

Badanie własności fal elektromagnetycznych mikrofalowego obszaru widmowego

Monika Kubek

Numer indeksu: 270018

Pomiary przeprowadzono dnia 10 III 2017 roku na II Pracowni Fizycznej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Celem doświadczenia było badanie właściwości fal elektromagnetycznych z obszaru mikrofalowego. Dokonano pomiaru długości fali z doświadczenia Younga, zbadano polaryzację mikrofal i wpływ polaryzatora na natężenie fali przechodzącej oraz dokonano obserwacji zjawiska ewanescencji.

I. WSTĘP

Promieniowanie elektromagnetyczne, mikrofałe

Promieniowanie elektromagnetyczne jest to rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego. Składowa elektryczna i magnetyczna fali indukują się wzajemnie i są do siebie prostopadłe. Zmieniające się pole elektryczne wytwarza zmieniające się pole magnetyczne i odwrotnie. Właściwości fal elektromagnetycznych zależą od długości fali. Promieniowaniem elektromagnetycznym o różnej długości fali są fale radiowe, mikrofałe, podczerwień, światło widzialne, ultrafiolet, promieniowanie rentgenowskie i promieniowanie gamma. W opisie kwantowym promieniowanie elektromagnetyczne jest traktowane jako strumień nieposiadających masy cząstek elementarnych zwanych fotonami. Promieniowanie elektromagnetyczne przejawia właściwości fali ulegając interferencji, dyfrakcji, spełnia prawo odbicia i załamania.

Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych opisują równania Maxwella. Są to cztery podstawowe równania elektrodynamiki klasycznej, które opisują zależność pola elektrycznego \vec{E} i magnetycznego \vec{B} . W ośrodkach liniowych przyjmują one następującą postać

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\dot{\vec{B}}, \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{j} + \frac{1}{c^2} \dot{\vec{E}}, \quad (4)$$

gdzie ρ to gęstość ładunku, μ , ϵ to kolejno przenikalność magnetyczna i elektryczna ośrodka, które łączy zależność z prędkością światła w próżni $\mu\epsilon = 1/c^2$.

Mikrofałe są jednym z wielu rodzajów promieniowania elektromagnetycznego. Mieszczą się w przedziale długości fali od metra do milimetra. Wytwarza się je za pomocą odpowiednich lamp mikrofalowych (np. kliszon, magnetron) lub diod (np. dioda Gunna).

Fala generowana przez kliszon jest liniowo spolaryzowana. Jeżeli fala rozchodzi się w kierunku osi z , a wektor natężenia pola elektrycznego jest skierowany wzdłuż osi x to propagację można opisać wzorem

$$E_x(z, t) = E_{0x} e^{i(\omega t - kz)}, \quad (5)$$

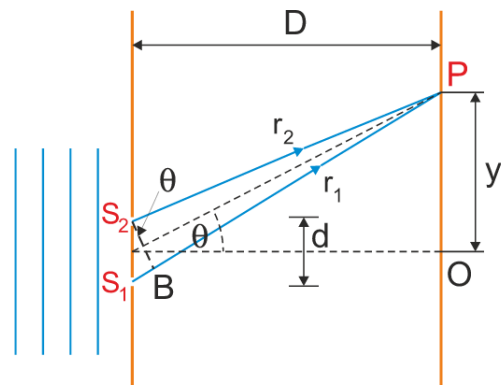
gdzie ω to częstość kołowa, a k to wartość wektora faliowego. I analogicznie dla pola magnetycznego

$$H_y(z, t) = H_{0y} e^{i(\omega t - kz)}. \quad (6)$$

Promieniowanie mikrofalowe ma bardzo szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach życia, a przede wszystkim w telekomunikacji. Większość światowych danych, telewizja i telefonia są transmitowane na długie dystanse w częstotliwościach mikrofalowych za pomocą naziemnych stacji i satelitów telekomunikacyjnych. Stosuje się je także w nawigacji satelitarnej. Radary mikrofalowe są powszechnie używane do takich zastosowań jak kontrola ruchu lotniczego, prognozowanie pogody, nawigacja statków czy kontrola prędkości. Ważną dziedziną badań nieba jest radioastronomia, gdzie badania mikrofalowego promieniowania tła dostarczają między innymi informacji na temat procesów jakie zachodziły w młodym wszechświecie, a także umożliwiają oszacowanie jego wieku. Promieniowania o częstotliwościach mikrofalowych używa się do podgrzewania. Przykładem tutaj jest używana przez wielu kuchenka mikrofalowa, a także różne zaawansowane urządzenia w których generuje się plazmę.

