



Laboratorium techniki światłowodowej

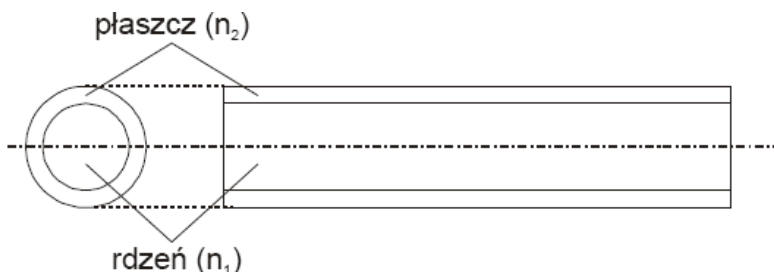
Ćwiczenie 2. Badanie apertury numerycznej światłowodów



Katedra Optoelektroniki
i Systemów
Elektronicznych, WETI,
Politechnika Gdańska
Gdańsk 2006

1. Wprowadzenie

Światłowody są obecnie jednym z najbardziej rozpowszechnionych mediów transmisyjnych. Zwykle mają one postać włókna, w którym wyróżnić można dwie warstwy: wewnętrzną (rdzeń) i zewnętrzną (płaszcz) (Rysunek 1).



Rysunek 1. Schemat budowy światłowodu.

Jeżeli współczynnik załamania światła w rdzeniu n_1 jest większy od współczynnika załamania światła w płaszczu n_2 , to w takiej strukturze możliwa jest transmisja światła.

2. Wybrane parametry światłowodu

Rozważmy przypadek światłowodu włóknistego o tzw. skokowym profilu współczynnika załamania. Promieniowanie padające na powierzchnię czołową światłowodu ulega załamaniu zgodnie z prawem Snelliusa, a następnie pada na granicę ośrodków (granicę rdzeń - płaszcz), gdzie ulega odbiciu lub ewentualnie załamaniu. Warunkiem prowadzenia fali przez światłowód jest całkowite wewnętrzne odbicie fali padającej na wspomnianą granicę ośrodków. Wystąpi to jedynie dla promieni padających pod kątem większym od kąta krytycznego θ_{kryt} (rysunek 2):

$$\sin \theta_{kryt} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

$$\theta > \theta_{kryt} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2)$$

gdzie: n_1 – współczynnik załamania światła rdzenia n_2 – współczynnik załamania światła płaszczu.

Promieniowanie wnikające do światłowodu może się w nim rozchodzić w postaci fal własnych rdzenia lub płaszczu lub wyciekać do otaczającego ośrodka. Rodzaj wzbudzonych fal zależy od kąta, pod którym wiązka świetlna wchodzi do wnętrza światłowodu przez płaszczyznę czołową. Użytecznym rodzajem energii prowadzonej przez włókno są jedynie fale rdzeniowe. Wzbudza je ta część promieniowania padającego na płaszczyznę czołową która zawiera się w kącie brylowym $2\alpha_{max}$ odpowiadającym kątowi krytycznemu θ_{kryt} . Wartość kąta α_{max} zwanego kątem akceptacji opisuje zależność:

$$\alpha_{max} = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_{kryt}\right) \quad (3)$$

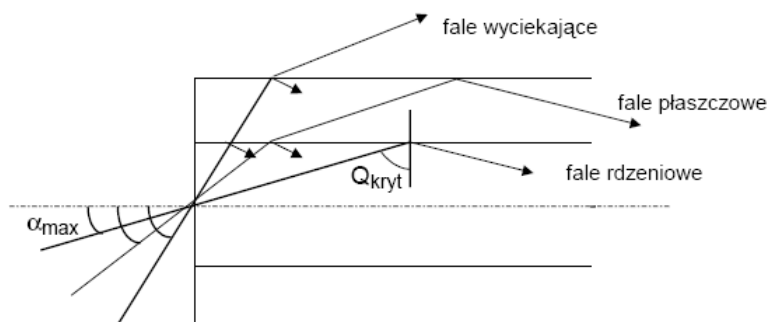
oraz:

$$n_0 \sin \alpha_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

gdzie: n_0 – współczynnik załamania ośrodka, z którego światło wchodzi do włókna.

