

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

MARCIN POLKOWSKI
251328

ŚWIATŁOWODY

Pracownia Fizyczna dla Zaawansowanych
ćwiczenie L6
w zakresie OPTYKI

Streszczenie

Celem wykonanego na Pracowni Fizycznej dla Zaawansowanych ćwiczenia było zapoznanie się z działaniem światłowodów. Zbadano światłowod jednomodowy i fotoniczny. Ćwiczenie obejmowało podłączenie światłowodu do układu, precyzyjne wstrzelenie wiązki światła laserowego oraz pomiar apertury numerycznej dla obydwu światłowodów. Dodatkowo zmierzono sprawność złącza światłowodowego i sprzęgacza.

Doświadczenie wykonane pod kierunkiem:
dr Jacek Pniewski
Instytut Geofizyki
Zakład Optyki Informacyjnej

Warszawa, 7 grudnia 2009

Spis treści

1	Wstęp teoretyczny	3
1.1	Mody światła	3
1.2	Światłowód	3
1.2.1	Apertura numeryczna	3
2	Opis układu pomiarowego	4
3	Wyniki pomiarów	4
3.1	Światłowód jednomodowy	4
3.2	Światłowód fotoniczny	5
3.3	Złącze światłowodowe	6
3.4	Sprzęgacz światłowodowy	7
4	Podsumowanie	7

Spis rysunków

1	Schemat światłowodu z zaznaczonym kątem akceptacji θ_{max}	3
2	Schemat ideowy układu pomiarowego	4
3	Światłowód jednomodowy, przesuwanie detektora	5
4	Światłowód jednomodowy, przesuwanie szczeliny	6
5	Światłowód fotoniczny, przesuwanie szczeliny	7

1 Wstęp teoretyczny

1.1 Mody światła

Mod jest charakterystycznym rozkładem pola elektromagnetycznego odpowiadającym danemu kątowi rozchodzenia się fal w światłowodzie. Mody można interpretować jako efekt wzajemnej interferencji płaskich fal elektromagnetycznych odbijających się wielokrotnie od granicy ośrodków tworzących światłowód. Matematyczną postać rozkładów pola odpowiadających poszczególnym modom można uzyskać rozwiązując równania Maxwella, lub wynikające z nich równanie falowe, z odpowiednimi warunkami brzegowymi narzuconymi na pole elektryczne i magnetyczne na granicy ośrodków. W światłowodzie takie równanie falowe ma nieskończoną ilość rozwiązań, lecz tylko skończona ich liczba odpowiada propagacji fal wzdłuż światłowodu, bez szybkiego zaniku pola wraz z przebytą odległością. Rozwiązania te nazywane są modami. Każdy z modów posiada odrębne własności, takie, jak prędkość propagacji, częstotliwość i długość fali, poprzeczne rozkłady pola elektromagnetycznego w ośrodku. O tym ile modów przenosi dany światłowód decyduje jego kształt i apertura numeryczna.

Światłowody dzielimy na jedno i wielomodowe w zależności ile modów światła może się za ich pomocą propagować.

1.2 Światłowód

Światłowód to przezroczyste włókno, w którym odbywa się propagacja światła.

Aby wyeliminować wypromieniowanie światła przez boczne powierzchnie światłowodu, stosuje się odpowiednio dobrany poprzeczny gradient współczynnika załamania światła. W najprostszym przypadku, gradient ten realizowany jest skokowo - wewnątrz światłowodu współczynnik załamania ma wartość wyższą, niż na zewnątrz; utrzymanie promieni światła w obrębie takiego światłowodu zachodzi na skutek całkowitego wewnętrznego odbicia. W przypadku, gdy współczynnik załamania maleje z odległością od osi światłowodu w sposób ciągły, mówimy o światłowodach gradientowych.

