

C-3 Wyznaczanie długości fali światła laserowego przy użyciu nagranej płyty CD lub DVD

Wprowadzenie

Światło jest promieniowaniem elektromagnetycznym o korpuskularno falowym charakterze. Oznacza to, że pewne zjawiska fizyczne można opisać traktując światło jako strumień fotonów inne zaś traktując go jako falę. Naturą falową da się wytłumaczyć odbicie, załamanie, interferencję, polaryzację oraz emisję i pochłanianie.

Fala elektromagnetyczna są to rozchodzące się w przestrzeni periodyczne zmiany pola elektrycznego i magnetycznego. Wektory natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} i indukcji magnetycznej \mathbf{B} fali elektromagnetycznej są do siebie prostopadłe a ich wartości proporcjonalne. Dlatego przy opisie zjawisk falowych wystarczy wybrać jeden z nich np. \mathbf{E} . Falę elektromagnetyczną rozchodzącą się wzdłuż osi X możemy opisać za pomocą funkcji falowej:

$$E(x,t) = E_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1)$$

gdzie:

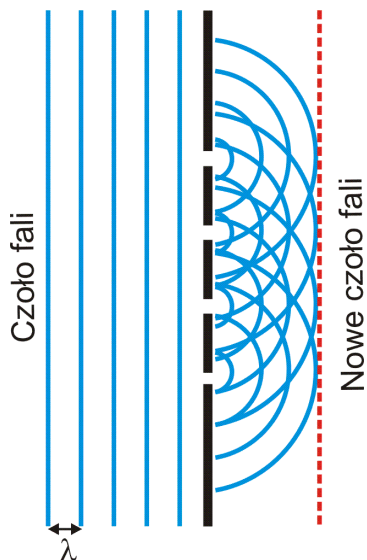
E_0 - amplituda natężenia pola elektrycznego, $(\omega t - kx)$ - faza fali, ω - częstość kołowa, k - liczba falowa związana z długością fali λ zależnością $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Jak wynika ze wzoru (1) przebycie przez falę drogi $x = \lambda$ powoduje zmianę fazy fali o kąt 2π . Ponieważ 2π jest okresem funkcji sinus to wszystkie punkty, w których fazy będą różniły się o wielokrotność 2π , będą miały takie same wartości natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} . Mówimy wówczas, że drgania natężenia pola w tych punktach są zgodne w fazie. Fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną co oznacza, że wektory natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej są zawsze prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. W przypadku fali opisywanej równaniem (1) będą się one zmieniały tylko wzdłuż osi X – będą natomiast stałe w płaszczyznach YZ prostopadłych do osi X. Wszystkie punkty na danej płaszczyźnie YZ będą miały jednakową fazę. Falę taką nazywamy falą płaską.

Zjawisko interferencji powstaje w wyniku nałożenia się dwóch lub więcej fal w danym punkcie przestrzeni. Obraz interferencyjny możemy zaobserwować wówczas gdy źródła są monochromatyczne (wysyłają fale o jednej długości fali) bądź gdy źródła interferujących fal są spójne (koherentne) – tzn. fale wysyłane przez te źródła zachowują stałą w czasie różnicę faz.

Istota zjawiska dyfrakcji, odkrytego w XVII w. przez Grimaldiego, polega na tym, że fala napotykaćca na swojej drodze przeszkodę np. przesłonę, w której znajduje się szczelina, albo ostrą krawędź, ulega ugięciu (dyfrakcji) w całym obszarze za przeszkodą i zmienia kierunek rozchodzenia się. Rozprzestrzenianie się fal za przeszkodą można analizować w oparciu o zasadę Huygensa (Rys.1). Dyfrakcji ulegają fale wszystkich rodzajów, a jej efekty są wyraźne, gdy rozmiary szczeliny są rzędu długości fali. Im węższa jest szczelina, tym silniejsze ugięcie fali, dlatego też nie można uzyskać promienia światła przepuszczając światło przez wąską szczelinę.

