

## Ćwiczenie 14

### SIATKA DYFRAKCYJNA

#### CEL :

- a) wyznaczenie stałej siatki oraz liczby rys na 1mm siatki,
- b) wyznaczenie długości fali światła lasera w oparciu o stałą siatki dyfrakcyjnej.

**PRZYRZĄDY :** siatka dyfrakcyjna, laser He-Ne, ława optyczna z ekranem.

#### WPROWADZENIE TEORETYCZNE :

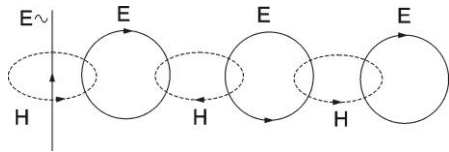
Siatka dyfrakcyjna - to układ równoległych wąskich szczelin oddalonych od siebie o odległość  $d$  nazywaną - stałą siatki. Jeżeli szerokość szczelin jest porównywalna z długością fali padającej na siatkę, to wówczas występują zjawiska ugięcia (dyfrakcji) oraz nakładania (interferencji) fal. Zjawiskom tym podlega światło, wykazując tym samym swą naturę falową, bowiem - światło jest falą elektromagnetyczną. Podstawę teorii fal elektromagnetycznych tworzą **dwa prawa Maxwella**, określające wzajemne powiązania pól elektrycznego i magnetycznego. W ujęciu jakościowym można sformułować je następująco:

*1. Wokół zmiennego pola magnetycznego o natężeniu  $H$  powstaje wirowe pole elektryczne o natężeniu  $E$ .*

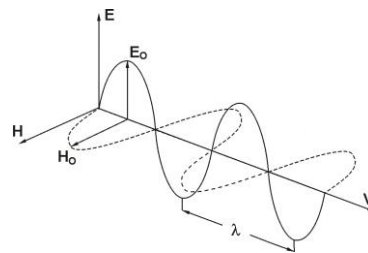
*2. Wokół zmiennego pola elektrycznego o natężeniu  $E$  powstaje wirowe pole magnetyczne o natężeniu  $H$ .*

Jeżeli w jakimkolwiek miejscu przestrzeni następuje zmiana natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego, to staje się to źródłem fali elektromagnetycznej.

*Fala elektromagnetyczna polega na rozchodzeniu się w przestrzeni wzajemnie powiązanych ze sobą okresowo zmiennych zaburzeń pola elektrycznego o natężeniu  $E$  oraz magnetycznego o natężeniu  $H$  (Rys.1.).*



Rys.1. Rozchodzenie się fali elektromagnetycznej



Rys.2. Rozmieszczenie wektorów E pola elektrycznego i H pola magnetycznego w fali elektromagnetycznej

Obraz graficzny fali elektromagnetycznej przedstawiony jest na Rys.2. Drgania wektorów natężeń pól elektrycznego  $E$  i magnetycznego  $H$  odbywają się we wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, przy czym wektory te są jednocześnie prostopadłe do wektora prędkości światła  $v$ . A zatem - **fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną**. W próżni fala elektromagnetyczna rozchodzi się z prędkością nazywaną **prędkością światła**:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \quad (1)$$

gdzie:  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni,  $\epsilon_0$  - stała dielektryczna próżni.

W ośrodkach materialnych prędkość  $v$  fali elektromagnetycznej jest mniejsza od prędkości w próżni i zależy od stałych materiałowych ośrodka, przy czym:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (2)$$

gdzie:  $\mu$  – przenikalność magnetyczna ośrodka,  $\epsilon$  – stała dielektryczna ośrodka,  $\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna ośrodka,  $\epsilon_r$  - względna stała dielektryczna ośrodka.

