
Optyka Światłowodowa

*Materiały przeznaczone dla studentów wszystkich kierunków prowadzonych
w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego¹*

Cel ćwiczenia

Ćwiczenie to jest zestawem kilku krótkich eksperymentów poświęconych technice światłowodowej. Studenci zapoznają się z własnościami samych światłowodów oraz zasadami działania takich elementów światłowodowych jak: kable światłowodowe, sprzęgacze, izolatory i cyrkulatory optyczne, multipleksery i demultipleksery czy światłowodowe siatki Bragga. Kilka ćwiczeń poświęconych jest działaniu wzmacniacza i lasera włóknowego pompowanych laserem diodowym @980 nm.

Słowa kluczowe: światłowód, kabel światłowodowy pigtailowany (ang. fiber pigtail), mody światłowodów, tłumienność, sprzęgacz światłowodowy, multiplekser, de-multiplekser, WDM, wzmacniacz optyczny, siatka dyfrakcyjna, izolator optyczny, cyrkulator optyczny, światłowodowa siatka Bragga, długość fali Bragga, odbicie, załamanie, współczynnik załamania, światłowód domieszko-
wany erbem, fluorescencja, absorpcja, wzmacniacz światłowodowy (EDFA), wzmocnienie, wzmocniona emisja spontaniczna – ASE, sprzężenie optyczne, odbicie Fresnela, polaryzacja, wnęka rezonansowa, czujnik światłowodowy.

Niniejsza instrukcja nie jest wystarczającym źródłem informacji dla pełnego zrozumienia i przeprowadzenia ćwiczenia.

Zasady postępowania z elementami zestawu doświadczalnego oraz zasady BHP

Ponieważ w ćwiczeniu wykorzystywane jest promieniowanie laserowe oraz niezwykle delikatne elementy optyczne, wobec tego od studenta wymaga się stosowania do poniższych zasad.

- Nie wolno patrzeć wprost w wiązkę laserową, gdyż może to doprowadzić do trwałej utraty wzroku.
- Nie wolno dotykać powierzchni elementów optycznych (soczewki, lusterka, końcówki światłowodów, itp.), gdyż może to spowodować ich trwałe uszkodzenie.
- Końcówki nieużywanych światłowodów i wejścia elementów zestawu światłowodowego należy bezwzględnie zabezpieczać „kapturkami”.
- Nie zginać światłowodu w pętłę o promieniu mniejszym niż 10 mm
- Końcówki kabli światłowodowych należy przecierać alkoholem przed każdym ich podłączeniem.
- Uruchamianie laserów i analizatora widma może się odbywać wyłącznie za zgodą i przy obecności prowadzącego ćwiczenie.

¹przygotował dr hab. Krzysztof Dzierżęga

Contents

1	KABLE ŚWIATŁOWODOWE	4
1.1	Problemy do przestudiowania	4
1.2	Podstawy teoretyczne	4
1.2.1	Całkowite wewnętrzne odbicie	5
1.2.2	Apertura numeryczna	5
1.2.3	Mody światłowodu	6
1.2.4	Rodzaje światłowodów	7
1.2.5	Straty w światłowodach	8
1.3	Aparatura i materiały	10
1.4	Przebieg ćwiczenia	10
1.4.1	Pomiar charakterystyk moc optyczna–prąd zasilania złącza dla diod lasero- wych @1310 nm i @1550 nm	10
1.4.2	Pomiar tłumienności wtrąceniowej związanej z wprowadzaniem wiązki do światłowodu	10
1.4.3	Badanie tłumienności zgięciowej związanej ze zgięciami w kablach światło- wodowych	11
1.5	Pytania końcowe	11
2	SPRZĘGACZE ŚWIATŁOWODOWE	12
2.1	Problemy do przestudiowania	12
2.2	Podstawy teoretyczne	12
2.3	Aparatura i materiały	13
2.4	Przebieg ćwiczenia	13
2.4.1	Pomiar tłumienności związanych z wprowadzaniem wiązki do sprzęgacza . . .	13
2.4.2	Pomiar współczynnika sprzężenia/podziału dla sprzęgacza 3-portowego . . .	13
2.4.3	Pomiar odpowiedzi spektralnej sprzęgacza	13
2.4.4	Badanie współczynnika kierunkowości sprzęgacza	14
2.5	Pytania końcowe	14
3	SPRZĘGACZE TYPU WDM	15
3.1	Problemy do przestudiowania	15
3.2	Podstawy teoretyczne	15
3.3	Aparatura i materiały	16
3.4	Przebieg ćwiczenia	16
3.4.1	Badanie sprzęgacza WDM pompa-sygnał	16
3.4.2	Badanie sprzęgacza sygnałowego WDM	16
4	IZOLATORY OPTYCZNE	17
4.1	Pytania i problemy do przestudiowania	17
4.2	Podstawy teoretyczne	17

4.3	Aparatura i materiały	19
4.4	Przebieg ćwiczenia	19
5	CYRKULATORY OPTYCZNE	21
5.1	Pytania i problemy do przestudiowania	21
5.2	Podstawy teoretyczne	21
5.3	Aparatura i materiały	22
5.4	Przebieg ćwiczenia	22
5.4.1	Badanie 3-portowego cyrkulatora optycznego	22
5.4.2	Badanie 4-portowego cyrkulatora optycznego	23
6	ŚWIATŁOWODOWE SIATKI BRAGGA	24
6.1	Pytania i problemy do przestudiowania	24
6.2	Podstawy teoretyczne	24
6.3	Aparatura i materiały	26
6.4	Przebieg ćwiczenia	26
7	WZMACNIACZ ŚWIATŁOWODOWY EDFA	27
7.1	Pytania i problemy do przestudiowania	27
7.2	Podstawy teoretyczne	27
7.3	Aparatura i materiały	29
7.4	Przebieg ćwiczenia	30
7.4.1	Badanie absorpcji światła pompującego przez SDErb	30
7.4.2	Badanie fluorescencji SDErb	30
7.4.3	Badanie wzmacniacza optycznego typu EDFA	30
8	LASER WŁÓKNOWY	32
8.1	Pytania i problemy do przestudiowania	32
8.2	Podstawy teoretyczne	32
8.3	Aparatura i materiały	32
8.4	Przebieg ćwiczenia	32
8.4.1	Budowa prostego lasera włóknowego	32
8.4.2	Badanie widma lasera	33

Ćwiczenie 1

KABLE ŚWIATŁOWODOWE

Cele ćwiczenia: 1) zapoznanie się z właściwościami i sposobem obchodzenia z elementami światłowodowymi, 2) pomiar tłumienności światłowodu i 3) zrozumienie przyczyn strat powodowanych zgięciami.

Słowa kluczowe: całkowite wewnętrzne odbicie, struktura światłowodu, mody światłowodu, znormalizowana liczba falowa (V-number), apertura numeryczna, tłumienność.

1.1 Problemy do przestudiowania

- Optyka geometryczna (prawo załamania, prawo odbicia, warunek na całkowite wewnętrzne odbicie)
- Struktura, rozmiary i rodzaje (jednomodowe, wielomodowe, skokowe, gradientowe) światłowodów
- Propagacja światła w światłowodzie w ujęciu geometrycznym oraz wyprowadzenie wzoru na aperturę numeryczną
- Opis falowy światłowodu - mody światłowodu, znormalizowana liczba falowa V , zależność liczby modów od znormalizowanej liczby falowej.
- Tłumienność światłowodów
- Zapoznać się z różnymi typami złączy światłowodowych (FC, SC, ST, SMA) - patrz np. [2]

1.2 Podstawy teoretyczne

Światłowód jest falowodem służącym do przesyłania światła z zakresu widzialnego oraz bliskiej podczerwieni. Na światłowód składają się rdzeń i płaszcz, które są wykonane z dielektryka, przy czym współczynnik załamania rdzenia jest większy niż współczynnik załamania płaszcza $n_r > n_p$ (patrz Rys. 1.1).