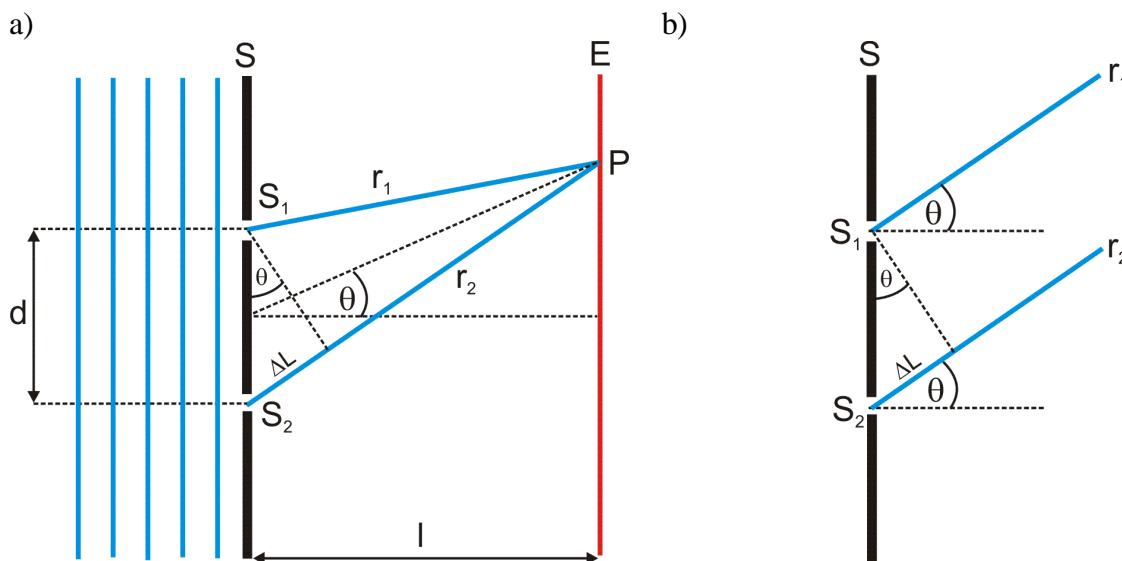
Zasada Huygensa, mówi, że każdy punkt ośrodka, do którego dobiega czoło fali może być traktowany jako źródło fali elementarnej. Utworzona w ten sposób obwiednia fal elementarnych daje nam nową powierzchnię falową. Fala kulista rozchodzi się we wszystkich kierunkach, a obserwowana fala jest złożeniem (superpozycją) wszystkich kulistych fal elementarnych. Punkty w przestrzeni posiadające taką samą fazę tworzą czoło fali – w przypadku fali płaskiej czoło fali stanowi płaszczyznę.



Rys.1 Zasada Huygensa.

Dyfrakcja na dwóch szczelinach

Dyfrakcję na dwóch szczelinach opisał Thomas Young. Monochromatyczne światło, przepuszczone przez szczelinę S_0 gdzie uległo ono dyfrakcji. Następnie skierowane zostało na przesłonę z dwiema szczelinami S_1 i S_2 (Rys.2). W wyniku ugięcia światła na tych szczelinach powstają dwie fale kuliste, które interferują ze sobą. Na umieszczonym dalej ekranie obserwujemy obraz złożony z jasnych i ciemnych prążków interferencyjnych. Jasne prążki powstają na skutek wzmocnienia interferencyjnego (środki jasnych prążków odpowiadają maksimum interferencji), natomiast ciemne prążki są wynikiem interferencji destruktywnej, czyli wygaszania (środki ciemnych prążków odpowiadają minimum interferencji).



Rys.2 Dyfrakcja na dwóch szczelinach.

W chwili przechodzenia przez szczeliny obie fale świetlne mają tę samą fazę, gdyż są one częściami tej samej fali padającej wychodzącej ze szczeliny S_0 . Jednak po przejściu przez szczeliny każda z fal składowych przebywa inną drogę, aby osiągnąć dowolny punkt P na ekranie. Skutkiem tego fale składowe docierające do punktu P mogą mieć różne fazy.

