x / \sqrt{x^2 + l^2}$, gdzie: x – odległość średnia od środka wzmocnienia rzędu 0 do pierwszego minimum, l – odległość od szczeliny do płaszczyzny ruchu końcówki światłowodu.

1. Określ współrzędna posługując się w oknie wykresu kursorem precyzyjnym (rys. 8).

Naciśnij przycisk kursora precyzyjnego  w lewym dolnym rogu wykresu. Przenieś kursor do obszaru wykresu. Kursor zmienia się w krzyż z nitkami pajęczych. Współrzędne x i y położenia kursora wyświetlane są obok osi poziomej i pionowej. Przesuń kursor na wykresie do pierwszego minimum dyfrakcyjnego i odczytaj współrzędną położenia. Następnie przesuń kursor precyzyjny na środek głównego maksimum i ponownie odczytaj współrzędną położenia.



Rys. 8. Wykres maksimum i minimum natężenia światła spowodowanych zjawiskiem dyfrakcji.

2. Odczytaj odległość l .
3. Odczytaj na **obudowie lasera długość fali światła** lasera.
4. Oblicz szerokość szczeliny.
5. Porównaj obliczoną szerokość szczeliny a z wartością rzeczywistą a_r , podaną na oprawie slajdu. Oblicz w tym celu błąd względny procentowy:

$$B_p = \frac{a - a_r}{a_r} \cdot 100\% .$$

Dyfrakcja na podwójnej szczelinie

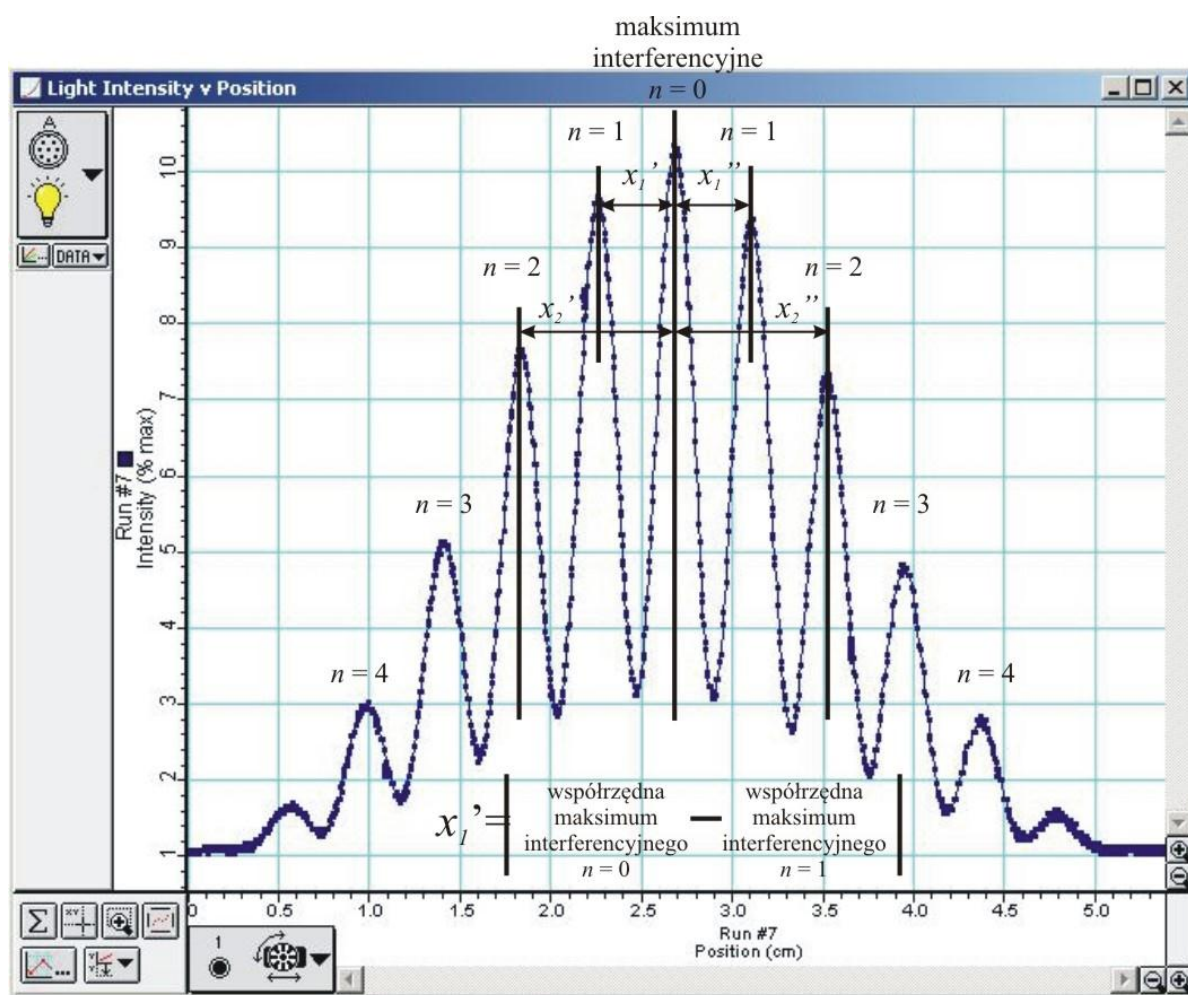
PRZEBIEG I REJESTRACJA POMIARÓW

1. Ustaw slajd z podwójną szczeliną na drodze promieniowania laserowego.
2. Wykonaj czynności pomiarowe opisane dla pojedynczej szczeliny.

ANALIZA DANYCH

1. Wykorzystaj wzór (4) do obliczenia odległości d pomiędzy szczelinami: $d \sin \alpha_n = n\lambda$
 - Sinus kąta ugięcia rzędu n dany jest zależnością

$$\sin \alpha_n = \frac{x_n}{\sqrt{x_n^2 + l^2}}$$



Rys. 9. Przykładowy wygląd zarejestrowanych zmian natężenia światła dla podwójnej szczeliny.

- Odległość x_n określ odczytując na wykresie współrzędne położenia wierzchołka maksimum rzędu zerowego i kolejnych rzędów n .
2. Porównaj obliczoną odległość szczelin d z wartością rzeczywistą d_r , podaną na oprawie slajdu. Oblicz w tym celu błąd względny procentowy:

$$B_p = \frac{d - d_r}{d_r} \cdot 100\%$$

3. Wydruk. W oknie wykresu dobierz parametry tak (dyfrakcji lub interferencji), aby wykres prezentował się najkorzystniej. Poproś prowadzącego o wydruk.