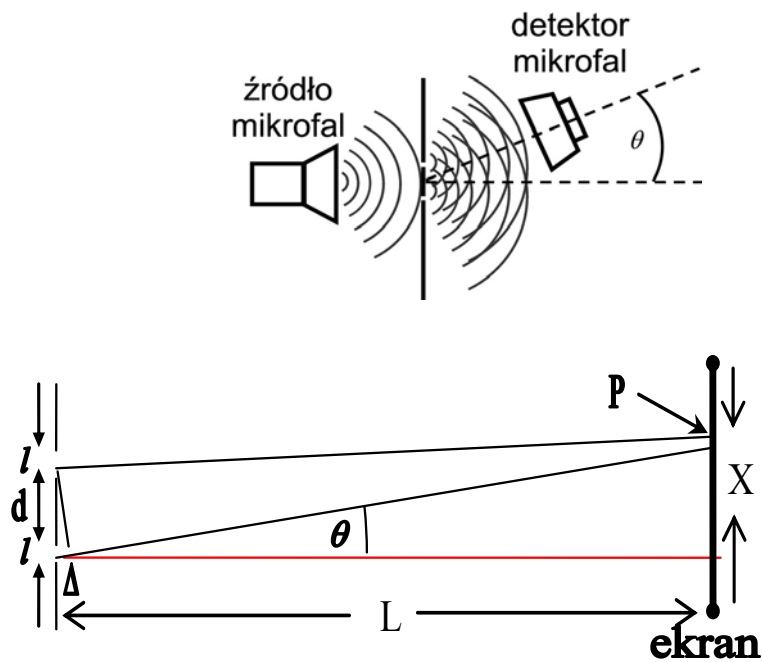


## ZADANIE F2

# DOŚWIADCZENIE YOUNGA Z UŻYCIEM MIKROFAL



Rys. 1 Schemat układu doświadczalnego.

Fala elektromagnetyczna (światło, mikrofałe) po przejściu przez dwie blisko położone (odległe o  $d$ ) szczeliny o szerokości  $l$  pada na ekran (rys.1). Widoczny na ekranie rozkład natężenia mikrofal jest wynikiem dyfrakcji i interferencji. Ponieważ szczeliny mają określoną szerokość, dla każdego punktu ekranu należy zsumować fale pochodzące z ich różnych obszarów.

Jeżeli na punkt  $P$  ekranu padają dwie wiązki monochromatyczne o długości fali  $\lambda$  i wektorach elektrycznych  $E_1$  i  $E_2$ , to wektor wypadkowego pola elektrycznego w tym punkcie jest równy

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2.$$

Natężenie fali  $I$  w przybliżeniu jest równe  $\langle E^2 \rangle$ , gdzie  $\langle \rangle$  oznacza wartość średnią w czasie. Zatem

$$I = \langle E^2 \rangle, \quad I_1 = \langle E_1^2 \rangle \quad \text{i} \quad I_2 = \langle E_2^2 \rangle.$$

Ponieważ

$$\langle E^2 \rangle = \langle E_1^2 \rangle + \langle E_2^2 \rangle + 2 \langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle,$$

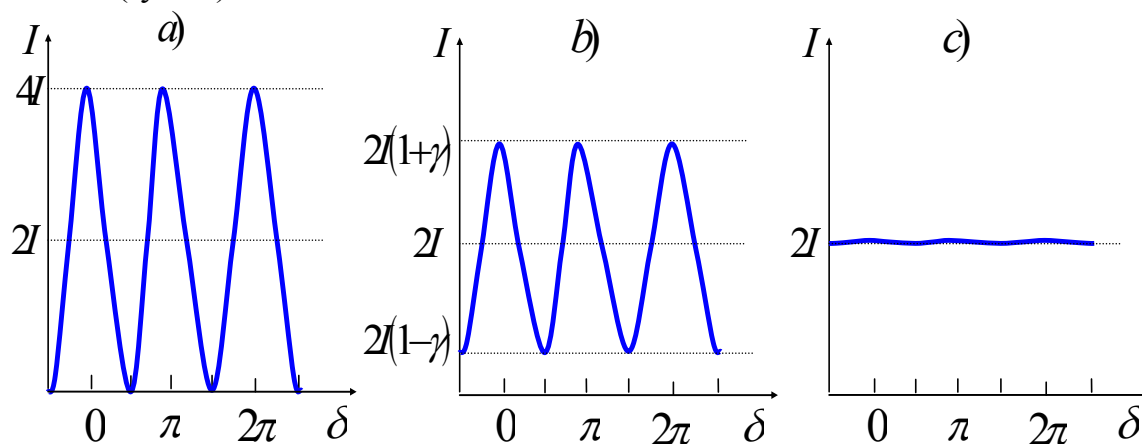
natężenie fali wypadkowej wynosi

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \delta \rangle, \quad (1)$$

gdzie  $\delta$  jest różnicą faz w punkcie  $\mathbf{P}$  między dwiema wiązkami światła, które przebyły drogi optyczne różniące się o  $\Delta s$ . Zatem