Różnica dróg ΔL przebytych przez fale składowe powoduje różnicę ich faz w punkcie P. Różnica faz fal składowych decyduje o natężeniu światła w punkcie P.

Jeśli różnica dróg jest równa całkowitej wielokrotności długości fali:

$$\Delta L = 0 \pm m\lambda \quad (2)$$

wówczas w takim punkcie fazy fal składowych są zgodne i występuje maksimum interferencyjne, a więc natężenie światła jest maksymalne. Jeśli natomiast różnica dróg spełnia warunek:

$$\Delta L = \lambda/2 \pm m\lambda \quad (3)$$

wówczas w takim punkcie fazy fal składowych są przeciwne i natężenie światła jest minimalne.

Położenie jasnych i ciemnych prążków na ekranie możemy jednoznacznie określić za pomocą kąta θ względem osi układu. Obliczymy, jakie wartości kąta θ odpowiadają maksimum i minimum interferencyjnym. Obliczenia znacznie upraszczają się, gdy założymy, że odległość ekranu od szczelin jest znacznie większa od odległości pomiędzy obiema szczelinami ($l \gg d$). Wówczas możemy w przybliżeniu traktować promienie r_1 i r_2 jako wzajemnie równoległe, tworzące kąt θ z osią układu (Rys 2b). Przy takich założeniach otrzymujemy związek:

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (4)$$

Porównując równanie (4) z warunkami (2) i (3) otrzymujemy położenie prążków na ekranie. Położenie środka jasnego prążka m-tego rzędu określa równanie

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2 \dots \quad (5)$$

np. dla $m=0$ jasny prążek znajduje się pod kątem $\theta=0$, a więc na osi (maksimum centralne) Położenie środków ciemnych prążków określa warunek

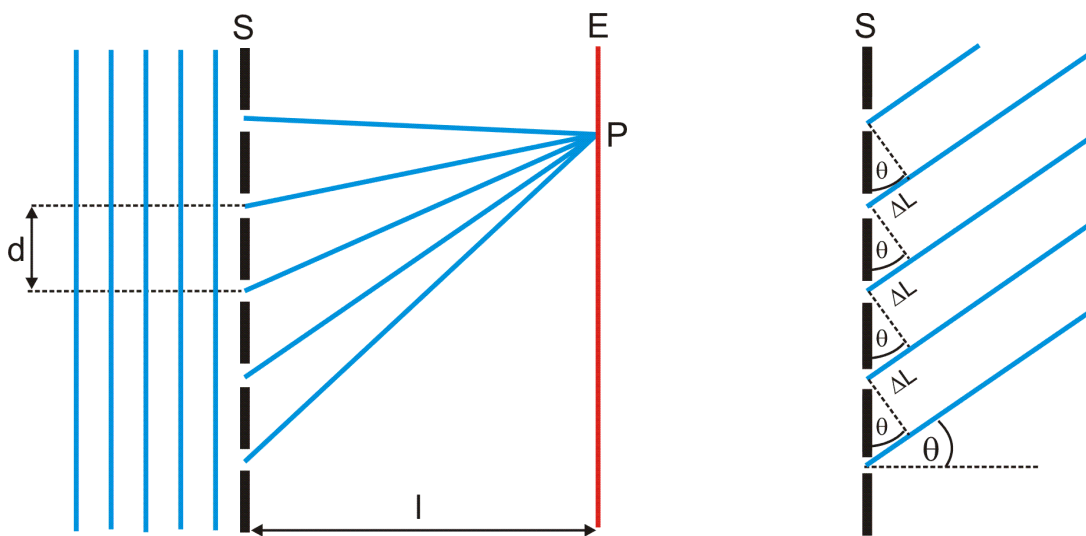
$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2 \dots \quad (6)$$