Promienie świetlne, które padają na granicę rdzeń-płaszcz, pod kątem większym niż kąt graniczny, ulegają całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i rozchodzą się wzdłuż światłowodu. Z kolei promienie padające pod kątem mniejszym od granicznego przechodzą do płaszcza, gdzie ulegają rozproszeniu. Sposób rozchodzenia się światła w światłowodzie zależy od rozmiarów światłowodu, rodzaju materiałów, z których wykonane są płaszcz i rdzeń oraz własności samego źródła światła.

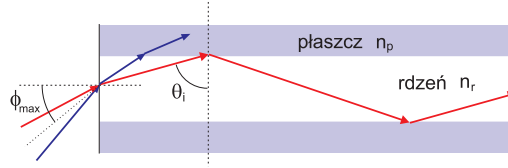


Figure 1.1: Światłowód składa się z rdzenia i otaczającego go płaszcza. Współczynnik załamania płaszcza n_p jest mniejszy niż współczynnik załamania rdzenia n_r dzięki czemu na granicy płaszcz–rdzeń światło może ulegać całkowitemu wewnętrznemu odbiciu. Dla każdego światłowodu istnieje tzw. kąt akceptacji ϕ_{max} , dla którego promień świetlny wciąż propaguje się w światłowodzie, a nie wnika do płaszcza gdzie zostaje wytłumiony.

1.2.1 Całkowite wewnętrzne odbicie

Jeśli wiązka światła (która może być traktowana jako jednorodna fala płaska) pada na granicę ośrodków to ulega ona odbiciu i załamaniu zgodnie z prawem Snella

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t, \quad (1.1)$$

gdzie n_1 i n_2 oznaczają współczynniki załamania ośrodków, a kąty θ_i i θ_t to kąty padania i załamania wiązki zdefiniowane na rysunku 1.2. Jak łatwo można pokazać, jeśli $n_1 > n_2$ i kąt padania θ_i wiązki jest większy od kąta granicznego

$$\theta_{i,gr} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right), \quad (1.2)$$

wówczas mamy do czynienia z całkowitym wewnętrznym odbiciem będącym podstawą działania światłowodów.

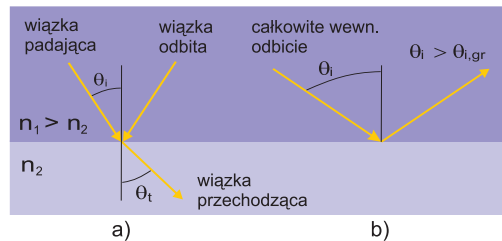


Figure 1.2: a) Odbicie promienia świetlnego na granicy dielektryków. b) całkowite wewnętrzne odbicie następuje gdy $\theta_i > \theta_{i,kr}$.

1.2.2 Apertura numeryczna

Z warunku na całkowite wewnętrzne odbicie wynika, że światła nie można wprowadzić do światłowodu pod dowolnym kątem. Dla dużych (względem osi światłowodu) kątów padania, promienie świetlne mogą wnikać do płaszcza światłowodu, gdzie są silnie tłumione. Największy kąt, pod jakim możemy wprowadzić światło do światłowodu, przy którym zachodzi całkowite wewnętrzne odbicie nazywa się *kątem akceptacji światłowodu* ϕ_{max} (patrz Rys. 1.1).

Jeśli wiązka światła jest wprowadzona do światłowodu pod wystarczająco małym kątem ϕ (który zgodnie z prawem Snella odpowiada dużemu kątowi θ_i) to ulega ona całkowitemu odbiciu pomiędzy ściankami i rozchodzi się wzdłuż światłowodu. Kąt ϕ można wyliczyć na podstawie prawa Snella

$$n_0 \sin(\phi) = n_r \sin(\pi/2 - \theta_i). \quad (1.3)$$

Gdy kąt ϕ jest za duży to światło wchodzi do płaszcza co prowadzi do dużych strat. Kąt akceptacji światłowodu ϕ_{max} zależy od $\theta_{i,kr}$ i jest wyliczany także na podstawie równania Snella. Sinus kąta ϕ_{max} jest wartością charakterystyczną dla każdego światłowodu zwaną *aperturą numeryczną* (NA), która wynosi

$$\begin{aligned} NA \equiv \sin(\phi_{max}) &= \frac{n_r}{n_0} \sin(\pi/2 - \theta_{i,kr}) \\ &= n_r \cos(\theta_{i,kr}) = n_r \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{i,kr})} = \sqrt{n_r^2 - n_p^2}. \end{aligned}$$

Apertura numerycznej typowych światłowodów wynosi 0.2, co odpowiada wartości kąta granicznego $\phi_{max} = 12^\circ$.

1.2.3 Mody światłowodu

Opis propagacji światła w światłowodzie oparty o optykę geometryczną przestaje być poprawny kiedy rozmiary światłowodu są porównywalne z długością propagującej w nim fali świetlnej. Poprawny opis propagacji światła wymaga wtedy rozwiązania równań Maxwella dla przypadku konkretnego światłowodu.

Rozpatrując zagadnienie propagacji światła w światłowodzie włóknowym, wygodnie jest używać współrzędnych cylindrycznych. Pole elektryczne fali świetlnej $E(r, \phi, z)$, zapisane w tych współrzędnych, można wyrazić wzorem

$$E(r, \varphi, z) = E_0 f(r) \cos(\varphi t - kz) \cos(q\varphi). \quad (1.4)$$

Ponieważ problem musi być niezmienniczy względem obrotów o kąt 2π to

$$E(r, \varphi, z) = E(r, \varphi + 2\pi, z) \Rightarrow \cos(q\varphi) = \cos(q(\varphi + 2\pi)). \quad (1.5)$$

Wynika z tego że liczba q może przyjmować tylko wartości całkowite ($q = 0, 1, 2, \dots$).

Jak się okazuje nie tylko rozkład kątowy, ale i rozkład radialny natężenia, a także prędkość propagacji światła w światłowodzie nie mogą być dowolne. Te dozwolone w światłowodzie rozkłady pola świetlnego nazywamy *modami światłowodu*. Niestety ściśle wyliczenie rozkładu radialnego pola wewnątrz światłowodu jest możliwe tylko dla niektórych typów światłowodów. Dla światłowodu o skokowym współczynniku załamania rozkład radialny natężenia światła jest wyrażony przez odpowiednie, różne dla różnych modów, funkcje Bessela. Niektóre mody światłowodu charakteryzują się tą samą prędkością fazową. Mody te zostały pogrupowane i nazwane *modami liniowo spolaryzowanymi* (LP).

Do określania, ile modów może propagować w danym światłowodzie przydatnym parametrem jest *znormalizowana liczba falowa* (V -number)

$$V = kaNA, \quad (1.6)$$

gdzie $k = 2\pi/\lambda$ jest liczbą falową, zaś a średnicą rdzenia światłowodu.

Jeżeli $V < 2.405$ (2.405 jest pierwszym zerem funkcji Bessela) to przez światłowód może propagować tylko jeden mod. Taki mod oznaczamy przez LP_{00} , a wartość $V = 2.405$ nazywamy częstotliwością odcięcia dla kolejnych modów. Radialny rozkład pola jest dla tego modu opisany funkcją Bessela pierwszego rodzaju, bardzo podobną do funkcji Gaussa, a rozkład kątowy jest funkcją stałą. Wraz ze wzrostem liczby V przybywają kolejne mody, które mogą propagować się w światłowodzie. Dla światłowodu skokowego liczba modów propagująca w światłowodzie opisana jest zależnością

$$N_{mod} = \frac{V^2}{2}, \quad (1.7)$$

gdzie N_{mod} to liczba modów liniowo spolaryzowanych. Na rysunku 1.3 został przedstawiony rozkład pola świetlnego kilku pierwszych modów liniowo spolaryzowanych.