$$\delta = 2\pi \Delta s / \lambda \quad (2)$$

Z równań (1) i (2) widać wyraźnie, że przy jednakowych natężeniach obu wiązek i zgodności ich faz ( $\delta = 0, 2\pi, 4\pi \dots$ ) w punkcie  $\mathbf{P}$  obserwuje się maksimum natężenia  $I = 4I_1 = 4I_2$ , a przy niezgodności ( $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi \dots$ ) występuje minimum natężenia światła  $I = 0$ . Oznacza to, że wiązki mikrofal interferują ze sobą – mówimy wtedy, że wiązki są spójne. Na ekranie widzimy prążki jasne i ciemne (rys.2a).



Rys. 2. Wypadkowe natężenie dwóch interferujących wiązek w zależności od różnicy faz między nimi. Kontrast obrazu interferencyjnego (widzialność prążków) dla wiązek: a) całkowicie spójnych, b) częściowo spójnych, c) niespójnych.

Jeżeli między fazami wiązek nie ma żadnego związku lub zmiana ich faz ma charakter przypadkowy, to  $\langle \cos \delta \rangle = 0$  i wiązki światła są niespójne. Wówczas  $I = I_1 + I_2$  i nie obserwuje się obrazu interferencyjnego; ekran jest oświetlony jednolicie (rys.2c).

W przypadku, gdy wiązki światła są częściowo spójne, natężenie wypadkowe  $I$  zmienia się w granicach węższych niż od 0 do  $4I_1$ , a równanie interferencji (1) przybiera postać

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1I_2}\langle\cos\delta\rangle \quad (3)$$

gdzie wielkość  $\gamma$  przyjmuje wartość z zakresu

$$0 \leq \gamma \leq 1.$$

Wielkość  $\gamma$  jest współczynnikiem charakteryzującym stopień spójności interferujących wiązek i jednocześnie kontrast obrazu interferencyjnego (rys.2b). Dla  $I_1 = I_2$  maksima i minima natężenia prążków interferencyjnych są równe odpowiednio:

$$I_{\max} = 2I_1(1 + \gamma)$$

$$I_{\min} = 2I_1(1 - \gamma)$$

Zatem

$$\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (4)$$

Kiedy  $\gamma = 1$  wiązki są całkowicie spójne i wtedy  $I_{\max} = 4I_1$ , a  $I_{\min} = 0$ . Dla niespójnych wiązek ( $\gamma = 0$ )  $I_{\max} = I_{\min} = 2I_1$ .

Gdy źródłami wiązek mikrofal są dwie nieskończenie wąskie szczeliny odległe od siebie o  $d$  i umieszczone w dużej odległości  $L$  od ekranu, wówczas w punkcie  $\mathbf{P}$  różnica ich dróg optycznych (rys. 1) wynosi

$$\Delta s = d \sin \theta \quad (5)$$

a natężenie fali wypadkowej wyraża się wzorem

$$I = I_1 + I_2 + 2\gamma\sqrt{I_1I_2} \cos \left( 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} \right) \quad (6)$$

Jeśli wąskie szczeliny są oświetlone jednakowo, to znaczy gdy  $I_1 = I_2$  mamy

$$I = 2I_1 \left[ 1 + \gamma \cos \left( 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} \right) \right] \quad (7)$$

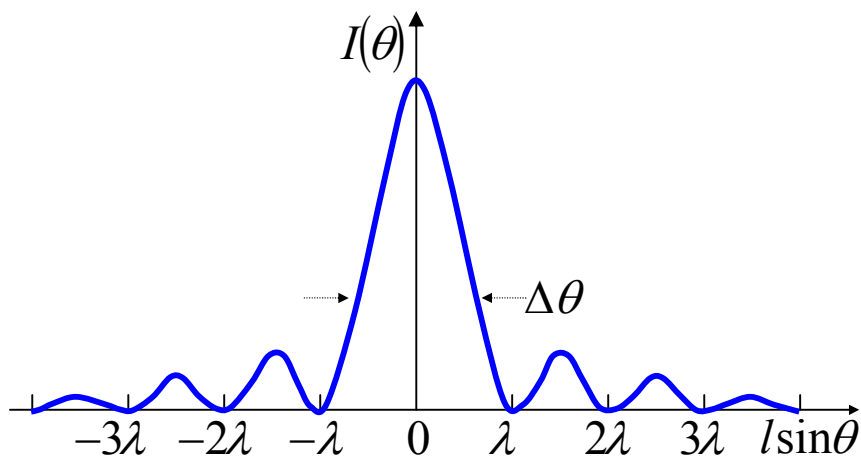
Tylko w takim wypadku można zmierzyć parametr  $\gamma$ . Mamy wówczas sytuację zilustrowaną rys.2a lub 2b. W rzeczywistości nigdy nie mamy do czynienia z nieskończeniem wąskimi szczelinami (nieskończenie wąska szczelina nie przepuszcza światła). Jeśli pojedynczą szczelinę o szerokości  $l$  oświetlimy płaską falą monochromatyczną to na ekranie położonym daleko od szczeliny zaobserwujemy rozkład natężenia (patrz rys. 3):