Siatka dyfrakcyjna

Rozpatrzmy teraz przypadek gdy liczba centrów rozpraszania jest większa tzn. zwiększymy liczbę szczelin z jednej do N. Taki układ bardzo wielu N jednakowych, równoodległych szczelin nazywamy **siatką dyfrakcyjną**. Odległość d środków sąsiednich szczelin nazywamy **stałą siatki**. Oświetlając siatkę dyfrakcyjną światłem monochromatycznym otrzymujemy na ekranie wąskie jasne linie pomiędzy którymi znajdują się szerokie ciemne obszary. Na rysunku 3 przedstawiono uproszczoną siatkę dyfrakcyjną, złożoną z 5 równoodległych szczelin. Do wyznaczenia położenia jasnych linii na ekranie wykorzystamy tę samą procedurę co w przypadku doświadczenia Younga. Zakładamy więc, że ekran E znajduje się dostatecznie daleko od siatki ($l \gg d$), tak że promienie wychodzące ze szczelin można traktować jako równoległe.

a)

b)



Rys.3 Siatka dyfrakcyjna.

Dla każdej pary promieni wychodzących z sąsiednich szczelin obserwujemy wzmocnienie, gdy różnica ich dróg jest równa całkowitej wielokrotności długości fali, a więc

$$\Delta L = d \sin \theta = m\lambda, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2 \dots \quad (7)$$

Czyli położenie linii określa warunek:

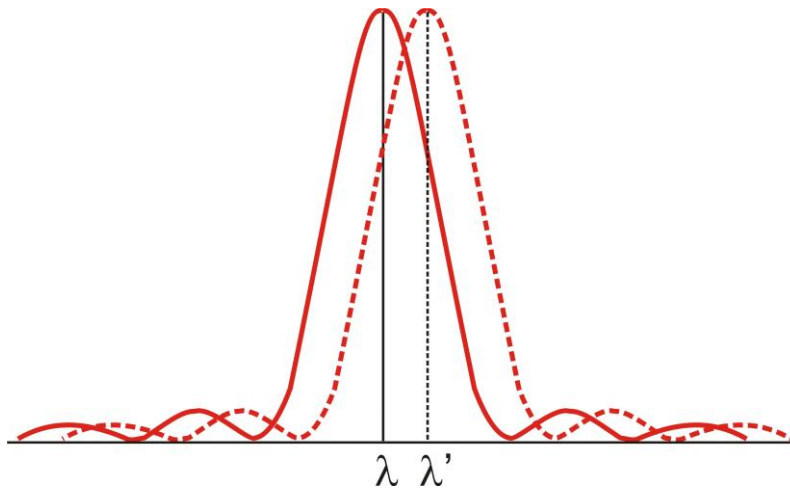
$$\sin \theta = m\lambda / d, \text{ gdzie } m = 0, 1, 2 \dots \quad (8)$$

Liczby m nazywamy **rzędem linii**. Linia zerowego rzędu ($m=0$), linia pierwszego rzędu ($m=1$) itd.

W przypadku siatki dyfrakcyjnej linie są bardzo wąskie, ponieważ powstają w wyniku interferencji bardzo dużej liczby fal składowych. Ze względu na małą wartość stałych siatki odległości kątowe pomiędzy poszczególnymi liniami są znacznie większe niż w doświadczeniu Younga z 2 szczelinami. Ze wzoru (7) wynika, że dla danej siatki położenie kątowe każdej linii zależy od długości fali światła padającego. Dlatego też, jeśli na siatkę pada światło o nieznannej długości fali, to pomiar kątów θ dla linii wyższych rzędów pozwala wyznaczyć długość fali tego światła. Jeśli światło padające zawiera kilka różnych długości fali, linie odpowiadające różnym długościom fali mogą być na tyle dobrze rozseparowane, że można je rozróżnić i zidentyfikować. Należy tu wprowadzić pojęcie **zdolności rozdzielczej siatki dyfrakcyjnej (R)**, czyli jej zdolność do rozdzielania linii o różnych długościach fali, którą definiujemy jako:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (9)$$

gdzie: λ – jedna z długości fali dwu linii widmowych, $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ - różnica długości fal między nimi.



Rys.4 Kryterium Rayleigha.