Więcej informacji na temat modów światłowodowych można znaleźć np. w [1].

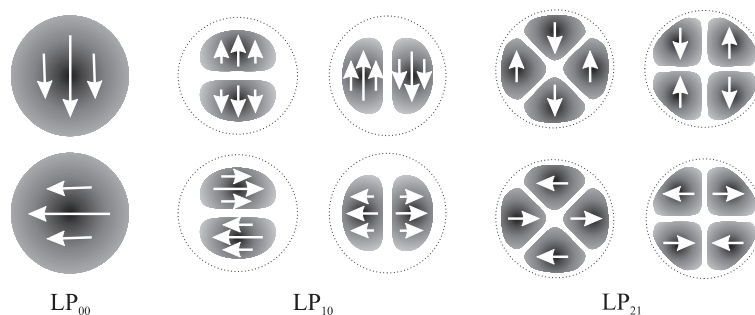


Figure 1.3: Trzy pierwsze tryby LP światłowodu gradientowego. Polaryzacja światła w każdym z trybów jest liniowa, przy czym dla każdego z trybów LP_{mn} istnieją dwie wzajemnie prostopadłe polaryzacje. Strzałki na rysunku obrazują fazę pola elektrycznego w danej chwili czasu.

1.2.4 Rodzaje światłowodów

Światłowody klasyfikuje się ze względu na ich strukturę modową oraz drogę optyczną jaką przebywa światło. Wyróżniamy światłowody skokowe, gradientowe oraz jedno- i wielomodowe.

Światłowod skokowy

Światłowod skokowy, który schematycznie jest przedstawiony na rysunku 1.1 był pierwszym i jednocześnie najprostszym ze wszystkich wymienionych światłowodów. Światłowody tego typu mają średnice od $50\ \mu\text{m}$ do $13\ \text{cm}$ i charakteryzują się małym pasmem przenoszenia, dużymi stratami/tłumiennością i dyspersją rzędu $15\ \text{ns/km}$.

Światłowod gradientowy

W światłowodzie skokowym tryby wyższych rzędów przebywają dłuższą drogę optyczną w porównaniu do trybów niskiego rzędu. W celu kompensacji tego efektu wprowadzono tzw. światłowody gradientowe (patrz Rys. 1.4a). W tego typu światłowodzie współczynnik refrakcji rdzenia maleje

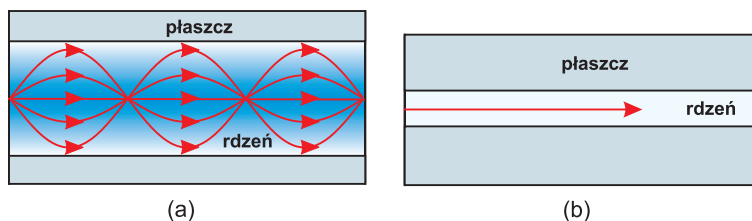


Figure 1.4: Światłowod gradientowy (a) i jednomodowy (b).

monotonicznie wraz z odległością od jego środka. Warstwy zewnętrzne mają mniejszy współczynnik załamania niż wewnętrzne więc światło rozchodzi się w nich szybciej co kompensuje dłuższą drogę geometryczną trybów wyższych rzędów. Dyspersja modalna w tego typu światłowodach wynosi około $1\ \text{ns/km}$.

Światłowod jednomodowy

Tego typu światłowody pozwalają na transmisję jedynie pojedynczych trybów, rozchodzących się praktycznie wzdłuż osi światłowodu jak pokazano na rysunku 1.4b. Średnica rdzenia wynosi zaledwie 5 do $10\ \mu\text{m}$.

Aby światłowod zachowywał się jako jednomodowy średnica jego rdzenia musi być zbliżona do długości fali świetlnej. Z kolei średnica płaszcz musi być około 10 razy większa niż średnica rdzenia po to aby spełnione były warunki brzegowe dla równań Maxwella. Światłowod będący jednomodowym dla $\lambda = 1300\ \text{nm}$ nie musi już być jednomodowym dla $\lambda = 800\ \text{nm}$.

1.2.5 Straty w światłowodach

Pomimo tego, że straty w światłowodach są zazwyczaj małe, to jednak istnieją i w sposób istotny ograniczają transmisję na dużych odległościach. Straty, inaczej zwane też tłumiennością światłowodu, podawane są w dB/km i definiowane jako

$$\alpha = \frac{10}{l} \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right), \quad (1.8)$$

gdzie P_{in} i P_{out} oznaczają moc wiązki świetlnej odpowiednio na wejściu i wyjściu światłowodu, a l jest jego długością. Tak więc, jeżeli moc wiązki świetlnej na wyjściu światłowodu stanowi np. 0.001 mocy wejściowej to osłabienie sygnału wynosi 30 dB.

Straty w światłowodzie zasadniczo można podzielić na dwie kategorie: a) straty związane z absorpcją oraz b) straty związane z rozproszeniem promieniowania. W pierwszym przypadku foton ulega anihilacji, a jego energia zostaje przekazana atomom lub elektronom materiału. W drugim przypadku fotony nie są absorbowane ale jedynie zmieniają tor swojego ruchu i dlatego nie biorą udziału w transporcie sygnału wzdłuż światłowodu.

Absorpcja: Ważnym czynnikiem powodującym absorpcję fotonów są zanieczyszczenia materiału z którego wykonany jest falowód. Jednym z takich zanieczyszczeń są jony OH^- , których maksima absorpcyjne odpowiadają długościom fal $0.95 \mu\text{m}$, $1.23 \mu\text{m}$ i $1.37 \mu\text{m}$. Maksima te określają trzy zakresy długości fal w których działają układy światłowodowe. Pierwszy skoncentrowany jest wokół 850 nm, drugi wokół 1300 nm i trzeci wokół 1550 nm. Są to tzw. okna transmisyjne.

Rozpraszanie Rayleigha: Szkło używane do produkcji światłowodów nie jest idealnie jednorodne. Jego współczynnik załamania ulega nieznacznym zmianom od miejsca do miejsca. Pomimo, że zmiany są bardzo małe to jednak powodują one rozpraszanie światła i jego odchylenie od początkowego kierunku rozchodzenia się. Jeśli rozmiary tych niejednorodności są małe w porównaniu z długością fali to rozpraszanie takie nazywamy rozpraszaniem Rayleigha. Jest ono podstawowym mechanizmem rozpraszania światła w światłowodach i jest proporcjonalne do λ^{-4} . Oprócz rozpraszania Rayleigha istnieją również inne mechanizmy prowadzące do rozpraszania światła takie jak: rozpraszanie Mie, które dotyczy rozpraszania na większych obiektach niż rozpraszanie Rayleigha. Ponadto dochodzą jeszcze wymuszone rozpraszania Ramana i Brillouina, które są procesami nieliniowymi i są znaczące jedynie w specjalnych przypadkach.

Chropowatość materiału: Tak jak materiał z którego zrobiony jest światłowód nie jest idealnie jednorodny tak również powierzchnie i granice (złącze rdzeń-płaszcz) nie są idealne co prowadzi do rozpraszania fotonów.

Sprężenie modów: Ten efekt jest ściśle powiązany z innymi efektami rozpraszania. Rozpraszanie niekoniecznie znaczy, że światło opuszcza światłowód. Światło rozchodzące się wzdłuż pewnej drogi optycznej (w danym modzie) może ulec rozproszeniu tak, że rozchodzi się dalej wzdłuż innej drogi optycznej (w innym modzie). Taka konwersja mocy promieniowania z jednego modu do drugiego jest problematyczna, gdyż prowadzi do dyspersji wielomodowej. Dodatkowo, detektor może być zoptymalizowany na dany mod i jeśli światło przychodzi w innym modzie może nie podlegać detekcji czyli jest tracone.