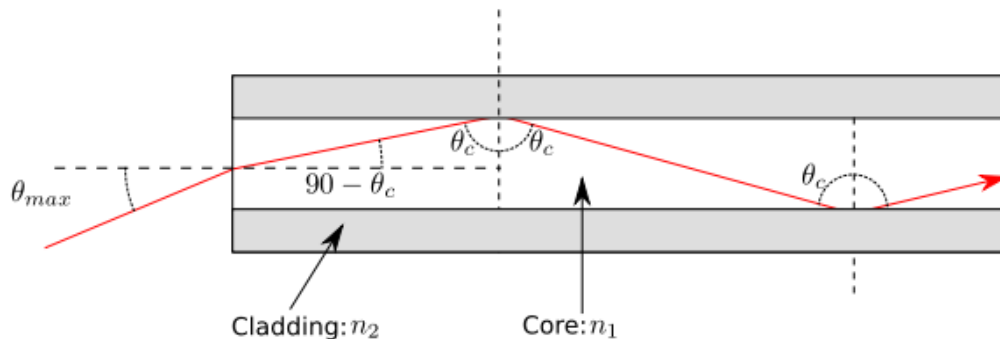
Przybliżenie optyki geometrycznej jest sensowne jedynie dla światłowodów o dużych rozmiarach poprzecznych, traci natomiast sens, gdy rozmiar poprzeczny światłowodu staje się porównywalny z długością fali światła. Zjawiska falowe mają szczególnie duże znaczenie w przypadku światłowodów jednomodowych, w których ściśle dobiera się długość fali transmitowanego światła do kształtu i rozmiarów poprzecznych światłowodu.

1.2.1 Apertura numeryczna

Apertura numeryczna NA definiowana dla światłowodów jako sinus kąta stożka akceptacji, tzn. maksymalnego kąta w stosunku do osi rdzenia włókna, pod którym światło wprowadzone do światłowodu nie będzie z tego włókna uciekać (z powodu niezachowania warunku dla całkowitego wewnętrznego odbicia).

$$NA = \sin \theta_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1)$$

Apertura numeryczna została schematycznie pokazana na rysunku 2.



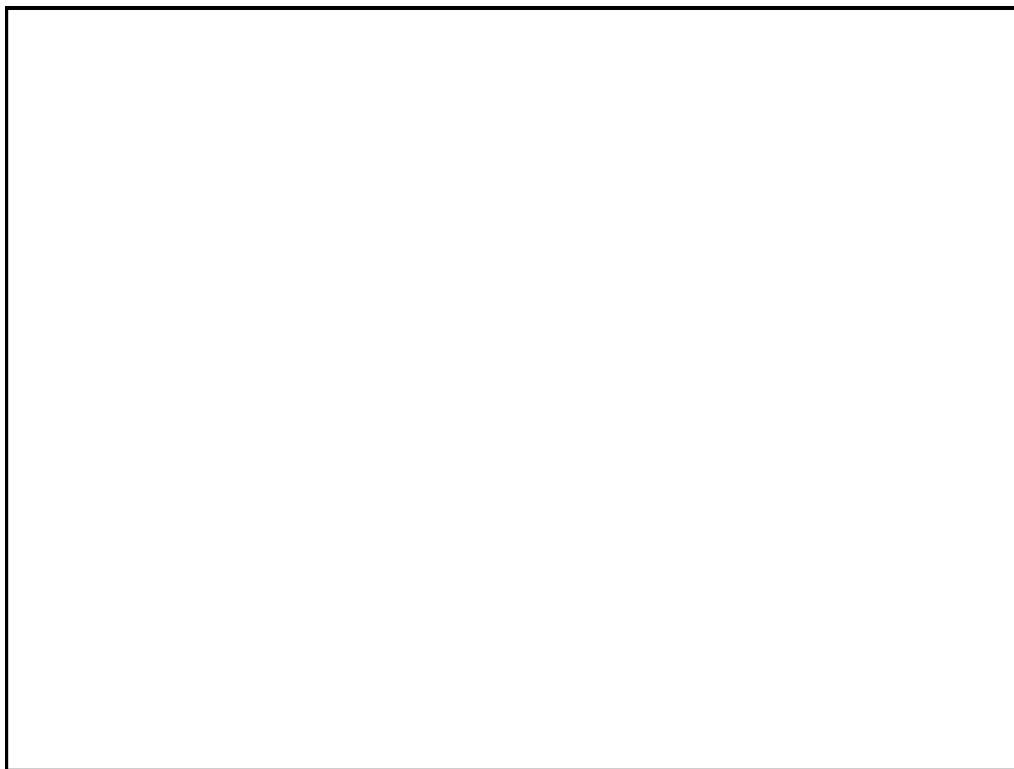
Rysunek 1: Schemat światłowodu z zaznaczonym kątem akceptacji θ_{max}

2 Opis układu pomiarowego

W skład układu pomiarowego wchodziły:

1. Półprzewodnikowa dioda laserowa o długości fali $\lambda = 650 \text{ nm}$
2. Obiektyw
3. Precyzyjny stolik optyczny, wykorzystany do precyzyjnego ustawienia światłowodu
4. Uchwyty do trzymania światłowodu
5. Detektor CCD
6. Oscyloskop

Schemat ideowy układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 2.