Warunkiem rozdzielania dwóch fal o bliskich sobie długościach jest tzw. **Kryterium Rayleigha**, które mówi, że aby dwa maksima główne były rozróżnialne, odległość kątowna powinna być taka, aby minimum jednej linii przypadało w maksimum drugiej linii (Rys.4). Pierwsze minimum dyfrakcyjne wypada w odległości $\varphi = (2\pi/N)$ od maksimum głównego. φ - oznacza różnicę faz dwóch fal wysyłanych z sąsiednich szczelin siatki dyfrakcyjnej. Taka różnica faz odpowiada różnicy długości dróg optycznych (λ/N) . A więc warunek na pierwsze minimum dla widma rzędu m-tego możemy zapisać:

$$d \sin \theta = m\lambda + \frac{\lambda}{N} \quad (10)$$

Równocześnie dla fali o długości λ' musimy otrzymać w tym miejscu maksimum natężenia, czyli:

$$d \sin \theta = m\lambda' \quad (11)$$

Po odjęciu równań stronami i stronami przekształceniu otrzymamy:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (12)$$

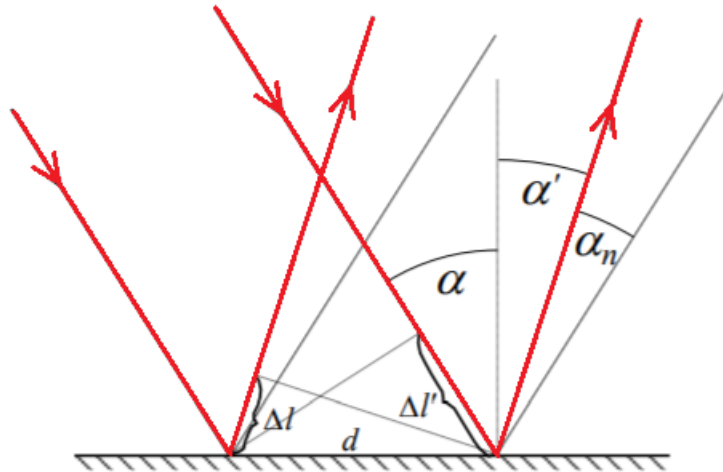
gdzie m-rząd widma, N-liczba szczelin siatki

Zdolność rozdzielcza siatki dyfrakcyjnej jest tym większa, im więcej biorących udział w interferencji szczelin zawiera siatka i im wyższy jest rząd widma.

Siatka dyfrakcyjna odbiciowa

Powierzchnia płyty CD lub DVD zawiera ciąg mikroskopijnych wgłębień, które odpowiadają binarnemu 0. Każde wgłębienie ma $0,5 \mu\text{m}$ szerokości i od $0,83 \mu\text{m}$ do $3,56 \mu\text{m}$ długości. W płycie DVD wgłębienie ma $0,2 \mu\text{m}$ szerokości i od $0,4 \mu\text{m}$ długości. Dla płyty CD nagrania (ścieżki z zapisaną informacją) są oddzielone od siebie przerwą szerokości $1,6 \mu\text{m}$, dla płyty DVD - $0,74 \mu\text{m}$ i mają kształt współśrodkowych okręgów (Rys. 6). Odległości te traktować możemy jako odpowiednik stałej siatki dyfrakcyjnej. Każda zapisana ścieżka składa się z odcinków bardzo dobrze odbijających światło (nie zapisanych) oraz słabo odbijających światło (zapisanych).