**Cechami charakterystycznymi fal** są: długość –  $\lambda$ , częstotliwość –  $\nu$ , okres –  $T=1/\nu$ , przy czym w próżni:

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu} \quad (3)$$

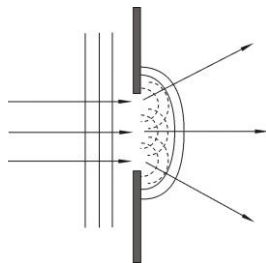
**Długość fali  $\lambda$**  – to droga przebyta przez falę w ciągu jednego okresu, lub też odległość między dwoma najbliższymi punktami przestrzeni mającymi tą samą fazę drgania wektora natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego (Rys.2.). Długość

fali zależy od prędkości rozchodzenia się fali w ośrodku. W próżni światło widzialne ma długość od  $\lambda=3,6 \cdot 10^{-7}m$  dla fioletu do  $\lambda=7,7 \cdot 10^{-7}m$  dla czerwieni.

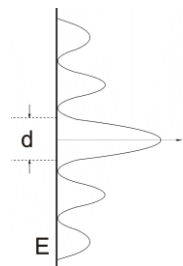
**Częstotliwość światła  $\nu$**  jest cechą nie zależną od rodzaju ośrodka w którym światło się rozchodzi. Częstotliwość mierzymy w hercach [Hz] , przy czym herc jest równy odwrotności sekundy  $1\text{Hz}=1/s$ . Światło widzialne ma częstotliwości od  $\nu=3,9 \cdot 10^{14}\text{Hz}$  dla czerwieni do  $\nu=8,3 \cdot 10^{14}\text{Hz}$  dla fioletu.

**Dowodami falowej natury światła** są zjawiska: ugięcia (dyfrakcji), nakładania się fal (interferencji) oraz porządkowania płaszczyzn drgań wektorów natężeń pól (polaryzacji). Dyfrakcja występuje przy przechodzeniu światła przez szczeliny o szerokości porównywalnej z długością fali świetlnej i polega na zmianie kształtu powierzchni falowej. Z fali płaskiej padającej na szczelinę powstaje fala zdeformowana o kształcie tym bardziej zbliżonym do kulistego (Rys.3.) im mniejsza jest szczelina. Zjawisko to wyjaśnia **zasada Huygensa** :

*każdy punkt przestrzeni do którego dociera czoło fali staje się źródłem nowej cząstkowej fali kulistej. Obwiednia fal cząstkowych tworzy nowe czoło fali.*



Rys. 3. Ugięcie (dyfrakcja) światła na szczelinie



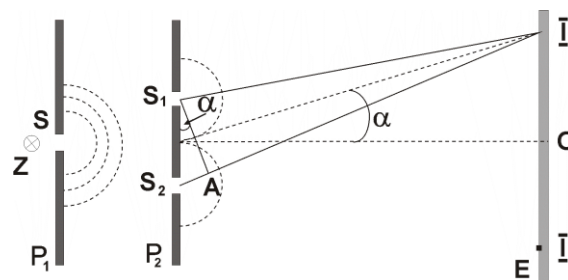
Rys.4. Rozkład natężenia oświetlenia ekranu przy ugięciu światła na jednej szczelinie

W wyniku ugięcia światło dochodząc do ekranu przenika również w tzw. strefę cienia geometrycznego (Rys.4.). Dokładne badania wykazały, że w strefie tej występują maksima i minima natężenia oświetlenia. Wyjaśnia to **zasada Fresnela**:

*nierównomierny rozkład energii (natężenia oświetlenia) w strefie cienia geometrycznego spowodowany jest interferencją fal cząstkowych. Gdy fale cząstkowe spotykają się w zgodnych fazach, następuje wzmocnienie i powstaje maksimum natężenia oświetlenia. Gdy nakładające się fale mają fazy*

*przeciwnie wówczas - ulegają wygaszeniu i powstaje minimum natężenia oświetlenia.*

Po raz pierwszy obrazy interferencyjne na ekranie zostały zaobserwowane w **doświadczeniu Younga** w 1801r. Początkowo próbował otrzymać obraz interferencyjny nakładając światło pochodzące z dwóch identycznych lamp, o tym samym natężeniu i tej samej barwie. Jednak próby te były nieudane. Maksima i minima interferencyjne na ekranie zaobserwował dopiero po przeprowadzeniu następującego doświadczenia (Rys.5).