$$I = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (8)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{\pi l \sin \theta}{\lambda} \quad (9)$$

Zjawisko to nazywamy dyfrakcją światła na szczelinie, a jasne i ciemne pasy prążkami dyfrakcyjnymi. Pierwsze zero natężenia pojawia się dla kąta  $\theta$  spełniającego warunek  $l \sin \theta / \lambda = 1$ , co w przybliżeniu  $\theta \ll 1$  można zapisać jako  $\theta = \lambda / l$ . Dla dwóch równoległych szczelin obserwujemy oba efekty równocześnie: dyfrakcję światła na każdej ze szczelin oraz interferencję fal pochodzących od równoległych szczelin.



Rys. 3 Rozkład natężenia światła ugiętego na szczelinie o szerokości  $l$ .

Rozkład natężenia światła, obserwowany na ekranie, dany jest wtedy wyrażeniem:

$$I = 2I_0 [1 + \gamma \cos 2\pi(d \sin \theta / \lambda)] \cdot \left[ \frac{\sin(\pi l \sin \theta / \lambda)}{\pi l \sin \theta / \lambda} \right]^2 \quad (10)$$

Wyrażenie (10) jest iloczynem równań (7) i (8).

Ponieważ w przeprowadzonym doświadczeniu odległość między szczelinami  $d$  jest wielokrotnie większa od ich szerokości  $l$ , obserwowany na odległym ekranie obraz jest taki, jaki byłby w przypadku szczelin nieskończenie wąskich, lecz dodatkowo jest on zmodulowany rozkładem natężenia światła ugiętego na pojedynczej szczelinie. Obserwowany rozkład natężenia jest opisany równaniem (10) i zilustrowany rys.4.

Mierząc odległość  $x$  k-tego prążka od środka obrazu interferencyjnego ze wzorów

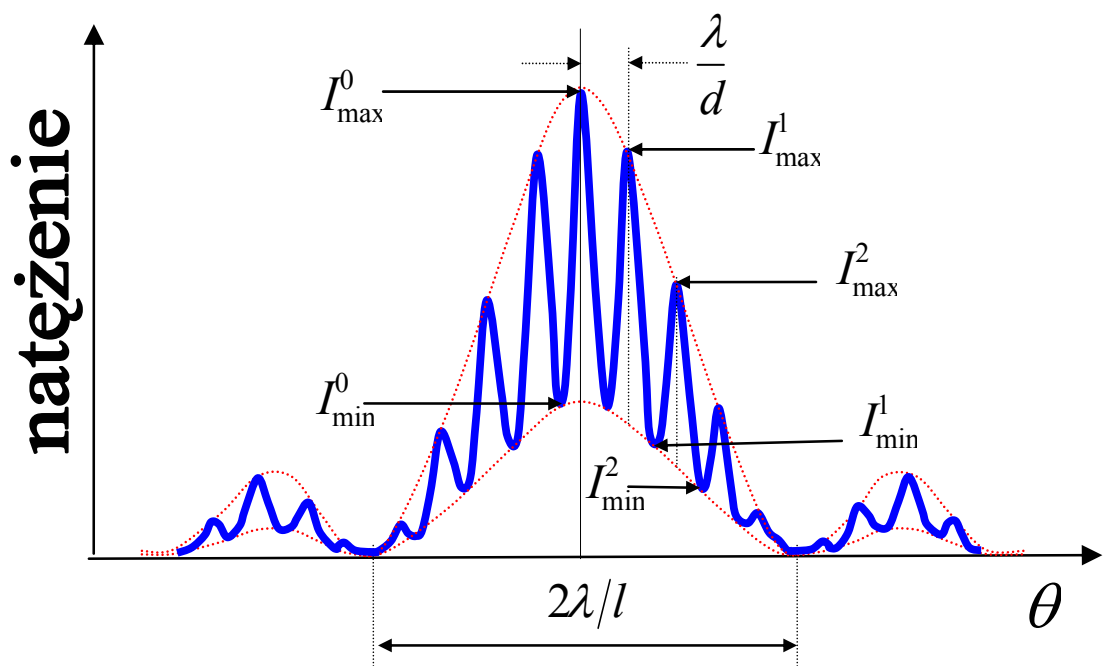
$$d \sin \theta = k\lambda \quad (11)$$

i

$$\sin \theta = \frac{k\lambda}{d} \quad (12)$$

można powiązać kąt obserwacji maksimum z odległością między szczelinami  $d$ . Natomiast pomiar odległości  $x'$  od środka obrazu interferencyjnego do pierwszego minimum modulacji, spowodowanej dyfrakcją, pozwala powiązać kąt obserwacji z szerokością szczeliny  $l$ ,