Zgięcie światłowodu: Zgięcie światłowodu również powoduje osłabienie wiązki światła. Zgięcia są klasyfikowane ze względu na ich amplitudę (niekoniecznie odpowiadającą promieniowi zgięcia) i dzielą się na *mikro* i *makrozgięcia* jak to pokazano na rysunku 1.5. Mikrozmętnienia mają dużo mniejszą amplitudę i występują w sposób periodyczny lub statystyczny wzdłuż światłowodu i pojawiają się w trakcie kładzenia światłowodów. Powstałe niejednorodności

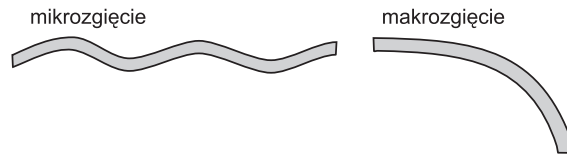


Figure 1.5: Różnica pomiędzy mikrozgięciem a makrozgięciem.

znowu prowadzą do ucieczki światła ze światłowodu oraz do jego konwersji międzymodowej. W makrozgięciach zgięcie jest znacznie dłuższe niż w mikrozgięciach. Światło rozchodzące się w wewnętrznej części zgięcia przebywa krótszą drogę niż to rozchodzące się w części zewnętrznej. Innym efektem jest to, że wskutek zgięcia zmieniają się właściwości światłowodu i mody wyższego rzędu nie rozchodzą się dalej wzdłuż rdzenia ale w płaszczu światłowodu.

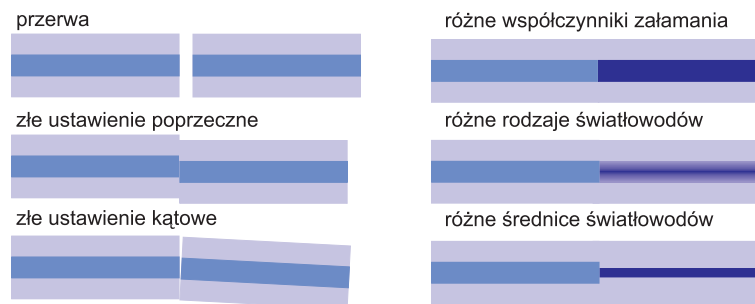


Figure 1.6: Powody strat na złączach.

Straty na złączach pomiędzy światłowodami: Jakiegokolwiek niejednorodności światłowodu powodują rozpraszanie światła i w konsekwencji jego osłabienie na wyjściu ze światłowodu. Efekty te odgrywają także istotną rolę w przypadku połączeń między światłowodami lub w przypadku łączenia światłowodu z nadajnikiem lub odbiornikiem. Szczególną rolę odgrywają tutaj dokładności mechaniczne jeżeli weźmiemy pod uwagę rozmiary rdzeni światłowodów, które wynoszą około $10\ \mu\text{m}$. Jakakolwiek niedokładność lub niejednorodność, jak to pokazano na rysunku 1.6, może powodować duże straty.

Najważniejsze źródła strat w światłowodach zostały przedstawione na rysunku 1.7.

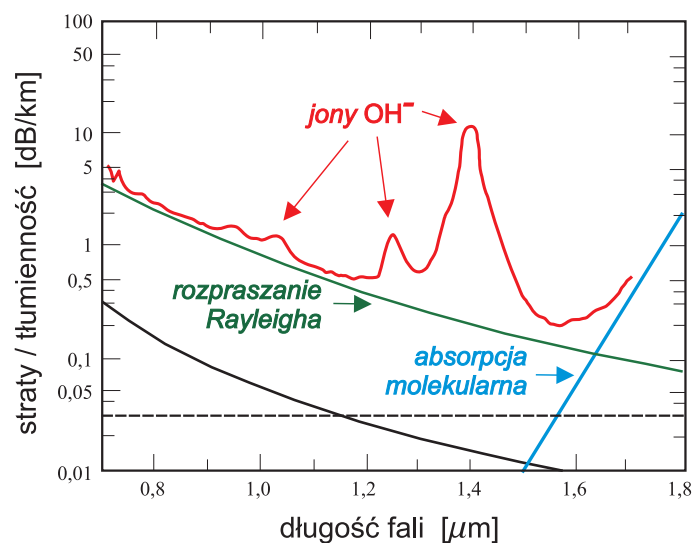


Figure 1.7: Najważniejsze źródła strat w światłowodach.

1.3 Aparatura i materiały

Laser diodowy @1550 nm ($P = 1$ mW), laser diodowy @1310 nm ($P = 1$ mW), fotodioda InGaAs DET01CFC (zakres pracy: 800-1700 nm, maksymalna mierzona moc: 70 mW), miernik mocy lasera PM122B (zakres pracy: 700-1800 nm, zakres mierzonych mocy: 35 nW – 35 mW), 2 kable światłowodowe.

1.4 Przebieg ćwiczenia

1.4.1 Pomiar charakterystyk moc optyczna–prąd zasilania złącza dla diod laserowych @1310 nm i @1550 nm

- Połączyć kablem światłowodowym wyjście z lasera @1310 nm z fotodiodą DET01CFC.
- Dla różnych wartości prądu przepływającego przez złącze zmierzyć moc optyczną rejestrowaną przez fotodiode.
- Wykreślić zależność mocy optycznej od prądu przepływającego przez złącze i wyznaczyć wartość prądu progowego diody laserowej.
- Identyczne pomiary przeprowadzić dla lasera diodowego @1550 nm.

1.4.2 Pomiar tłumienności wtrąceniowej związanej z wprowadzaniem wiązki do światłowodu

- Na końcu światłowodu referencyjnego zmierzyć moc wyjściową (P_1) diody laserowej @1550 nm za pomocą miernika mocy lub fotodiody (patrz rysunek 1.8a).
- Wpiąć badany kabel światłowodowy pomiędzy kabel referencyjny a miernik mocy i zanotować jego nowe wskazania (P_2)(patrz rysunek 1.8b).
- Wyliczyć tłumienność (straty) zgodnie z równaniem 1.8.
- Wyznaczyć tłumienność dla innego kabla światłowodowego z zestawu.
- Całą procedurę powtórzyć dla diody laserowej @1310 nm.
- Jak można byłoby poprawić dokładność wyznaczenia tłumienności?

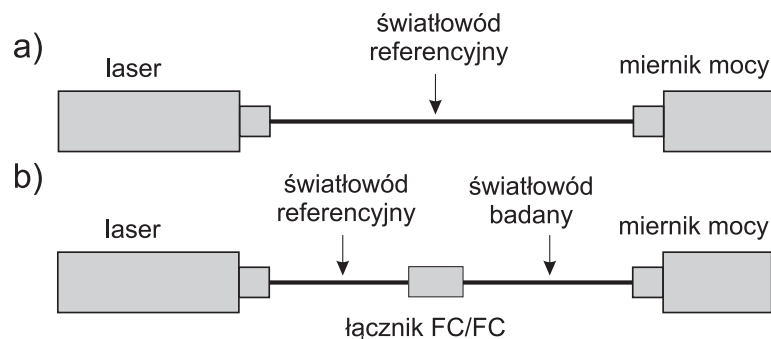


Figure 1.8: Układ doświadczalny do pomiaru tłumienności wtrąceniowej

1.4.3 Badanie tłumienności zgięciowej związanej ze zgięciami w kablach światłowodowych

- Używając np. diody laserowej @1550 nm zmierzyć moc optyczną po przejściu przez światłowod referencyjny.
- Zwinąwszy środkową część światłowodu w pętle o średnicy kolejno: 15, 20, 25, 30, 35...mm zmierzyć moc światła na wyjściu kabla.

