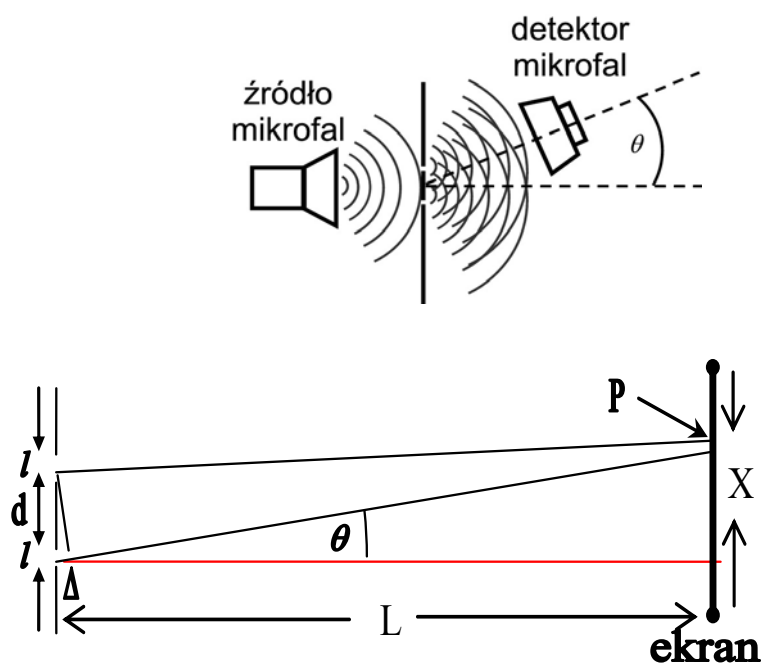


ZADANIE 111

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 λ 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

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

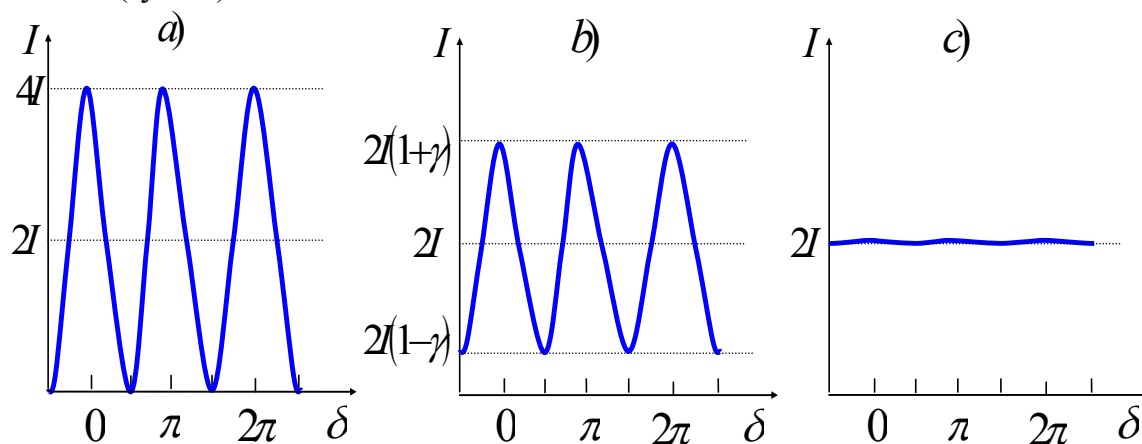
natężenie fali wypadkowej wynosi

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

gdzie δ jest różnicą faz w punkcie \mathbf{P} między dwiema wiązkami światła, które przebyły drogi optyczne różniące się o Δs . 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 γ przyjmuje wartość z zakresu