Płytę CD lub DVD można więc potraktować jako odbiciową siatkę dyfrakcyjną. Rozwiążmy dwa promienie padające na dwie sąsiednie odbijające ścieżki na płycie:



Rys.5 Dwa promienie padające na dwie sąsiednie odbijające ścieżki na płycie

Różnica dróg optycznych promieni rozproszonych przez obie ścieżki pod kątem α' wynosi $\Delta l - \Delta l'$, gdzie $\Delta l = d \sin \alpha$, $\Delta l' = d \sin \alpha'$ (dopuszczamy $\alpha' < 0$). Rozproszone promienie utworzą na odległym ekranie prążek n-tego rzędu, gdy $\Delta l - \Delta l' = n\lambda$, gdzie λ oznacza długość fali światła. Otrzymujemy równanie $d \sin \alpha - d \sin \alpha' = n\lambda$. Ostatecznie kąt $\theta_n = \alpha - \alpha'$, pod którym promienie widma n-tego rzędu odchylają się od promieni odbitych zgodnie z prawem odbicia, jest dany wzorem:

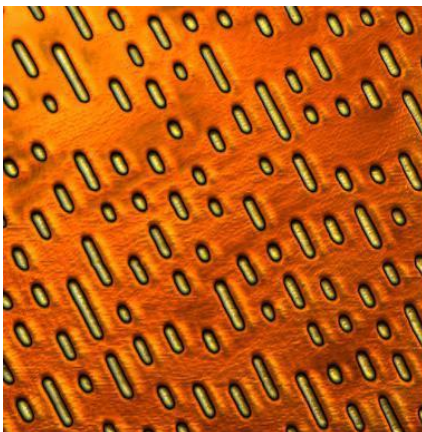
$$\theta_n^\pm = \left| \alpha - \arcsin \left(\sin \alpha \pm \frac{n\lambda}{d} \right) \right| \quad (10)$$

Znak minus odpowiada sytuacji $\alpha' < \alpha$, znak plus sytuacji $\alpha' > \alpha$. Warto zauważyć, że te dwie sytuacje nie są symetryczne, jak byłoby w przypadku wiązki prostopadłej do siatki. Oświetlenie płyty pod kątem umożliwia dostrzeżenie efektów interferencji nawet wtedy, gdy długość fali przekracza odległość pomiędzy ścieżkami na płycie czyli jej stałą siatki d .

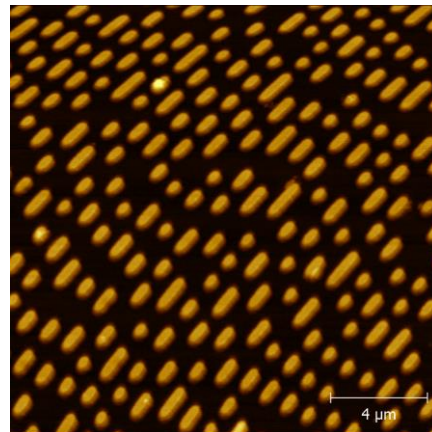
Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie długości fali światła laserowego przy użyciu nagranej płyty CD lub DVD.

a)



b)



Rys.6 Obraz AFM powierzchni płyty a) CD (<https://brinck.cl>) i b) DVD (<https://imgur.com/a/eSHjC>)

Wykonanie zadania

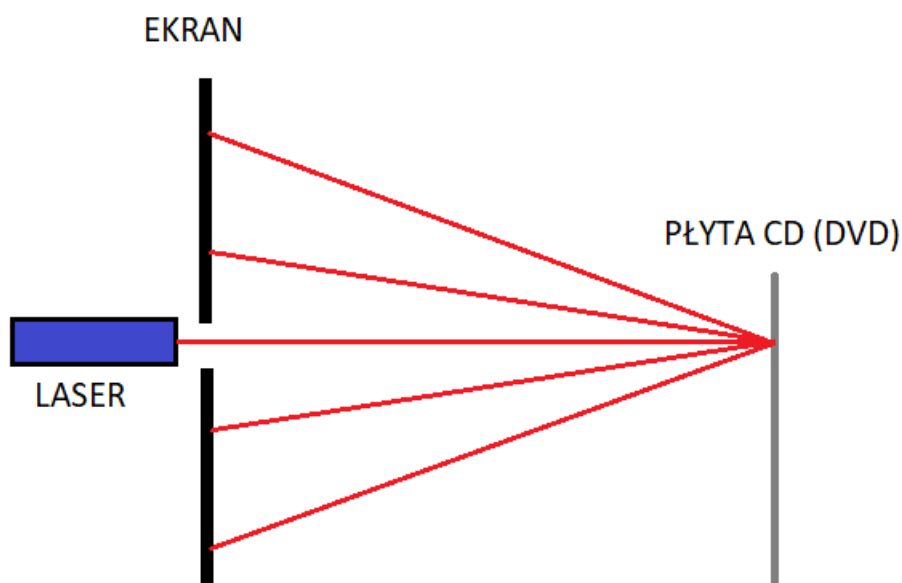
UWAGA!!!!