Rysunek 2: Schemat ideowy układu pomiarowego

3 Wyniki pomiarów

3.1 Światłowód jednomodowy

W pierwszej kolejności podłączono do układu światłowód jednomodowy. Odnaleziono takie ustawienie końcówki światłowodu, dla którego wpadało do niego najwięcej światła, co cały czas sprawdzano za pomocą detektora. Na wyjściu światłowodu zaobserwowano wiązkę światła o przekroju okrągłym i natężeniu malejącym wraz z odległością od osi.

W pierwszej kolejności zmierzono aperturę numeryczną światłowodu oświetlając papier milimetryowy wiązką ze światłowodu z odległości $l = 12,0 \pm 0,2 \text{ cm}$. Zaobserwowano wiązkę o średnicy $d = 2,0 \pm 0,1 \text{ cm}$. Wielkość apertury numerycznej wyznaczono ze wzoru:

$$NA = \sin \left(\arctan \left(\frac{d}{2l} \right) \right) = 0,083 \quad (2)$$

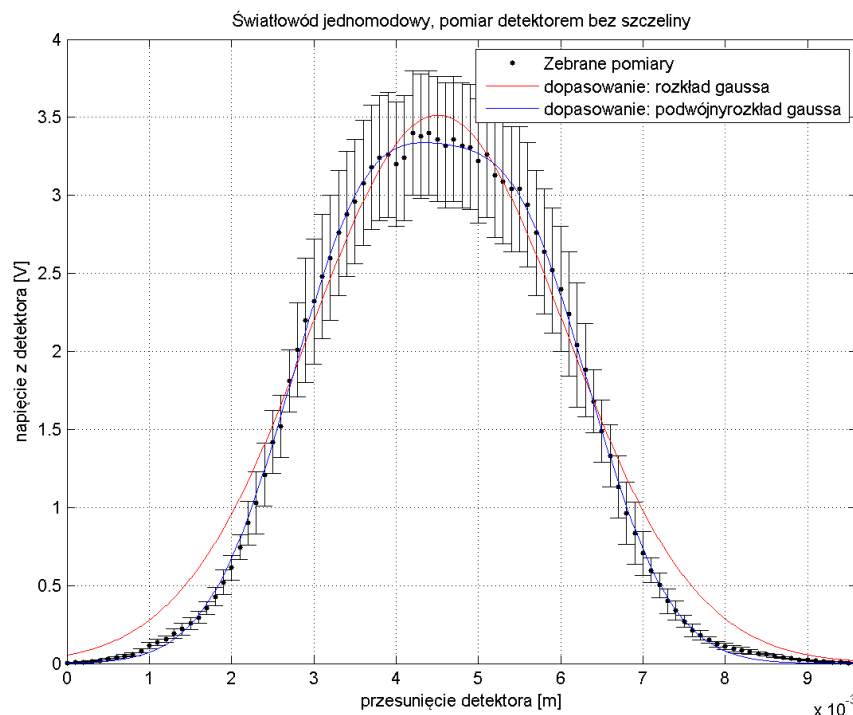
Niepewność tej wartości obliczono ze wzoru:

$$\sigma_{NA} = 4 \sqrt{\frac{l^2 (d^2 \sigma_l^2 + l^2 \sigma_d^2)}{(d^2 + 4l^2)^3}} = 0,004 \quad (3)$$

Następnie dokonano pomiaru tego samego parametru drugą metodą. Końcówkę światłowodu umieszczono w odległości $l = 0,015 \pm 0,001$ m od matrycy detektora. Następnie przesuwno detektor (poprzecznie do osi) i co 10 mikrometrów mierzono natężenie światła padającego na matrycę. Do uzyskanych pomiarów dopasowano rozkład Gaussa (wykres 3). Szerokość dopasowanego rozkładu wyniosła $d = 0,00220 \pm 0,00006$ m. Ze wzorów (2) i (3) wyznaczono aperturę numeryczną, która wyniosła:

$$NA = 0,073 \pm 0,005 \quad (4)$$

Pomiar wykonano trzecią metodą. Pomiędzy detektor i końcówkę światłowodu wstawiono szczelinę, dzięki której