Doświadczenie Younga

Jest to eksperyment polegający na przepuszczeniu fali koherentnej przez dwie blisko siebie położone szczeliny (zakładamy, że szerokość szczeliny $a \ll \lambda$). Wskutek interferencji nakładających się na siebie fal kulistych na ob-



Rysunek 1: Schemat doświadczenia Younga z ref. [3]. Fale wychodzą ze szczelin S_1 , S_2 i interferują w punkcie P .

szarze za szczelinami światło jest wygaszane lub wzmacniane.

Przeanalizujemy teraz to doświadczenie (rys. 1). Zakładamy, że padające światło jest monochromatyczne i długość fali wynosi λ . P jest dowolnym punktem na ekranie, a jego odległość od szczelin wynosi r_1 i r_2 . Ponieważ $d \ll D$ to możemy skorzystać z przybliżenia małych kątów i $\theta \approx S_1 S_2 B$. Promienie z obu szczelin pokonują różną drogę docierając do punktu P , więc ich różnice faz w tym punkcie mogą być różne - decyduje o tym różnica dróg optycznych $S_1 B$. Warunek na maksymalne wzmocnienie wynosi więc

$$S_1 B = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

pojawia się gdy odcinek $S_1 B$ zawiera całkowitą wielokrotność długości fali. Ze schematu widzimy także, że $S_1 B = d \sin \theta$ co ostatecznie daje nam

$$d \sin \theta = m\lambda. \quad (8)$$

Polaryzacja

Polaryzacja fali elektromagnetycznej to charakterystyczne zachowanie się kierunków wektorów pola elektrycznego i magnetycznego. Przyjęto, że polaryzację fali elektromagnetycznej określa się dla jej składowej elektrycznej. W zależności od tego jak zmienia się orientacja drgań wektora elektrycznego określamy rodzaj polaryzacji: liniowa, kołowa, eliptyczna. Zjawisko polaryzacji jest charakterystyczne dla fal poprzecznych.

Polaryzator jest to urządzenie optyczne, które przepuszcza składową światła o określonej płaszczyźnie polaryzacji. Jeżeli wektor \vec{E} wyznaczający płaszczyznę drgań tworzy kąt θ z kierunkiem polaryzacji płytki to przepuszczana jest składowa równoległa $E_{||} = E \cos \theta$ podczas gdy składowa prostopadła $E_{\perp} = E \sin \theta$ jest pochłaniana.

Ewanescentcja

Rysunek 2 przedstawia falę rozchodzącą się w płaszczyźnie XY , padającą na granicę dwóch ośrodków pod pewnym kątem α_I . Podstawowe prawa optyki mówią, że kąt padania jest równy kątowi odbicia

$$\alpha_I = \alpha_R, \quad (9)$$

spełnione jest także prawo Snella

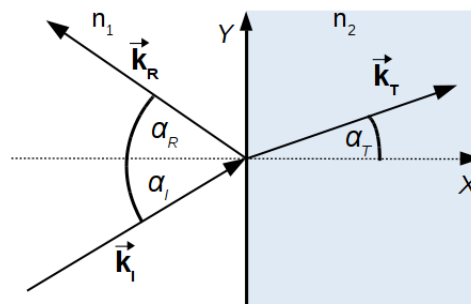
$$n_1 \sin \alpha_I = n_2 \sin \alpha_T, \quad (10)$$

a częstość fali jest niezmienna

$$\omega_I = \omega_R = \omega_T. \quad (11)$$

Z równań Maxwella łatwo znaleźć warunki graniczne

$$E_I + E_R = E_T. \quad (12)$$



Rysunek 2: Fala padająca na granicę dwóch ośrodków o współczynnikach załamania n_1 i n_2 częściowo się odbija, a częściowo załamuje i przechodzi do drugiego ośrodka. \vec{k} to wektor falowy.

Każdą składową pola w fali można zapisać jako

$$E = E_0 e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}, \quad (13)$$

gdzie E_0 to amplituda w punkcie \vec{r} . Wartość bezwzględna wektora falowego wyraża się związkiem

$$k^2 = \frac{n^2 \omega^2}{c^2} \quad (14)$$

co wraz z (11) daje nam

$$\frac{k_I^2}{n_1^2} = \frac{k_R^2}{n_1^2} = \frac{k_T^2}{n_2^2}, \quad (15)$$

zatem

$$k_{Ix}^2 + k_{Iy}^2 = k_{Rx}^2 + k_{Ry}^2. \quad (16)$$

Składowe wzdłuż osi Y są sobie równe, można wyliczyć wartość

$$k_{Tx}^2 = \frac{n_2^2}{n_1^2} k_I^2 - k_{Iy}^2. \quad (17)$$

Gdy fala przechodzi z ośrodka o większym współczynniku załamania $n > 1$ do ośrodka o mniejszym współczynniku załamania (przyjmijmy powietrze) to jest pewien kąt graniczny dla którego kąt załamania jest kątem prostym

$$n \sin \theta_{gr} = 1, \quad (18)$$

jest to tak zwane całkowite wewnętrzne odbicie.