UWAGA: nie zginać światłowodu w pętle o średnicy mniejszej niż 10 mm albo pod kątem 90°

- Wyznaczyć tłumienność kabla światłowodowego.
- wyrysować zależność strat (tłumienności) od średnicy zgięcia światłowodu. Skomentować otrzymaną zależność.
- jaka jest najmniejsza średnica pętli w jaką możemy zwinąć światłowod aby nie wprowadzić zbyt dużych strat?

1.5 Pytania końcowe

1. Jakie środki ostrożności należy przedsięwziąć gdy używamy elementów światłowodowych?
2. Wyjaśnić różnice między światłowodem jednomodowym a wielomodowym.
3. Co się stanie gdy światło wychodzące ze światłowodu wielomodowego wprowadzimy do światłowodu jednomodowego? Ile światła zostanie w ten sposób wprowadzone do światłowodu jednomodowego?
4. Jeśli odwrócimy kolejność światłowodów z pktu 2) ile światła zostanie wprowadzone do światłowodu wielomodowego?
5. Ile światła można wprowadzić ze światłowodu jednomodowego do jednomodowego?
6. Wymienić typowe rodzaje łączników światłowodowych.

Ćwiczenie 2

SPRZĘGACZE ŚWIATŁOWODOWE

Cele ćwiczenia: 1) zapoznanie się ze strukturą sprzęgaczy światłowodowych 3 i 4-portowych, 2) pomiar charakterystyki spektralnej sprzęgacza.

Słowa kluczowe: całkowite wewnętrzne odbicie, fala zanikająca, kierunkowy sprzęgacz światłowodowy, multiplexer, de-multiplexer, WDM.

2.1 Problemy do przestudiowania

- Sprzęganie czołowe i boczne.
- Zasada działania sprzęgacza kierunkowego.
- Całkowite wewnętrzne odbicie i fale zanikające.

2.2 Podstawy teoretyczne

Następnym szeroko stosowanym elementem światłowodowym jest sprzęgacz światłowodowy. Umożliwia on łączenie kilku strumieni sygnałów optycznych w jeden, przy czym sygnały te mogą mieć tę samą lub różne długości fal. W tym ostatnim przypadku, sprzęgacz nazywany jest multiplexerem. Sprzęgacz może także działać odwrotnie, to znaczy jako dzielnik lub de-multiplexer (gdy sygnały dzielone są w zależności od ich długości fali).

Najbardziej powszechnym typem sprzęgaczy światłowodowych są tzw. sprzęgacze kierunkowe. W sprzęgaczu kierunkowym rdzenie dwóch lub więcej światłowodów są zbliżone do siebie na odległość rzędu długości fali. W takiej sytuacji część światła z jednego rdzenia „przecieka” do innego rdzenia lub rdzeni. Ilość światła przechodzącego pomiędzy rdzeniami zależy od odległości pomiędzy nimi i długości na jakiej oddziałują ze sobą, a ponadto silnie zależy od długości fali. Przykładowo, parametry sprzęgacza zaprojektowanego dla długości fali 1310 nm są zdecydowanie inne niż sprzęgacza dla długości fali 1550 nm. Ta silna zależność od długości fali została przezwyciężona w najnowszej generacji sprzęgaczy szerokopasmowych, które równie dobrze działają dla długości fali 1310 nm jak i 1550 nm. Obecnie używane sprzęgacze kierunkowe mają współczynniki sprzężenia od 1% do 99%.

W ramach tego ćwiczenia badane są jedynie sprzęgacze działające na określonej długości fali. Drugi typ sprzęgaczy światłowodowych to sprzęgacze, które umożliwiają łączenie lub rozdzielanie sygnałów o różnych długościach fali nazywane sprzęgaczami z podziałem falowym (ang. Wavelength Division Multiplexing - WDM). Tego typu układy będą tematem następnego ćwiczenia.

2.3 Aparatura i materiały

3- i 4-portowe sprzęgacze kierunkowe, miernik mocy, kabel światłowodowy, lasery diodowe @1310 nm i @1550 nm, szerokopasmowe źródło światła @1550 nm, analizator widma.

2.4 Przebieg ćwiczenia

Podstawową funkcją każdego sprzęgacza światłowodowego jest przesył światła od portu do portu (lub do kilku portów), gdzie podział mocy świetlnej pomiędzy porty jest ściśle określony. Kluczowymi parametrami każdego sprzęgacza są: współczynnik sprzężenia, tłumienność, odpowiedź spektralna i współczynnik kierunkowości.

wchodzący w skład zestawu sprzęgacz 3-portowy (Rys.2.1a) jest sprzęgaczem 50/50 dla $\lambda = 1550$ nm. Oznacza to, że jeśli sygnał jest wprowadzony do portu 1, to 50% światła wychodzi przez port 2, a drugie 50% przez port 3. Sprzęgacz 4-portowy (Rys.2.1b) jest również sprzęgaczem typu 50/50. Ten sprzęgacz dzieli światło wchodzące przez porty 1 lub 4 w stosunku 1:1 i kieruje je do portów 2 i 3.

Jak wiadomo stosunek podziału sygnału pomiędzy porty 2 i 3 silnie zależy od długości fali. Podawane przez producentów współczynniki sprzężenia/podziału są poprawne jedynie w bardzo wąskim zakresie długości fal w okolicy długości fali, dla której sprzęgacz został zaprojektowany.

2.4.1 Pomiar tłumienności związanych z wprowadzaniem wiązki do sprzęgacza

- Zastosować procedurę opisaną w punkcie 1.4.2 poprzedniego ćwiczenia do pomiaru tłumienności sprzęgacza 3-portowego; najpierw pomiędzy portami 1 i 2, a następnie pomiędzy portami 1 i 3. Pomiary wykonać z laserem diodowym @1550 nm. Przedyskutować i wyjaśnić obserwacje.
- Wypisać wszystkie czynniki mające wpływ na wielkość strat.

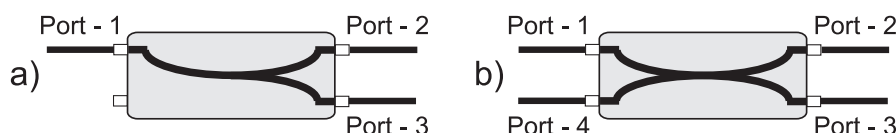


Figure 2.1: Schemat sprzęgacza kierunkowego a) 3- i b) 4-portowego.

2.4.2 Pomiar współczynnika sprzężenia/podziału dla sprzęgacza 3-portowego

- Wprowadzić światło z lasera @1550 nm do portu 1 i zmierzyć moc wiązki światła na wyjściu z portów 2 (P_2) i 3 (P_3)
- Jaki stosunek mocy wyjściowych P_2/P_3 otrzymujemy? Wyjaśnić obserwacje
- Powtórzyć pomiary dla lasera @1310 nm. Czy stosunek P_2/P_3 wynosi 50/50?

2.4.3 Pomiar odpowiedzi spektralnej sprzęgacza

- Przygotować szerokopasmowe źródło światła.
- Zapoznać się z działaniem analizatora widma i jego oprogramowaniem.
- Zmierzyć widmo źródła światła.

- Światło z szerokopasmowego źródła światła wprowadzić do portu 1 sprzęgacza. Za pomocą analizatora widma zmierzyć bezpośrednio odpowiedź spektralną dla portów 2 i 3.
- Wyznaczyć współczynnik sprzężenia/podziału przedyskutować kształt otrzymanych krzywych.