Rysunek 3: Światłowod jednomodowy, przesuwanie detektora

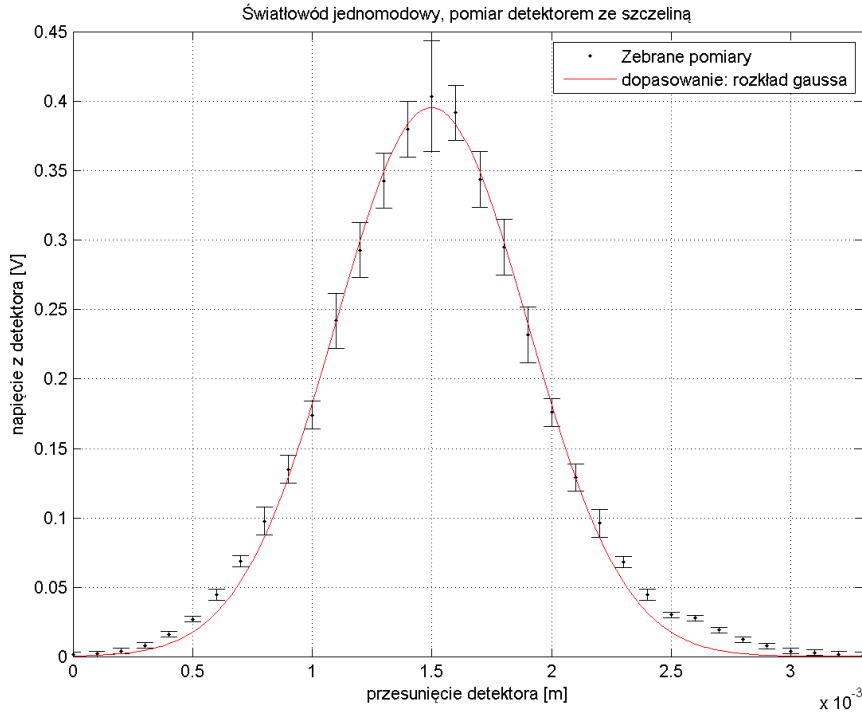
mierzono natężenie wąskiej części wiązki. Do uzyskanych pomiarów dopasowano rozkład Gaussa (wykres 4). Szerokość rozkładu wyniosła $d = 0,00057 \pm 0,00001$ m, a odległość światłowodu od szczeliny $l = 0,004 \pm 0,001$ m. Ze wzorów (2) i (3) wyznaczono aperturę numeryczną, która wyniosła:

$$NA = 0,071 \pm 0,017 \quad (5)$$

Wszystkie uzyskane wartości apertury numerycznej światłowodu jednomodowego można uznać za zgodne (test "3 sigma").

3.2 Światłowod fotoniczny

Po zbadaniu światłowodu jednomodowego do układu podłączono światłowod fotoniczny. Odnaleziono takie ustawienie końcówki światłowodu, dla którego wpadało do niego najwięcej światła, co cały czas sprawdzano za pomocą detektora. Na wyjściu światłowodu zaobserwowano wiązkę światła o przekroju okrągłym i wielu wyraźnych miejscach wzmocnienia sygnału - co świadczyło o wielomodowości światłowodu.



Rysunek 4: Światłowód jednomodowy, przesuwanie szczeliny

W pierwszej kolejności zmierzono aperturę numeryczną światłowodu oświetlając papier milimetryowy wiązką ze światłowodu z odległości $l = 7,25 \pm 0,1$ cm. Zaobserwowano wiązkę o średnicy $d = 4,0 \pm 0,1$ cm. Wielkość apertury numerycznej wyznaczono ze wzoru:

$$NA = \sin \left(\arctg \left(\frac{d}{2l} \right) \right) = 0,266 \quad (6)$$

Niepewność tej wartości obliczono ze wzoru:

$$\sigma_{NA} = 4 \sqrt{\frac{l^2 (d^2 \sigma_l^2 + l^2 \sigma_d^2)}{(d^2 + 4l^2)^3}} = 0,007 \quad (7)$$