Przeanalizujemy co się stanie, gdy kąt padania θ będzie większy od kąta granicznego. Wróćmy do równania (17)

$$k_{Tx}^2 = \frac{k_I^2}{n^2} - k_{Iy}^2. \quad (19)$$

Korzystając ze związków $k_{Iy} = k \sin \theta$ i $k = \omega n / c$ dostajemy

$$k_{Tx}^2 = \frac{\omega^2}{c^2} (1 - n^2 \sin^2 \theta). \quad (20)$$

W rozważanej sytuacji $n \sin \theta > 1$, więc k_{Tx}^2 jest ujemne czyli wartość k_{Tx} jest urojona, $k_{Tx} = \pm i k_1 = \pm i \omega \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1} / c$. Fala załamana ostatecznie będzie miała postać

$$E_{zat} = E_{T0} \exp(\pm k_1 x) \exp(i[\omega t - k_{Ty}]). \quad (21)$$

Natężenie fali ewanescentnej maleje wykładniczo z odległością x , $I = E_{zat} E_{zat}^*$ daje wynik

$$I = E_{I0}^2 \exp\left(-\frac{4\pi}{\lambda_0} x \sqrt{n^2 \sin^2 \theta - 1}\right), \quad (22)$$

gdzie λ_0 to długość fali w próżni. Ogólnie natężenie zachowuje się jak funkcja

$$I = I_0 \exp(-\eta x). \quad (23)$$

II. APARATURA

Fala elektromagnetyczna generowana jest klitronem, jest to lampa próżniowa z modulowaną wiązką elektronów. Strumień elektronów przebywa w klitronie drogę na tyle długą, że prędkość pojedynczych elektronów może być na przemian zwiększana i zmniejszana przez pole elektromagnetyczne rezonatorów wnękowych otaczających wiązkę. To przyspieszanie i spowalnianie elektronów powoduje, że grupują się one w „paczki”. Zmiany stopnia zgrupowania powodują modulację wiązki. Modulacja jest wywoływana na początku drogi elektronów przez pierwszy rezonator wnękowy i zwiększa się w miarę jak elektrony przechodzą przez kolejne rezonatory.

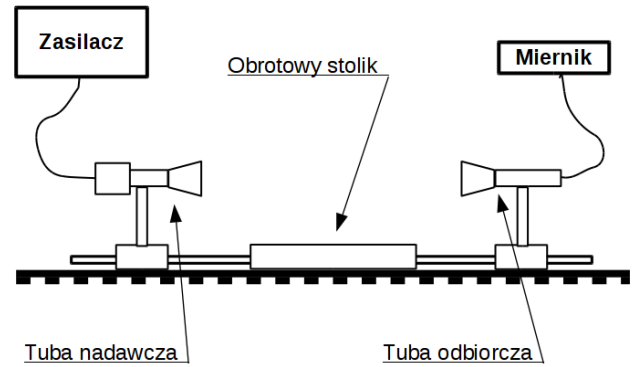
Do wytwarzania mikrofal użyto klitronu refleksowego, którego działanie jest podobne do opisanego powyżej. Elektrony po opuszczeniu wyrzutni przelatują przez szczelinę rezonatora, następnie są zawracane z powrotem do tej szczeliny za pomocą elektrody (zwanej reflektorem) spolaryzowanej ujemnie względem katody. Również w tym typie klitronu elektrony poruszając się z powrotem w kierunku rezonatora grupują się – elektrony szybsze doganiają wolniejsze powracając do szczeliny „paczkami”, a nie jako jeden ciągły strumień.

Do wykrywania mikrofal użyto diody detekcyjnej. Absorbująca ona moc mikrofal i wytwarza na zaciskach stałe napięcie proporcjonalne do tej mocy. Tuba odbiorcza z diodą jest umieszczona zgodnie z kierunkiem rozchodzenia się fal, aby zaabsorbować jak najwięcej energii ze źródła. Schemat układu przedstawiony jest na rysunku 3.