2.4.4 Badanie współczynnika kierunkowości sprzęgacza

Pomiary przeprowadzone zostaną dla sprzęgacza 4-portowego.

- Wprowadzić światło o mocy P_1 z lasera diodowego @1550 nm do portu 1 i zmierzyć moce świetlne P_2 , P_3 i P_4 odpowiednio na wyjściach portów 2, 3 i 4.
- Dlaczego sygnał na wyjściu portu 4 jest tak słaby?
- Współczynnik kierunkowości mierzony jest jako $10 \times \log(P_1/P_4)$. Wyznaczyć ten współczynnik dla badanego sprzęgacza.

2.5 Pytania końcowe

1. Podać zastosowania sprzęgaczy światłowodowych.
2. Jakie parametry charakteryzują sprzęgacz ?

Ćwiczenie 3

SPRZĘGACZE TYPU WDM

Cele ćwiczenia: 1) zapoznanie się z zasadą separacji sygnałów o różnych długościach fali za pomocą sprzęgacza WDM, 2) zapoznanie się z zastosowaniami sprzęgaczy WDM we wzmacniaczach i sieciach optycznych.

Słowa kluczowe: sprzęgacz WDM, wzmacniacz optyczny, sieć optyczna, siatka dyfrakcyjna

3.1 Problemy do przestudiowania

- Jaka jest różnica pomiędzy sieciami typu „time-division-multiplexing” (TDM) a „wavelength-division-multiplexing” (WDM)?
- Co to jest siatka dyfrakcyjna?
- Jak można użyć siatki dyfrakcyjnej jako sprzęgacza WDM?
- Wymienić 3 pasma optyczne stosowane w komunikacji światłowodowej.
- Dlaczego pasmo 1550 nm jest uważane za najlepsze dla komunikacji optycznej?
- Jakie są zalety sieci WDM w porównaniu z siecią działającą w oparciu o jedną długość fali?

3.2 Podstawy teoretyczne

Sprzęgacze z podziałem długości fali (ang. wavelength division multiplexing – WDM coupler) to sprzęgacze zoptymalizowane pod kątem łączenia (lub rozdzielania) sygnałów o różnych długościach fali z różnych portów (lub do różnych portów). Odgrywają one bardzo istotną rolę w sieciach WDM, gdzie sygnały o różnych długościach fal są łączone lub rozdzielane przed tym nim zostaną skierowane do odpowiednich adresatów. Zasada działania powszechnie używanych sprzęgaczy WDM została przedstawiona na rysunku 3.1 i wyjaśniona na przykład w pozycji [1].

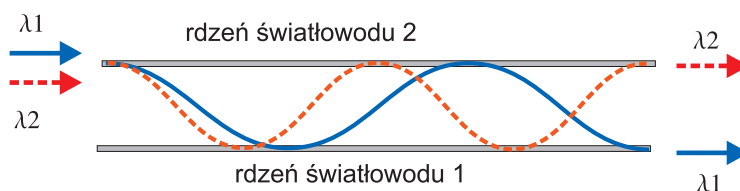


Figure 3.1: Zasada działania światłowodowego sprzęgacza typu WDM: wymiana energii wzdłuż dwóch sprzężonych światłowodów na długościach fali λ_1 i λ_2 .

3.3 Aparatura i materiały

Sprzęgacz WDM dla źródła pompującego (ang. pump WDM coupler), sprzęgacz WDM dla sygnału (ang. signal WDM coupler), laser pompujący @980 nm, miernik mocy, źródło światła @1550 nm, opcjonalnie źródło światła @1310 nm.

3.4 Przebieg ćwiczenia

Własności spektralne sprzęgaczy WDM zależą od ich zastosowania. Na przykład, używane we wzmacniaczach światłowodowych działają w zakresach ± 10 nm i ± 25 nm odpowiednio dla układu pompującego i sygnałowego. Z kolei, tzw. **gęste** sprzęgacze WDM, w sieciach optycznych, pozwalają na separację sygnałów (kanałów) różniących się o zaledwie 0.2 nm. Poniższe doświadczenia są zaprojektowane w ten sposób aby pokazać własności spektralne sprzęgaczy typu WDM.

3.4.1 Badanie sprzęgacza WDM pompa-sygnał

- Podłączyć laser pompujący @980 nm do portu pompującego sprzęgacza WDM i zmierzyć moc sygnału w porcie wyjściowym.
- Podłączyć laser pompujący @980 nm do portu sygnałowego sprzęgacza WDM i zmierzyć moc sygnału w porcie wyjściowym.
- Jaka jest różnica sygnałów wyjściowych w powyższych przypadkach ?
- Podłączyć źródło światła @1550 nm do portu pompującego sprzęgacza WDM i zmierzyć moc sygnału w porcie wyjściowym.
- Następnie, podłączyć źródło światła @1550 nm do portu sygnałowego i zmierzyć moc sygnału w porcie wyjściowym.
- Jaka jest różnica sygnałów wyjściowych w powyższych przypadkach ?
- Podłączyć laser pompujący @980 nm do portu pompującego sprzęgacza WDM, a źródło światła @1550 nm do portu sygnałowego i zmierzyć całkowitą moc w porcie wyjściowym. Czy zmierzona moc jest sumą mocy wyjściowych mierzonych w przypadku podłączenia każdego ze źródeł z osobna ?

3.4.2 Badanie sprzęgacza sygnałowego WDM

W tym przypadku sprzęgacz WDM będzie używany jako dzielnik/demultiplekser.

- Wprowadzić światło ze źródła @1310 nm do wspólnego portu 1310+1550 i zmierzyć moc sygnału na portach 1310 nm i 1550 nm. Skomentować obserwacje.
- Powtórzyć pomiary dla źródła światła @1550 nm.
- Wprowadzić światło ze źródeł 1310 nm i 1550 nm do odpowiednich portów. Zmierzyć moc sygnału na wyjściu z portu 1310+1550.
- Przedyskutować zmiany mocy wyjściowej w 3 powyższych pomiarach.

Ćwiczenie 4

IZOLATORY OPTYCZNE

Cel ćwiczenia: 1) zapoznanie się z zasadą działania izolatora optycznego, 2) zapoznanie się z wpływem izolatorów optycznych na stabilną pracę laserów oraz wzmacniaczy i sieci optycznych.

Słowa kluczowe: izolator optyczny, efekt Faradaya, polaryzacja światła, dwójłomność, płytki fazowe/falowe

4.1 Pytania i problemy do przestudiowania

- Podać źródła odbić w elementach światłowodowych
- Wypolerowana końcówka światłowodu odbija 4% światła. Wyrazić tę wartość w decybelach (dB).
- Jakie materiały nazywamy optycznie aktywnymi?
- Na czym polega efekt Faradaya?

4.2 Podstawy teoretyczne

Izolator optyczny to urządzenie, które pozwala na transmisję światła tylko w jednym kierunku, tym samym działające jak zawór jednokierunkowy. Izolatory optyczne zapobiegają powrotowi światła odbitego do źródła, co chroni je (w szczególności lasery diodowe) przed uszkodzeniem i niestabilną pracą.