Ćwiczenie 2. Badanie apertury numerycznej światłowodów

Maksymalny kąt – kąt akceptacji dla promieni transmitowanych jest jednocześnie maksymalnym kątem ich wypromieniowania.



Rysunek 2. Rozkład promieni świetlnych w światłowodzie płaszczyznowym.

Wielkość

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5)$$

nazywa się aperturą numeryczną. Jednak przy takim określeniu trudno ocenić jej znaczenie fizyczne. Inaczej aperturę określić można zależnością:

$$NA = n_0 \sin \alpha_{\max} \quad (6)$$

Wyjaśnia to sens fizyczny tego parametru, jeżeli zauważymy, że α_{\max} to kąt akceptacji światłowodu. Apertura numeryczna określa między innymi zdolność światłowodu do prowadzenia użytecznej energii świetlnej, a także pośrednio takie parametry jak np. dyspersja modowa.

3. Transmisja sygnału w światłowodzie

Analizując sposób rozchodzenia się promieni w wielomodowym światłowodzie o skokowym profilu współczynnika załamania (rysunek 2), łatwo można zauważyć, że różne promienie (mody) przebędą określony odcinek światłowodu w różnym czasie. Zjawisko to nosi nazwę dyspersji. Powoduje ona rozmycie czasowe impulsów i w konsekwencji ogranicza maksymalną szybkość transmisji.

Można wyróżnić dwa główne rodzaje dyspersji:

I. Dyspersja chromatyczna – jest to dyspersja związana z niezerową szerokością widma źródła światła, która obejmuje zarówno zjawiska związane z dyspersją falowodową jak i materiałową.

1. Dyspersja falowodowa – jest to zależność efektywnego współczynnika załamania oddziałującego z danym modem od częstotliwości. Zależność ta spowodowana jest zmianami podziału mocy tego modu pomiędzy rdzeń i płaszcz.
2. Dyspersja materiałowa – jest to zależność grupowych współczynników załamania materiałów z jakich jest wykonany światłowod od częstotliwości (długości fali).

II. Dyspersja modowa (międzymodowa) – występuje w światłowodach wielomodowych; w światłowodach tych występują wszystkie opisane powyżej rodzaje dyspersji, jednak zniekształcenie sygnału spowodowane jest w głównej mierze przez dyspersję międzymodową. Przyczyną jej powstawania są różne prędkości propagacji poszczególnych modów.

Ćwiczenie 2. Badanie apertury numerycznej światłowodów

Zniekształcenie transmitowanego sygnału zależy również od odległości transmisji i wraz z nią rośnie. Jako miarę wielkości zniekształcenia sygnału przyjmuje się różnicę czasów przejścia między modem najszybszym i najwolniejszym przez odcinek światłowodu o długości L . Zniekształcenie to przyjmuje różne wartości w zależności od rodzaju używanego światłowodu.

W przypadku transmisji sygnału światłowodem o skokowym profilu współczynnika załamania zniekształcenia sygnału będą największe. Różnicę czasów $\Delta\tau$ można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta\tau = \frac{L}{2n_1c} \left(\frac{1}{\sqrt{1-NA^2}} - 1 \right) \quad (7)$$

gdzie: L – długość odcinka światłowodu, n_1 – współczynnik załamania rdzenia światłowodu, c – prędkość światła, NA – apertura numeryczna światłowodu.

W światłowodzie o gradientowym profilu współczynnika załamania współczynnik załamania w rdzeniu zmienia się w sposób ciągły od wartości maksymalnej na osi rdzenia do wartości minimalnej na granicy z płaszczem. Jest on tak ukształtowany, aby różne mody miały zbliżoną prędkość rozprzestrzeniania się wzdłuż światłowodu. W związku z tym różnica prędkości różnych modów jest niewielka i w konsekwencji czasowe poszerzenie impulsów jest małe. Dlatego też światłowód tego typu charakteryzuje się mniejszą dyspersją międzymodową (ok. 300 razy) w porównaniu ze światłowodem o skokowym profilu współczynnika załamania i co się z tym wiąże, powoduje mniejsze zniekształcenia transmitowanego sygnału. Jednakże dla takich samych średnic włókien okazuje się, że światłowód gradientowy może przenieść zaledwie połowę mocy transmitowanej w światłowodzie skokowym.