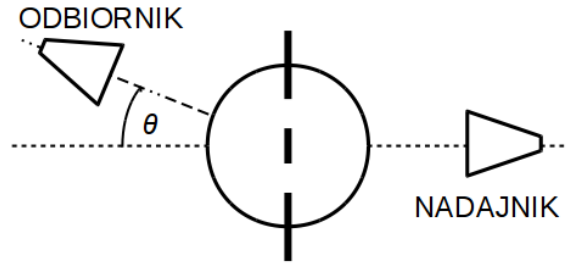
III. POMIAR I WYNIKI

A. Doświadczenie Younga

Aby wykonać doświadczenie układ został przygotowany jak na rysunku 4. Szczeliny są oddalone od siebie o $d = 7 \text{ cm}$ (przyjmując błąd $\Delta d = 0,2 \text{ cm}$). Ramie odbiornika jest obracane w zakresie od 0° do 40° w każdą



Rysunek 3: Schemat układu pomiarowego na podstawie ref. [1]. Odległość tub od stolika jest regulowana. Na obrotowym stoliku można ustawić badany obiekt w zależności od doświadczenia. Posiada on dokładną podziałkę kątową.



Rysunek 4: Przygotowanie układu do doświadczenia Younga. Na stoliku postawiono metalową płytkę z dwoma szczelinami. Dioda odbiorcza jest odchylana od osi układu o kąt θ .

stronę. Co 2° dokonuje się pomiaru napięcia rejestrowanego przez odbiornik (przyjmując błąd $\Delta \theta = 1^\circ$). Dane zestawione są w tabeli I oraz przedstawione na wykresie 5.

Wzięto wartości kątów dla czterech maksimów o rzędach $m = 1, 2$, policzono długość fali ze wzoru (8), a następnie ich średnią i otrzymano wyniki

$$\lambda_{sr} = (1,7 \pm 0,3) \text{ cm}. \quad (24)$$

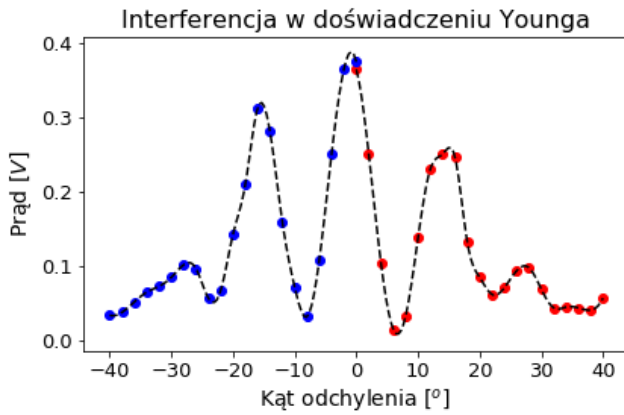
Z wykresu 5 wyraźnie widać, że fala załamana na szczelinach następnie interferuje propagując dalej. Wraz ze zmianą kąta wyraźnie widać jak pojawiają się kolejne minima i maksima. Policzona długość fali mieści się w zakresie przyjętym dla mikrofal.

B. Polaryzacja

Na stoliku, prostopadle do osi tworzonej przez układ nadajnika i odbiornika, umieszczono polaryzator. Zbudowany on był tak, że w kwadratowej ramce umieszczono cienkie, metalowe pręty wzdłuż jednej osi. Wiemy, że fala emitowana przez nadajnik jest spolaryzowana liniowo.

Kąt [stopnie]	Strona I [mV]	Strona II [mV]
0	374	364
2	365	251
4	251	103
6	108	14
8	31	32
10	71	137
12	159	230
14	280	250
16	312	246
18	209	131
20	142	84
22	66	61
24	56	70
26	96	93
28	101	97
30	84	68
32	72	43
34	64	44
36	51	43
38	37	40
40	33	56

Tablica I: Wyniki pomiaru napięcia w doświadczeniu Younga.



Rysunek 5: Wykres przedstawiający wyniki pomiarów doświadczenia Younga. Dopasowanie liniowe wykresu do punktów pomiarowych, obrazujące powstałą interferencję, zaznaczono linią przerywaną.

Najpierw zmierzono napięcie na mierniku bez polaryzatora

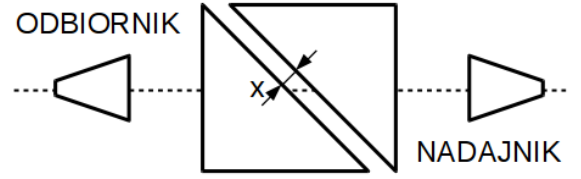
$$V_0 = 0,867 \text{ mV}. \quad (25)$$

Następnie wstawiono polaryzator tak, że jego oś polaryzacji skierowana była poziomo i otrzymano wartość

$$V_- = 0,382 \text{ mV}, \quad (26)$$

a następnie pionowo z wynikiem

$$V_+ = 0,871 \text{ mV}. \quad (27)$$

Rysunek 6: Układ pomiarowy służący do badania ewanescencji. Dwa pryzmaty ustawione są w odległości x od siebie.