Izolator optyczny składa się z rotatora Faradaya umieszczonego pomiędzy dwoma polaryzatorami, których osie optyczne są ustawione względem siebie pod kątem 45° . Na rotator Faradaya składają się materiał magnetooptyczny, np. kryształu granatu, i stały magnes wytwarzający pole magnetyczne o odpowiedniej wartości. Gęstość strumienia pola magnetycznego jest tak dobrana, że rotator obraca wektor polaryzacji światła o kąt 45° zgodnie z ruchem śruby prawoskrętnej skierowanej wzdłuż osi z (Rys. 4.1a). Światło rozchodzące się w izolatorze w kierunku do przodu (od strony lewej do prawej) przechodzi przez polaryzator A, a następnie jego płaszczyzna polaryzacji zostaje skrzyżowana o 45° , co umożliwia jego transmisję przez polaryzator B. Światło liniowo spolaryzowane, ale rozchodzące się wstecz (od strony prawej do lewej) (Rys. 4.1b), przechodzi przez polaryzator B. Jednak po przejściu przez rotator Faradaya jego płaszczyzna polaryzacji zostaje skrzyżowana dodatkowo o 45° wskutek czego światło to jest blokowane przez polaryzator A. Ponieważ światło rozchodzące się wstecz może być wynikiem odbić wiązki rozchodzącej się do przodu od kolejnych elementów w układzie, dlatego izolator zabezpiecza źródło przed światłem odbitym. Należy podkreślić, że niezbędnym elementem izolatora jest rotator Faradaya i nie może on być zastąpiony przez materiał optycznie aktywny czy ciekły kryształ. Tego typu elementy optyczne

działają w ten sposób, że polaryzacja fali odbitej jest taka sama jak fali padającej i dlatego przechodzi ona przez polaryzator A, z powrotem w kierunku źródła. Osłabienie wiązki wstecznej w izolatorach optycznych, w których rotator Faraday'a zawiera kryształ granatu itrowo-żelazowego (YIG – yttrium iron garnet) lub granatu terbowo-galowego (TGG – terbium gallium garnet), wynosi 90 dB w bardzo szerokim zakresie spektralnym.

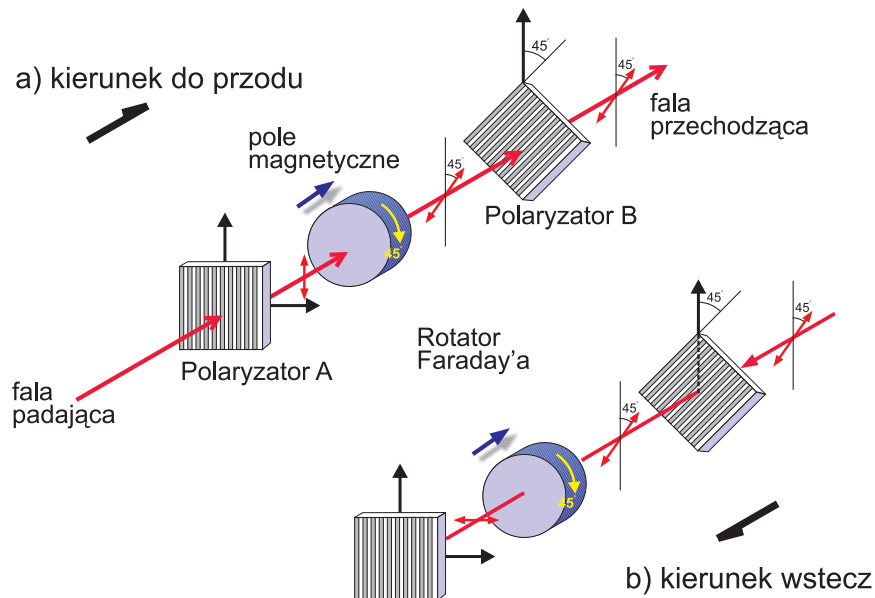


Figure 4.1: Izolator optyczny wykorzystujący rotator Faraday'a. a) wiązka rozchodząca się do przodu jest transmitowana przez układ. b) wiązka rozchodząca się wstecz jest blokowana.

Zasadniczo istnieją dwa rodzaje izolatorów optycznych: zależne i niezależne od polaryzacji fali padającej. Te pierwsze używane są głównie w układach z laserami diodowymi, podczas gdy drugie są powszechnie stosowane w systemach światłowodowych. Zasada działania obu typów izolatorów jest identyczna ale różnią się one szczegółami konstrukcyjnymi. Izolatory wchodzące w skład tego zestawu działają niezależnie od polaryzacji fali świetlnej.

Izolator optyczny działający niezależnie od polaryzacji fali świetlnej

(A) Kierunek do przodu

Rotator Faraday'a umieszczony jest pomiędzy dwiema klinowymi płytkami wykonanymi z materiału dwójłomnego. Na obu końcach izolatora znajdują się miniaturowe soczewki w celu sprzężenia światła do światłowodu. Wiązka rozchodząca się do przodu (z lewa na prawo) zostaje rozseparowana za pomocą płytki dwójłomnej (PD1) na tzw. promienie zwyczajny i nadzwyczajny, których płaszczyzny polaryzacji zaznaczone są strzałkami odpowiednio poziomą i pionową. Płaszczyzny polaryzacji tych promieni są następnie obrócone przez Rotator Faraday'a o 45° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (tak jak to pokazują strzałki na rysunku 4.2a tuż przed drugą płytką dwójłomną). Dalej, promienie zwyczajny (PZ) i nadzwyczajny (PN) przechodzą przez drugą płytkę dwójłomną (PD2), której oś optyczna jest ustawiona tak, że relacje pomiędzy PZ i PN są zachowane. W konsekwencji, oba promienie ulegają załamaniu w tym samym kierunku i na wyjściu z drugiej płytki dwójłomnej rozchodzą się równolegle do siebie. Ostatecznie obie wiązki zostają zogniskowane przez soczewkę i wprowadzone do światłowodu.

(B) Kierunek wstecz

Światło rozchodzące się wstecz i padające na izolator zostaje rozdzielone przez płytkę PD2 na promienie zwyczajny i nadzwyczajny jak to pokazano na rysunku 4.2b. Kryształ Faraday'a znowu

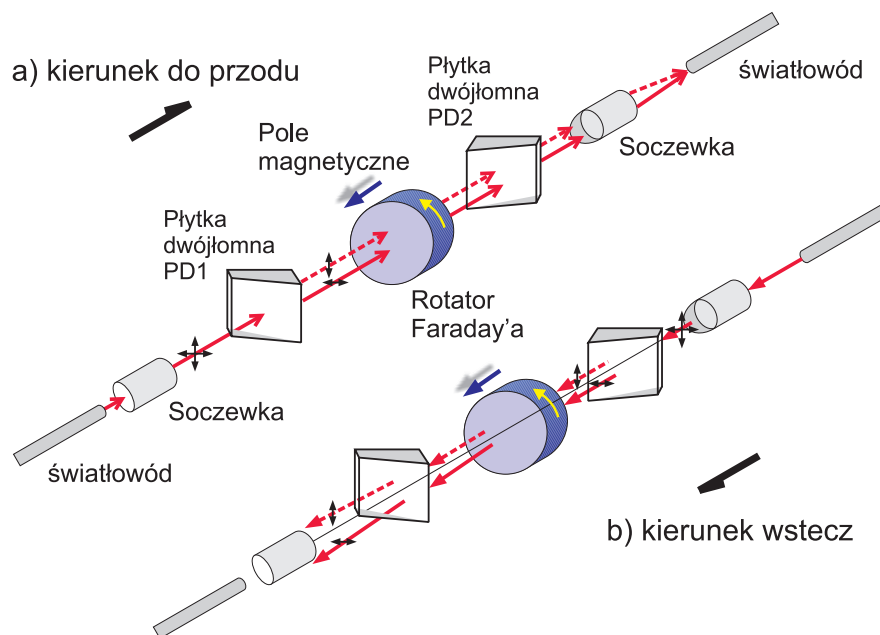


Figure 4.2: Izolator optyczny działający niezależnie od polaryzacji wiązki świetlnej.

powoduje obrót płaszczyzny polaryzacji tych promieni o 45° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Następnie, oba te promienie przechodząc przez PD1 rozbiegają się i nie mogą być prawidłowo wprowadzone do światłowodu wprowadzającego światło.