$$\sin \theta = \lambda/l \quad (13)$$



Rys. 4 Rozkład natężenia światła przechodzącego przez dwie wąskie szczeliny umieszczone w odległości  $d$  od siebie, o o szerokości każdej z nich  $l$ , ustawione w dużej odległości  $L$  od ekranu.

Przy małej szerokości szczeliny względem odległości między szczelinami nie będziemy obserwowali modulacji.

Uwaga: szerokość szczelin i odległości między szczelinami możesz wybrać samodzielnie. Zaleca się jednak rozpoczęcie pomiarów od dużej odległości między szczelinami (np. 8 cm).

## 2. Układ doświadczalny

W skład układu pomiarowego wchodzi:

- nadajnik mikrofal
- odbiornik mikrofal
- obrotowe mocowanie płytki ze szczelinami
- soczewka z gliceryny

## 3. Wykonanie ćwiczenia

- Podłączyć miernik do detektora.
- Włączyć zasilanie generatora mikrofal i miernika. Ustawić na mierniku pomiar wysokich częstotliwości.
- Ustawić detektor na wprost generatora i zmierzyć natężenie wiązki mikrofal ustawiając optymalny zakres miernika.
- Wstawić szczeliny na wiązkę mikrofal dobierając ich szerokość oraz odległość.
- Wstawić między nadajnik mikrofal a mocowanie z płytkami soczewkę. Tak zmienić jej pozycję, by wybrać optymalne ustawienie. Porównać otrzymane wartości z przypadkiem bez soczewki (dokonać wyboru metody)
- Dokonać pomiarów maksimumów i minimumów interferencyjnych w możliwie szerokim zakresie kątowym. Zaleca się także zagęszczenie punktów pomiarowych między wartościami min. i max.
- Do danych doświadczalnych dopasować krzywą zadaną równaniem (10). Wyznaczyć parametry  $\lambda$  oraz  $\gamma$ . Skomentować otrzymane wartości.
- Porównać obraz interferencyjny otrzymany w doświadczeniu z obrazem zadanym równaniem (10) dla parametrów  $\gamma=1$  oraz  $\lambda=3$  cm.

**UWAGA!** Należy unikać stawiania na linii wiązki mikrofal, aby nie stać się „konkurencyjnym reflektorem” i w ten sposób nie zafałszować wyników!

### Literatura:

- F. S. Crawford, Jr., *Fale*, PWN Warszawa 1972 (rozdział 9: “Interferencja i dyfrakcja”)
- J. Nowak, M. Zając, *Optyka – kurs elementarny*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.

### Zadania do ćwiczeń z falami elektromagnetycznymi

1. Płaska fala elektromagnetyczna rozchodzi się wzdłuż osi  $x$ . Narysuj odpowiadający jej rozkład pola elektrycznego i magnetycznego.
2. Wyznacz zakres energii promieniowania elektromagnetycznego odpowiadający zakresowi długości fali od 1 mm do 1 m (zakres mikrofalowy). Wynik wyraż w dżulach i elektronowoltach.
3. Dane są dwa punktowe źródła światła oddalone od siebie o  $l$ . Źródła promieniują synchronicznie fale o długości  $\lambda$ . W odległości  $d$  od źródeł ustawiono ekran, na którym obserwuje się prążki interferencyjne, przy czym  $d \gg l, \lambda$ , a ekran ustawiono prostopadle do symetralnej odcinka łączącego źródła. Obliczyć odległość między prążkiem centralnym a kolejnym prążkiem interferencyjnym.
4. Niespolaryzowana wiązka światła pada na płytkę szklaną o współczynniku załamania  $n$ . Pod jakim kątem należy skierować wiązkę aby wiązka odbita była całkowicie spolaryzowana.
5. Fala elektromagnetyczna o wektorze falowym  $\mathbf{k}$  i częstości  $\omega$  rozchodzi się w próżni w kierunku  $\mathbf{r}$ . Polaryzacja fali określona jest przez wektor  $\boldsymbol{\sigma}$ , a amplituda jest równa  $E$ . Podaj wyrażenie opisujące zależność pola elektrycznego i magnetycznego od położenia i czasu.