Rys.5. Doświadczenie Younga

Monochromatyczne źródło światła  $Z$  znajdowało się za przesłoną  $P_1$  w której była szczelina  $S$ . Światło po dojściu do szczeliny ulegało ugięciu (dyfrakcji). Fala kulista biegnąca ze szczeliny  $S$  dochodziła do drugiej przesłony. W przesłonie  $P_2$  znajdowały się, w tej samej odległości od szczeliny  $S$ , dwie symetrycznie umieszczone szczeliny  $S_1$  i  $S_2$ . Wskutek tego do szczelin w każdej chwili dochodziły te same powierzchnie falowe, wywołując zjawisko dyfrakcji i powstanie fal kulistych. Fale te nakładały się (interferowały), w wyniku czego na ekranie otrzymano maksima i minima interferencyjne w postaci jasnych i ciemnych prążków. W środku ekranu znajduje się jasny prążek interferencyjny rzędu zerowego  $O$ . W miejscu tym nakładające się fale spotykają się w tej samej fazie, ponieważ pokonują takie same drogi  $S_1O=S_2O$ . Wskutek tego ulegają wzmocnieniu. Następny jasny prążek znajduje się w miejscu  $I$ . Jest to prążek interferencyjny rzędu pierwszego, ponieważ różnica dróg optycznych pokonywanych przez nakładające się promienie jest równa jednej długości fali świetlnej

$$\Delta S = S_2A = S_2I - S_1I = \lambda.$$

Odległość między szczelinami  $S_1S_2=d$  - to stała siatki. Trójkąt  $S_1AS_2$  powstały w wyniku odcięcia odcinka  $AI=S_1I$  jest w przybliżeniu trójkątem prostokątnym (Rys.5). Kąt przy wierzchołku  $S_1$  oznaczamy jako  $\alpha$ . Wobec tego  $\Delta S=d \cdot \sin \alpha$ . A zatem warunek powstania prążka interferencyjnego pierwszego rzędu zapisujemy równaniem

$$d \sin \alpha = \lambda$$

**Jasne prążki interferencyjne** wyższych rzędów powstają gdy różnica ich dróg optycznych jest całkowitą wielokrotnością długości fali - wówczas nakładające się fale mają zgodne fazy.

A zatem warunek powstawania jasnych prążków interferencyjnych można zapisać równaniem:

$$d \sin \alpha = n\lambda \quad (1)$$

gdzie:  $n=0,1,2,3,\dots$ .

Natomiast

**ciemne prążki interferencyjne** odpowiadające całkowitemu wygaszeniu powstają gdy nakładające się fale mają przeciwne fazy, tzn. - gdy różnica dróg optycznych jest równa nieparzystej wielokrotności połowy długości fali  $\Delta S=(n+0,5)\lambda$ .

A zatem warunek powstawania ciemnych prążków interferencyjnych opisany jest równaniem:

$$d \sin \alpha = (n + 0,5)\lambda \quad (2)$$

gdzie:  $n=0,1,2,3,\dots$ .

Young mógł zaobserwować prążki interferencyjne dzięki temu, że:

nakładające się **fale** były **spójne**, tzn. miały tą samą: amplitudę, częstotliwość i stałą różnicę faz w miejscu spotkania. Warunek spójności (koherentności) jest warunkiem koniecznym do zaobserwowania prążków interferencyjnych.

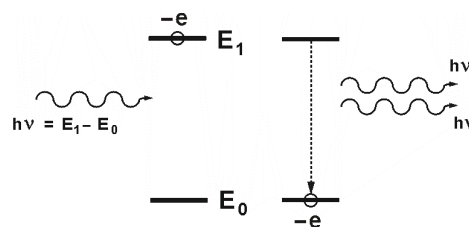
Spełnienie tego warunku jest konsekwencją pewnej ułomności oka człowieka polegającej na tym, że nie rozróżniamy obrazów jako oddzielnych, jeżeli zmieniają się one z częstotliwością większą od 12Hz. Dzięki temu patrząc na ekran filmowy odbieramy wrażenie ciągłości akcji, chociaż powstaje to w wyniku „rzucania” na ekran oddzielnych klatek filmowych. Jeżeli nakładają się fale niespójne to wówczas