W ćwiczeniu wykorzystywany jest wskaźnik laserowy. Zaleca się szczególną ostrożność przy manipulacji laserem tak, żeby jego promień bezpośredni albo odbity nie trafił do oka.

METODA 1

Znając odległości pomiędzy ścieżkami nagranej płyty CD lub DVD wyznaczyć możemy długość fali światła użytego lasera. Metoda pomiaru jest taka sama jak w przypadku tradycyjnej siatki dyfrakcyjnej, lecz tym razem dyfrakcji ulega światło odbite od siatki, a nie przechodzące przez siatkę. Dlatego laser umieszczony jest po tej samej stronie co ekran, a płyta jest oświetlana przez otwór w ekranie. Płyta natomiast umieszczona jest w statywie Rys.7. Na ekranie powstaje obraz dyfrakcyjny w postaci prążków. Wyraźne są prążki zerowego i pierwszego rzędu, a w przypadku płyty DVD możemy zaobserwować również prążki drugiego rzędu.

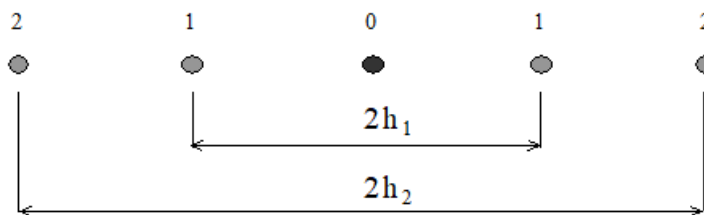
1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem 7.



Rys.7 Schemat układu pomiarowego dla metody pierwszej

2. Zamocować laser w statywie (statyw można wykonać z ołówka wbitego w połówkę np. ziemniaka i gumką recepturką zamocować do ołówka wskaźnik laserowy) .
3. Umieścić płytkę CD w statywie stroną zapisaną skierowaną ku laserowi. Jako statyw posłużyć może druga połówka ziemniaka z naciętą szczeliną do włożenia w nią płyty. W podobny sposób możemy zamocować ekran.
4. Włączyć laser i skierować jego promień poprzez otwór w ekranie na płytkę CD. (Możemy skorygować ustawienie lasera i płytki CD tak, aby obraz prążków pojawił się na przymocowanym do statywu ekranie).
5. Zmierzyć odległość L między płytą, a ekranem.

6. W celu zmniejszenia błędu pomiaru zmierzyć odległości $2h_m$ pomiędzy prążkami pierwszego rzędu (na prawo i lewo od prążka zerowego) i podzielić tę odległość przez 2 (Rys 8).



Rys. 8. Widok obrazu interferencyjnego.

7. Pomiar powtórzyć dla kilku różnych odległości badanej płyty od ekranu.
 8. Obliczyć odległość pomiędzy ścieżkami zapisu z równania:

$$\lambda = \frac{h_m \cdot d}{m\sqrt{l^2 + h_m^2}} \quad (14)$$

gdzie: λ -długość fali użytego światła laserowego, l -odległość badanej płyty od ekranu, h_m -odległość zerowego prążka od prążka wyższego rzędu, m -rząd widma.