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

Wielkość γ 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

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

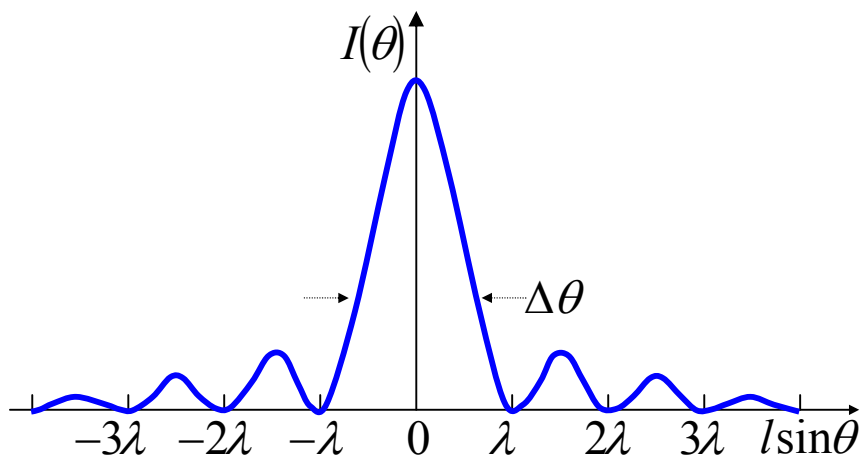
Tylko w takim wypadku można zmierzyć parametr γ . Mamy wówczas sytuację zilustrowaną rys.2a lub 2b. W rzeczywistości nigdy nie mamy do czynienia z nieskończeniem wąskimi szczelinami (nieskończenie wąska szczelina nie przepuszcza światła). Jeśli pojedynczą szczelinę o szerokości l oświetlimy płaską falą 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 θ 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

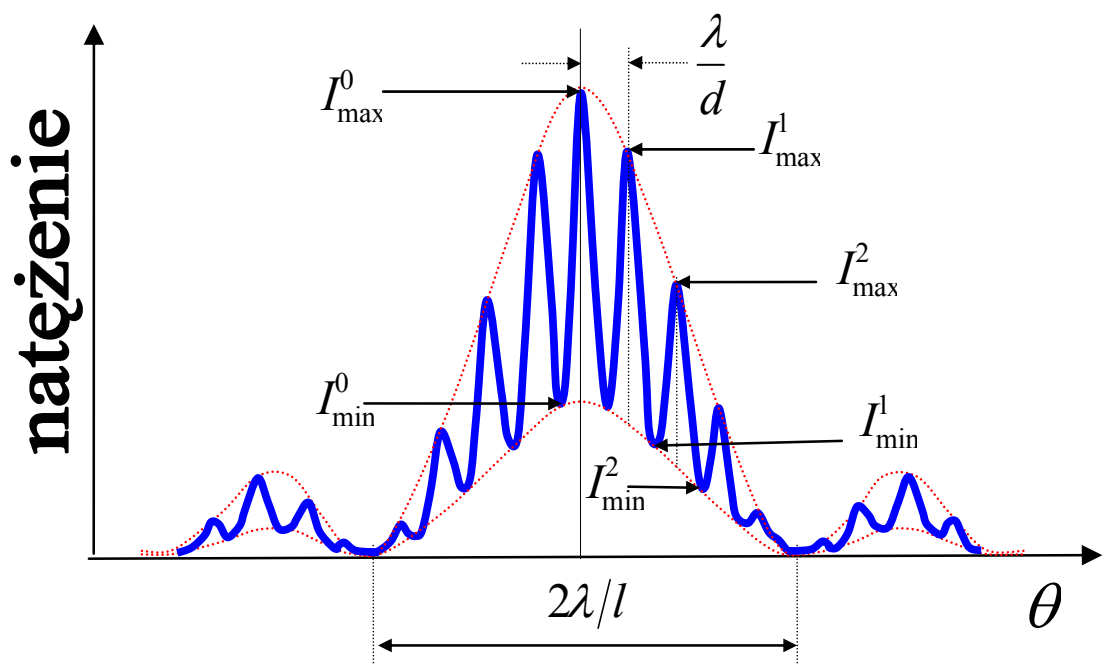
$$d \sin \theta = k\lambda \quad (11)$$

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 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 $(10)^A$. Wyznaczyć parametry λ oraz γ . 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 zafalszować 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 λ . 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 ω 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.