nie można zaobserwować obrazów interferencyjnych. W doświadczeniu Younga szczeliny  $S_1$  i  $S_2$  pełniły rolę dwóch źródeł światła spójnego. Jeżeli w przesłonie jest więcej szczelin wówczas następuje wyostrenie obrazu interferencyjnego. Na ekranie otrzymuje się tylko jasne prążki oddzielone od siebie obszarami całkowitego wygaszenia.

Taki efekt uzyskamy również wtedy, gdy siatka dyfrakcyjna zostanie bezpośrednio oświetlona światłem laserowym. Działanie lasera polega na wykorzystaniu zjawiska wymuszonej emisji promieniowania. Słowo **laser** pochodzi od pierwszych liter angielskiej nazwy: *Ligth Amplification by Stimulated Emission of Radiation* co oznacza – **wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania**. Jeżeli substancja zostanie naświetlona promieniowaniem monochromatycznym o energii fotonów równej różnicy energii poziomów energetycznych

$$h\nu = E_1 - E_0$$

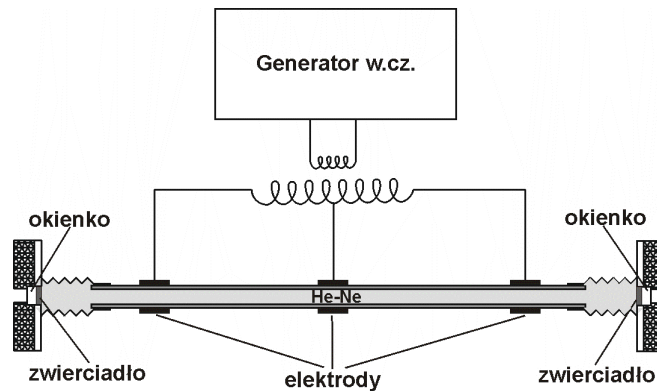
to wówczas następuje przyspieszenie przejścia atomu ze stanu wzbudzonego o energii  $E_1$  do stanu podstawowego o energii  $E_0$  (Rys.6). Emitowane fotony mają tę samą energię (częstotliwość), są identycznie spolaryzowane i mają taką samą fazę jak fotony wymuszające. Oznacza to, że obydwa rodzaje kwantów są ze sobą spójne. Jeżeli w naświetlonej substancji wystąpi szczególna sytuacja nazywana **inwersją obsadzeń** poziomów energetycznych polegająca na tym, że ilość atomów w stanie wzbudzonym jest większa od ilości atomów w stanie podstawowym, wówczas otrzymujemy zwiększenie natężenia promieniowania wymuszonego, tzn. uzyskujemy akcję laserową.



Rys.6. Wymuszona emisja promieniowania

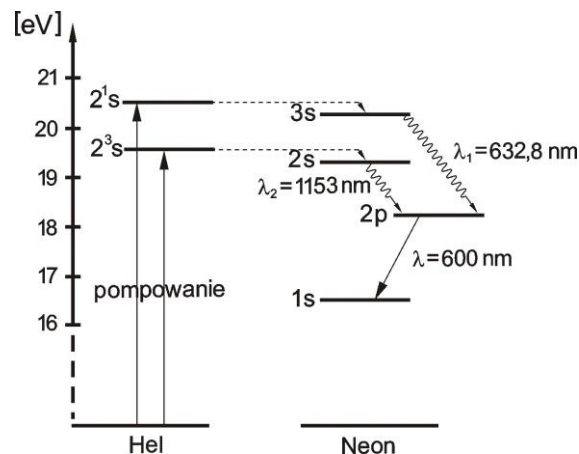
Jednym z najczęściej stosowanych laserów w laboratoriach naukowych jest laser helowo-neonowy. W próżniowej rurze do wyładowań znajduje się mieszanina helu i neonu (Rys.7). Inwersję obsadzeń stanów energetycznych przez elektrony

(pompowanie optyczne) odbywa się dzięki jarzeniowemu wyładowaniu elektrycznemu zachodzącemu w rurze.