W przypadku światłowodu gradientowego różnica czasów przejścia między modem najszybszym i najwolniejszym przez odcinek światłowodu o długości L opisana jest następującym wzorem:

$$\Delta\tau = \frac{L}{8n_1^3c} \left(\frac{1}{\sqrt{1-NA^2}} - 1 \right) \quad (8)$$

W światłowodzie jednomodowym nie występuje dyspersja międzymodowa, ponieważ jest w nim prowadzony tylko jeden mod. W światłowodach tego typu sygnał ulega zniekształceniu jedynie w wyniku dyspersji materiałowej. W przypadku światłowodu jednomodowego różnica czasów przejścia między modem najszybszym i najwolniejszym przez odcinek światłowodu o długości L opisana jest następującym wzorem:

$$\Delta\tau = D \cdot L \cdot \Delta\lambda \quad (9)$$

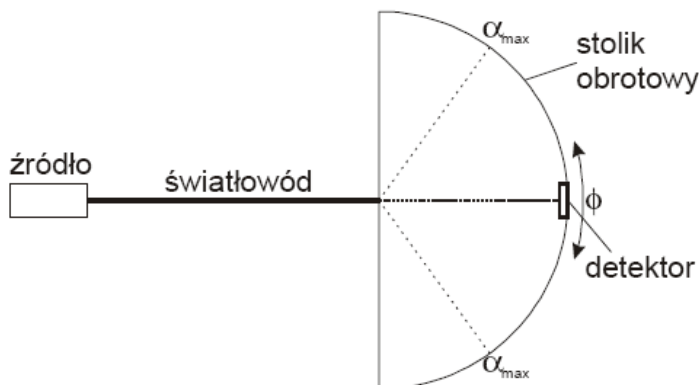
gdzie: D – wartość dyspersji w światłowodzie, tzw. współczynnik dyspersji, L – długość światłowodu, $\Delta\lambda$ – szerokość widmowa źródła światła.

Światłowód tego typu różni się od wcześniej opisanych również tym, że w jego przypadku pojęcie kąta akceptacji traci sens gdyż o łatwości wprowadzania światła ze źródła do światłowodu decyduje dopasowanie kształtu wiązki ze źródła do kształtu pola modalnego w światłowodzie. Efektywność wprowadzenia światła do światłowodu zależy również od wielkości średnicy rdzenia – promienie padające na powierzchnię czołową płaszczka nie będą prowadzone w światłowodzie.

Jak więc widać, apertura numeryczna światłowodów (NA) jest jedną z podstawowych informacji opisujących dane włókno światłowodowe. W zależności od zastosowań dąży się do maksymalizacji NA lub do odpowiedniego kompromisu pomiędzy żądaniem maksymalnego transmitowanego pasma (a więc minimalnej dyspersji) i maksymalnej transmitowanej mocy.

4. Pomiar apertury numerycznej metodą pola dalekiego

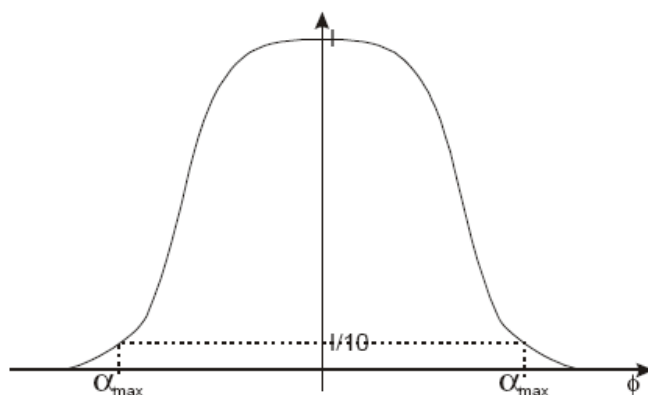
Apertura numeryczna została zdefiniowana jako sinus kąta akceptacji światłowodu. Stwierdzono również, że maksymalny kąt wypromieniowania energii świetlnej ze światłowodu jest jednocześnie kątem akceptacji. Fakt ten zapewnia łatwą możliwość pomiaru apertury numerycznej poprzez analizę rozkładu natężenia pola wychodzącego ze światłowodu. Zastosować do tego celu można układ przedstawiony na rysunku 3.