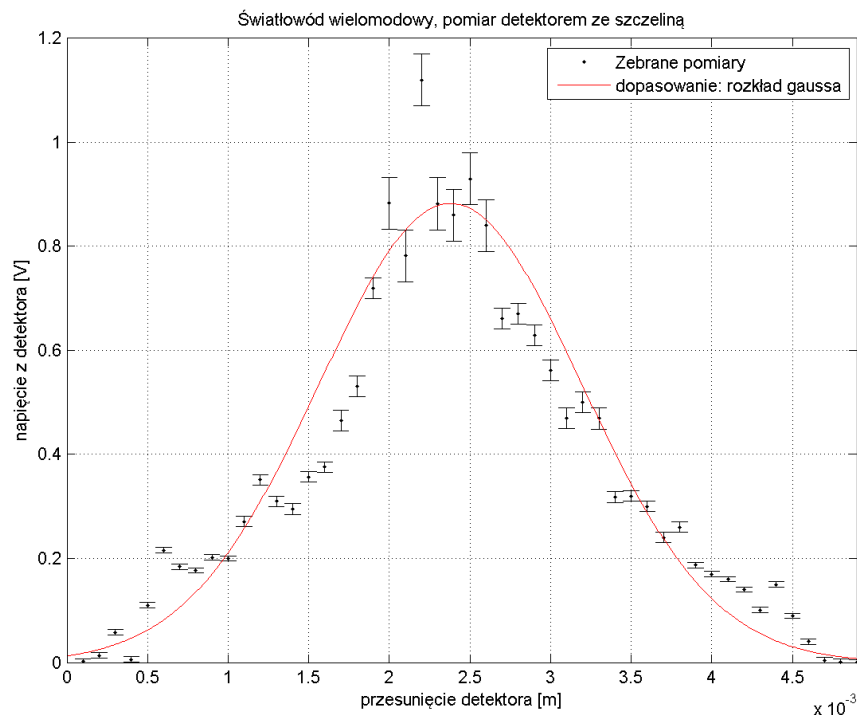
Pomiar wykonano drugą metodą. Pomiedzy detektor i końcówkę światłowodu wstawiono szczelinę, dzięki której zmierzono natężenie wąskiej części wiązki. Do uzyskanych pomiarów dopasowano rozkład Gaussa (wykres 5). Szerokość rozkładu wynosiła $d = 0,0010 \pm 0,0001$ m, a odległość światłowodu od szczeliny $l = 0,004 \pm 0,001$ m. Ze wzorów (6) i (7) wyznaczono aperturę numeryczną, która wyniosła:

$$NA = 0,127 \pm 0,033 \quad (8)$$

Uzyskane wartości apertury numerycznej światłowodu fotonicznego nie były ze sobą zgodne. (test "3 sigma"). Wydaje się, że druga metoda dała wynik nieprawidłowy ponieważ wartość apertury dla światłowodu wielomodowego powinna być wyższa.

3.3 Złącze światłowodowe

Kolejnym etapem ćwiczenia było zbadanie złącza światłowodowego. Za pomocą filtra ograniczono ilość światła wpadającego do światłowodu (aby nie wysycić detektora). Bez złącza detektor wskazywał natężenie światła na poziomie $I_1 = 4,0 \pm 0,2$ V. Po podłączeniu złącza natężenie spadło do $I_2 = 3,6 \pm 0,2$ V. Tłumienność złącza wyniosła $\frac{I_2}{I_1} = 0,90 \pm 0,07$.



Rysunek 5: Światłowod fotoniczny, przesuwanie szczeliny

3.4 Sprzęgacz światłowodowy

Sprzęgacz światłowodowy to pasywne urządzenie posiadające dwa światłowody wejściowe i dwa wyjściowe. Zadaniem sprzęgacza jest sumowanie natężeń sygnałów wejściowych i ich równomierny podział na dwa sygnały wyjściowe. Na pracowni znajdowały się dwa uszkodzone sprzęgacze (w obydwu brakowało jednego światłowodu). Podjęto próbę zbadania uszkodzonych sprzęgaczy, poprzez wpuszczaniu na wejście sygnału o natężeniu $I_0 = 4 \text{ V}$ i badaniu sygnałów wyjściowych. Oczekiwano na wyjściach sygnałów o natężeniach rzędu $\frac{1}{2}I_0$.

Dla pierwszego sprzęgacza na wyjściu zaobserwowano natężenia $0,098I_0$ i $0,15I_0$. Dla drugiego sprzęgacza na wyjściu zaobserwowano natężenia $0,20I_0$ i $0,19I_0$. Zmierzone wielkości potwierdziły obawy o uszkodzeniu sprzęgaczy.

4 Podsumowanie

Dzięki wykonanemu ćwiczeniu autor zapoznał się z wykorzystaniem światłowodów w eksperymentach oraz nabył umiejętność precyzyjnego wstrzeliwania sygnałów do światłowodu. Dzięki przeprowadzonym pomiarom poznał dokładnie pojęcie apertury numerycznej.

Niestety ze względu na uszkodzenie sprzęgaczy nie udało się zbudować żadnego układu pomiarowego (np. miernika odległości).