Rys.7. Schemat budowy lasera helowo-neonowego

W laserze tym do generacji promieniowania wymuszonego wykorzystywane są przejścia między poziomami energetycznymi neonu. Natomiast hel jest gazem buforowym niezbędnym przy pompowaniu optycznym. Najpierw w wyniku zderzeń z rozprzeczonymi elektronami wzbudzone są atomy helu, które następnie zderzając się z atomami neonu powodują ich wzbudzenie. W wyniku tego otrzymuje się inwersję obsadzeń na poziomach  $2s$  i  $3s$  neonu.



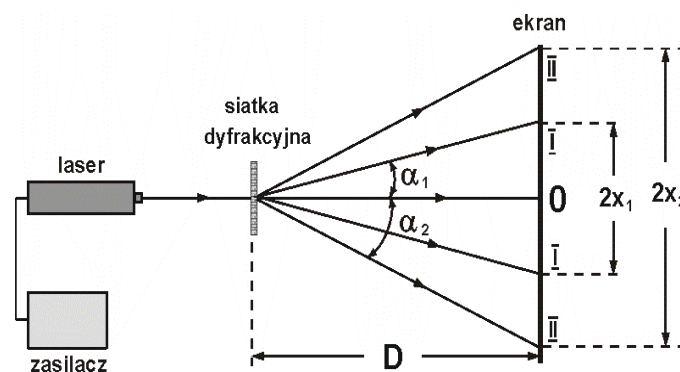
Rys.8. Układ poziomów energetycznych lasera He-Ne z głównymi liniami promieniowania laserowego

Na Rys.8 przedstawione są poziomy energetyczne helu i neonu biorące udział w akcji laserowej oraz zaznaczone są przeskoki elektronów między poziomami generujące emisję promieniowania. Największą moc promieniowania lasera He-Ne

otrzymuje się dla fal o długościach:  $\lambda_2=1,153\cdot 10^{-6}m$ , leżącej w podczerwieni oraz  $\lambda_1=6,328\cdot 10^{-7}m$  odpowiadającej widzialnemu światłu czerwonemu. Laser He-Ne wysyła promieniowanie w sposób ciągły dopóty dopóki zachodzi w nim wyładowanie jarzeniowe. Stosując układ odpowiednio skonstruowanych zwierciadeł otrzymuje się promieniowanie tylko o jednej długości fali  $\lambda_1$ .

## POMIARY I OPRACOWANIE WYNIKÓW

Schemat układu pomiarowego przedstawiony jest na Rys.9. Światło z lasera helowo-neonowego oświetla siatkę dyfrakcyjną. Na ekranie, umieszczonym w odległości  $D$  od siatki, powstają jasne prążki interferencyjne. Prążek nieugięty rzędu zerowego powstaje na osi wiązki światła lasera. Symetrycznie wokół niego rozmieszczone są prążki rzędu pierwszego  $I$  oraz wyższych rzędów  $II, III, \dots$ . Znajdują się one od prążka zerowego w odległościach  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  tworząc z jego kierunkiem kąty  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ .



Rys.9. Schemat układu pomiarowego

Aby obliczyć stałą siatki korzystamy z równania opisującego warunek powstawania jasnych prążków interferencyjnych

$$d \sin \alpha = k\lambda$$

ponieważ  $\sin \alpha = \frac{x_n}{\sqrt{D^2 + x_n^2}}$

zatem

$$\boxed{d = \frac{k\lambda}{x_n} \sqrt{D^2 + x_n^2}} \quad (3)$$



Natomiast liczba rys  $N$  na jednym milimetrze siatki jest równa odwrotności stałej siatki  $d$  wyrażonej w milimetrach:

$$\boxed{N = \frac{1}{d}} \quad (4)$$

Aby zrealizować cel ćwiczenia należy:

A. Wyznaczenie stałej siatki oraz liczby rys na 1mm siatki

1. Umieścić siatkę dyfrakcyjną w uchwycie na ławie optycznej i włączyć zasilacz lasera.

**UWAGA: nie wolno patrzeć w otwór pracującego lasera, gdyż grozi to ciężkim uszkodzeniem oka!!!.**

2. Wyregulować ustawienie lasera oraz siatki tak aby jasny prążek rzędu zerowego był w środku ekranu, a prążki wyższych rzędów były względem niego symetrycznie ustawione.
3. Umieścić na ekranie kartkę papieru formatu A-4 i ołówkiem lub cienkopisem zaznaczyć położenie prążków interferencyjnych rzędu zerowego oraz rzędów: *I*, *II*, *III*.
4. Zmierzyć odległości  $D$  oraz  $2x_n$  między prążkami tego samego rzędu wyrażając je w milimetrach. Wyniki pomiarów wpisać do tabeli (*Tab.1*).
5. Powyższe pomiary przeprowadzić dodatkowo jeszcze dla dwóch innych położzeń siatki.

Tabla 1.

D [mm]	k	$2x_n$ [mm]	$x_n$ [mm]	d [mm]	$d_{\text{śr}}$ [mm]	N [1/mm]
	1. 2. 3.					
	1. 2. 3.					
	1. 2.					

	3.					
--	----	--	--	--	--	--

**UWAGA!!! Po skończonych pomiarach wyłączyć zasilanie lasera.**

6. Dla każdego pomiaru obliczyć stałą siatki  $d$ , korzystając ze wzoru (3). Obliczyć wartość średnią  $d_{sr}$ . Obliczyć również liczbę  $N$  rys na jednym milimetrze siatki, korzystając ze wzoru (4). Do obliczeń przyjąć  $\lambda = 6,328 \cdot 10^{-4} \text{mm}$ .
7. Obliczyć metodą różniczkową niepewności bezwzględną oraz względną jaką obarczony jest wynik uzyskany dla stałej siatki, przyjmując że niepewności pomiarów  $D$  i  $x$  są sobie równe i mają wartość:  $\Delta D = \Delta x = 2 \text{mm}$ . Analizę niepewności przeprowadzić dla zbioru danych prowadzących do wyniku najbliższego średniej.

**B. wyznaczenie długości fali światła lasera w oparciu o stałą siatki dyfrakcyjnej.**

1. Postępować tak, jak w punktach 1-7 czynności A znając stałą  $N$  podaną przez prowadzącego ćwiczenia i wpisując do tabeli 2 wartości otrzymane z pomiarów.

Tabela 2

D [mm]	k	$2x_n$ [mm]	$x_n$ [mm]	N [1/mm]	$\lambda$ [mm]	$\lambda_{sr}$ [mm]
	1.					
	2.					
	3.					
	1.					
	2.					
	3.					
	1.					
	2.					
	3.					

1. Obliczyć metodą różniczkową niepewności bezwzględną oraz względną jaką obarczony jest wynik uzyskany dla stałej siatki, przyjmując że niepewności pomiarów  $D$  i  $x$  są sobie równe i mają wartość:  $\Delta D = \Delta x = 2 \text{mm}$ . Analizę niepewności przeprowadzić dla zbioru danych prowadzących do wyniku najbliższego średniej.

2. Porównać otrzymane wyniki z długością fali światła lasera z uwzględnieniem obliczonych niepewności.

## ZAGADNIENIA

Prawa Maxwella – jakościowo. Fale elektromagnetyczna – mechanizm powstawania i rozchodzenia, prędkość, długość fali. Ugięcie (dyfrakcja) światła. Zasada Huygensa-Fresnela. Interferencja światła, doświadczenie Younga. Warunki konieczne do powstawania jasnych oraz ciemnych prążków interferencyjnych – równania. Spójność (koherentność) światła. Siatka dyfrakcyjna. Laser He-Ne. Emisja wymuszona, inwersja obsadzeń.