Rysunek 3. Układ do pomiaru apertury numerycznej metodą pola dalekiego.

Światłowod pobudzany jest przez źródło promieniowania lambertowskiego, równomiernie pobudzającego wszystkie mody światłowodu. Koniec włókna mocowany jest w środku obrotowego stolika, do którego przymocowany jest na wysięgniku, w stałej odległości od czoła światłowodu detektor. Rysunek 4 przedstawia przykładowy rozkład mocy odbieranej na detektorze w funkcji obrotu, gdzie kąt α_{\max} jest kątem akceptacji światłowodu, natomiast $I(0)$ jest natężeniem promieniowania na osi geometrycznej światłowodu. $I(\varphi)$ oznacza natężenie promieniowania na detektorze, który został obrócony o kąt φ od osi światłowodu. Unormowane natężenie promieniowania I :

$$I = \frac{I_{\varphi}}{I_{\max}} = \frac{I(\varphi)}{I(0)} \quad (10)$$



Rysunek 4. Przykładowy rozkład względnego natężenia promieniowania w funkcji kąta obrotu.

Ćwiczenie 2. Badanie apertury numerycznej światłowodów

Kąt α_{\max} odpowiada 90% spadkowi natężenia promieniowania na detektorze. Oznacza to, że po wyznaczeniu maksimum natężenia promieniowania na osi geometrycznej światłowodu, obracając ramieniem z detektorem szukamy kąta, dla którego wystąpi dziesięciokrotny spadek odbieranej mocy promieniowania.

Detektor analizujący promieniowanie umieszczony jest w odległości l od końca światłowodu. Pracuje on w polu dalekim, dla którego odległość detektor-powierzchnia końcowa włókna musi spełniać warunek:

$$l \ll 2 \frac{a^2}{\lambda} \quad (11)$$

gdzie: a – promień rdzenia światłowodu λ – długość fali promieniowania.

Dla średnicy rdzenia $2a = 100\mu\text{m}$ i $\lambda = 1\mu\text{m}$ z powyższego równania wynika, że $l \gg 0,5\text{cm}$. Zwykle przyjmuje się odległość jest rzędu kilku cm. Średnica otworu diafragmy przed fotodetektorem wraz z jego odległością od końca włókna, określają rozdzielczość kątową pomiaru.

4. Zadania pomiarowe

1. Zapoznać się z układem pomiarowym i jego opisem.
2. Pomierzyć rozkład $P(\varphi)$ pola dalekiego światłowodów wskazanych przez prowadzącego laboratorium.

Uwaga:

O niezbędne do obliczeń parametry światłowodów należy zapytać prowadzącego laboratorium.

5. Opracowanie

1. Wykreślić we współrzędnych prostokątnych rozkład pola dalekiego pomierzonych światłowodów.
2. Określić aperturę numeryczną i całkowity kąt akceptacji na podstawie wykonanych wykresów.
3. Zakładając, że koniec światłowodu oświetlony jest punktowym, izotropowym źródłem światła o jednostkowej mocy określić, jaką część tej mocy może być transmitowana w światłowodach 1 i 2 w przypadkach:
 - odległość źródło – światłowód wynosi zero,
 - odległość źródło – światłowód wynosi 1 cm, a średnica światłowodu 250 μm .
4. Określić maksymalną częstotliwość transmisji przez odcinek o długości podanej przez prowadzącego dla światłowodu jednomodowego (o parametrach podanych przez prowadzącego) oraz światłowodów wielomodowych przebadanych na zajęciach.
5. Skomentować wynik pomiarów i obliczeń.

6. Literatura

1. J. Siudak: „Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej”, WKŁ, Warszawa 1997
2. B. Crosignani, G. de Marchis: „Światłowody w telekomunikacji”, WKŁ, Warszawa 1987
3. A. Smoliński: „Optoelektronika światłowodowa”, WKiŁ, Warszawa 1985 r.