Odległość x [cm]	Prąd [mV]
2.415	0.019
2.055	0.049
1.89	0.068
1.595	0.112
1.21	0.156
0.99	0.266
0.89	0.316
0.645	0.609
0.500	0.901
0.38	1.215
0.245	1.629
0.16	1.966

Tablica II: Wyniki pomiaru zjawiska ewanescencji.

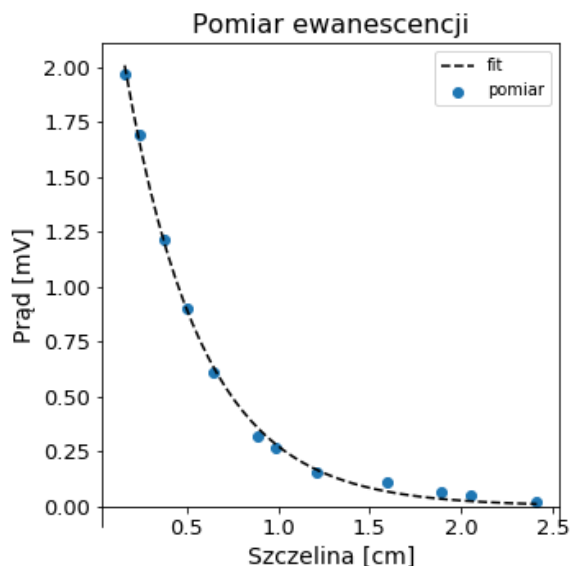
Zmierzone napięcie można utożsamić z natężeniem fali. Z 27 widzimy, że pionowe ustawienie osi polaryzacji nie miało wpływu na rejestrowaną wartość. Natomiast gdy została ona ustawiona poziomo to natężenie spadło do około 44% pierwotnej wartości. Jak widać z powyższych wartości fala nie została całkowicie stłumiona. Można to wytłumaczyć prostą budową polaryzatora, szerokości szczelin nie były wystarczające, aby polaryzator działał z pełną skutecznością dla długości fali użytej w doświadczeniu.

C. Ewanescencja

Na stoliku pomiarowym ustawiono dwa pryzmaty (rys. 6). W trakcie doświadczenia zmniejszano odległość x między nimi i mierzone natężenie prądu na odbiorniku.

Wyniki zestawiono w tabeli II i przedstawiono na wykresie 7.

Ponieważ mikrofałe są stosunkowo długimi falami to zjawisko ewanescencji wyraźnie zachodzi nawet przy odległościach między pryzmatami sięgających kilku centymetrów, co byłoby zupełnie niewyobrażalne dla np. fal światła widzialnego. Mimo, że fala według podstawowych praw powinna ulec całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, to po podstawieniu w bliskiej odległości drugiego pryzmatu ulega ona 'tunelowaniu' na drugą stronę.



Rysunek 7: Wyniki pomiarowe. Krzywą przerywaną wykreślono wykres na podstawie punktów pomiarowych.

IV. PODSUMOWANIE

Dzięki znacznym długościom promieniowania mikrofalowego pozwala dostrzec i zbadać własności fal elektromagnetycznych w odległościach makroskopowych. Światło widzialne jest bardziej efektowne, gdyż rejestruje je ludzkie oko. Mikrofałe, chociaż dla nas niewidzialne, to da się je zarejestrować różnymi miernikami. A narzędzia użyte do doświadczeń są na tyle duże, że można dokładnie zanalizować prawa i mechanizmy, które stoją za zachodzącymi zjawiskami.

Analiza została wykonana za pomocą języka Python [5], biblioteki SciPy [6]. Wykresy stworzone zostały przy użyciu modułu Matplotlib.

-
- [1] Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. Cz.3 Elektryczność i magnetyzm, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1999.
 - [2] Stephen F. Adam, Microwave theory and applications, Prentice Hal, 1969.
 - [3] Z. Kąkol, K. Kutorasiński, P. Morawski, B. Wiendlocha, Elektromagnetyzm i Optyka, Kraków, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, 2014 [data dostępu 2017-03-23], link: <http://epodreczniki.agh.edu.pl/item23>
 - [4] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, Feynmana wykłady z fizyki, tom 2.2, PWN, 2007.
 - [5] Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.5.2. Available at <http://www.python.org> [data dostępu 2016-12-05].
 - [6] Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python, 2001-, <http://www.scipy.org/> [data dostępu 2016-12-05].