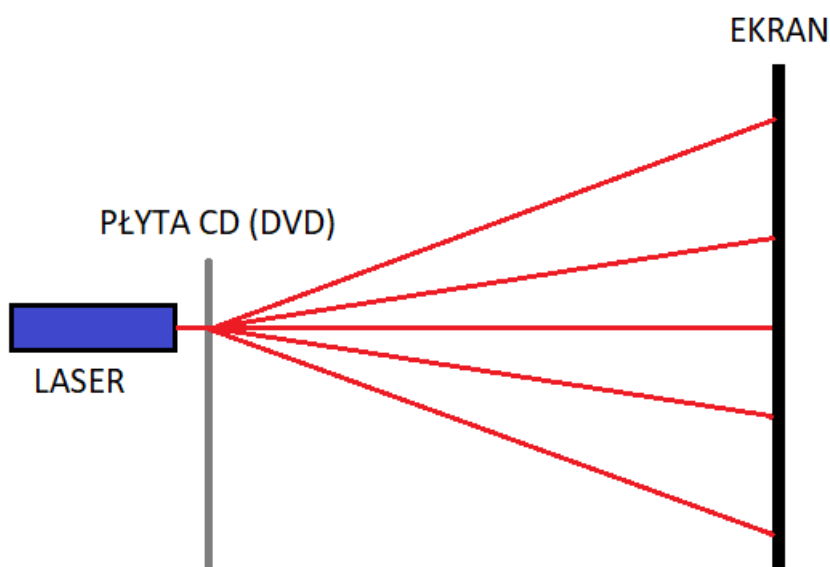
9. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli.

L.p	λ [nm]	m	L [m]	$2h_m$ [m]	h_m [m]	d [m]	d_{sr} [m]
1							
2							
3							
4							
5							

METODA 2

Doświadczenie możemy przeprowadzić również w inny sposób. W tym przypadku jednak będziemy musieli zniszczyć płytę. Do najlepiej całkowicie zapisanej płyty CD lub DVD przyklejamy taśmę klejącą i odrywamy ją razem z wierzchnią warstwą płyty (chyba, że dysponujemy płytą bez warstwy wierzchniej-czasami takie można kupić).

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie z rysunkiem 9.



Rys.9 Schemat układu pomiarowego dla metody drugiej

1. Zamocować laser w statywie (statyw można wykonać z ołówka wbitego w połówkę np. ziemniaka i gumką recepturką zamocować do ołówka wskaźnik laserowy) .
2. Umieścić płytkę CD w statywie. Jako statyw posłużyć może druga połówka ziemniaka z naciętą szczeliną do włożenia w nią płyty. Jako ekran posłużyć nam może np. ściana.
3. Włączyć laser i ustawić za nim naszą „siatkę dyfrakcyjną”. (obserwujemy dwa prążki pierwszego rzędu).
4. Zmierzyć odległość L między płytą, a ekranem.
5. W celu zmniejszenia błędu pomiaru zmierzyć odległości $2h_m$ pomiędzy prążkami pierwszego rzędu (na prawo i lewo od prążka zerowego) i podzielić tę odległość przez 2 (Rys 7).
6. Pomiar powtórzyć dla kilku różnych odległości badanej płyty od ekranu.
7. Obliczyć odległość pomiędzy ścieżkami zapisu z równania 14.
8. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli.

L.p	λ [nm]	m	L [m]	$2h_m$ [m]	h_m [m]	d [m]	d_{sr} [m]
1							
2							
3							
4							
5							

Niepewność pomiarowa

Niepewność pomiarową względną maksymalną otrzymanych wartości \mathbf{d} obliczamy metodą różnicową lub różniczkową uwzględniając, że $\mathbf{d} = f(h_m, l)$.

Obowiązujące zagadnienia teoretyczne

1. Światło jako fala elektromagnetyczna.
2. Zjawisko dyfrakcji i interferencji światła, doświadczenie Younga.
3. Światło monochromatyczne, światło białe, spójność fali.
4. Własności i powstawanie światła laserowego.
5. Siatka dyfrakcyjna.

Literatura

1. Podstawy Fizyki – D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, PWN 2003, tom 4.
2. Fizyka-krótki kurs – Cz. Bobrowski, PWN 1999.
3. Wykłady z fizyki – I.W. Sawieliew, PWN Warszawa 1998, tom 2.

Opracował Adam Prószyński