Zasada działania izolatora dwustopniowego jest taka sama jak jednostopniowego z tą różnicą, że wyposażony jest on w dwa rotatory Faraday'a oddzielone dodatkową płytką dwójłomną. Dodatkowy rotator Faraday'a powoduje zwiększenie rozbieżności wiązki rozchodzącej się wstecz a tym samym zmniejszenie ilości światła padającego na końcówkę światłowodu wprowadzającego.

Powszechnie używane izolatory jedno- i dwustopniowe zapewniają izolację na poziomie odpowiednio 30dB i 45dB. Stosowanie izolatorów dwustopniowych jest nieodzowne dla prawidłowego działania laserów dużej mocy oraz wzmacniaczy optycznych.

4.3 Aparatura i materiały

Izolatory optyczne jedno- i dwustopniowy, laser @1550 nm, laser @980 nm, kable światłowodowe, miernik mocy.

4.4 Przebieg ćwiczenia

W trakcie tego ćwiczenia badana jest jednokierunkowość izolatora optycznego i wyznaczana jest wartość tzw. izolacji optycznej.

- Wprowadzić wiązkę światła z lasera @1550 nm do jednostopniowego izolatora optycznego (wzdłuż kierunku pokazanego strzałką) i zmierzyć moc (P_1) światła na wyjściu izolatora.
- Wprowadzić tę samą wiązkę światła do izolatora optycznego w kierunku przeciwnym niż pokazuje strzałka i zmierzyć moc (P_2) światła na wyjściu izolatora.
- Obliczyć wartość izolacji optycznej (P_2/P_1) izolatora jednostopniowego i wyrazić wynik w dB.

- Powtórzyć pomiary dla dwustopniowego izolatora optycznego.
- Jaka będzie wartość izolacji optycznej gdy oba izolatory zostaną połączone w szereg?
- Powtórzyć wszystkie powyższe pomiary z laserami @980 nm i @1310 nm.
Co zaobserwowano i dlaczego?

Ćwiczenie 5

CYRKULATORY OPTYCZNE

Cel ćwiczenia: 1) zapoznanie się z zasadą działania cyrkulatora optycznego, 2) zapoznanie się z zastosowaniem cyrkulatorów optycznych.

Słowa kluczowe: cyrkulator optyczny, efekt Faradaya, polaryzacja światła, dwójłomność, płytki fazowe/falowe

5.1 Pytania i problemy do przestudiowania

- Czy w cyrkulatorze 4-portowym sygnał może być bezpośrednio przesłany od portu 1 do portu 3?
- Podać podobieństwa i różnice pomiędzy 3dB 3-portowym sprzęgaczem światłowodowym a 3-portowym cyrkulatorem optycznym.

5.2 Podstawy teoretyczne

Cyrkulatory optyczne to sprzęgacze światłowodowe, w których sprzężenie zależy od kierunku propagacji światła. Służą one do przesyłania sygnałów świetlnych z i (lub) do określonego wejścia (wyjścia). Porty mogą albo być tylko wejściowe, albo tylko wyjściowe, albo spełniać obie funkcje naraz. Istnieją dwa warianty cyrkulatorów: 3-portowe i 4-portowe.

W cyrkulatorze 3-portowym (Rys.5.1a), sygnał świetlny wchodzi przez port-1 i wychodzi przez port-3, a port-2 jest portem dwukierunkowym. Z kolei w cyrkulatorze 4-portowym (Rys.5.1b) światło wchodzi przez port-1, wychodzi przez port-4, zaś porty 2 i 3 są portami dwukierunkowymi.

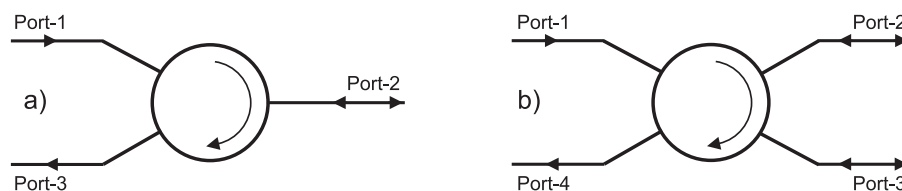


Figure 5.1: Cyrkulatory optyczne: a) 3-portowy, b) 4-portowy.

Cyrkulatory są bardzo uniwersalnymi urządzeniami, powszechnie używanymi w sieciach optycznych. Bardzo często cyrkulatory są używane łącznie ze światłowodowymi siatkami Bragga w zastosowaniach czujnikowych.

Na przykład podłączając wzmacniacz światłowodowy typu EDFA (erbium doped fiber amplifier) do portów 1 i 3, a siatkę Bragga do portu 2 cyrkulatora 3-portowego otrzymujemy w efekcie światłowodowy laser pierścieniowy. Laser taki pracuje na długości fali określonej przez siatkę Bragga,

której wolny koniec jest wyjściem promieniowania laserowego.

Cyrkulatory optyczne zbudowane są z takich samych elementów optycznych jak izolatory optyczne. Mianowicie, zawierają polaryzatory, rotatory Faraday'a, płytki falowe, pryzmaty i płytki światłodziące. W trakcie propagacji światła przez cyrkulator elementy te skręcają płaszczyznę polaryzacji światła i rozdzielają różne stany polaryzacyjne wiązki świetlnej. Dla odpowiedniej konstrukcji cyrkulatora wiązka odbita może być całkowicie wytłumiona (podobnie jak to się dzieje w izolatorze optycznym) lub skierowana do portu innego niż wejściowy. Dlatego własności izolacyjne cyrkulatorów są podobne jak izolatorów optycznych. Na przykład, w cyrkulatorze 3-portowym istnieje silna izolacja optyczna pomiędzy portami 1 i 2 oraz 2 i 3.

Na rysunku 5.2 pokazana jest wewnętrzna konfiguracja komercyjnego cyrkulatora 3-portowego, niezręcznego na polaryzację sygnału wejściowego.

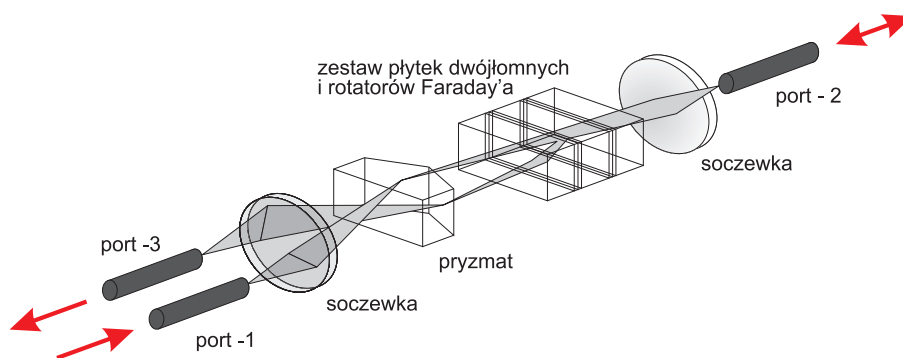


Figure 5.2: Budowa wewnętrzna cyrkulatora optycznego.

Światło wychodzące ze światłowodu w porcie 1, za pomocą soczewki i pryzmatu zostaje skierowane do urządzenia złożonego ze stosu płytek dwójłomnych i rotatorów Faraday'a. Wiązka rozchodząca się do przodu zostaje następnie zogniskowana przez drugą soczewkę na światłowodzie w porcie 2. Wiązka rozchodząca się wstecz z portu 2 jest odchylana przez system płytek i rotatorów w kierunku światłowodu w porcie 3. W ten sposób światło krąży w układzie cyrkulatora tylko w jednym kierunku.

Z powodu dużych rozmiarów elementów składowych, tłumienność wtrąceniowa (ang. insertion loss) cyrkulatorów jest nieco większa niż innych typów sprzęgaczy światłowodowych. Ich działanie jest także silnie zależne od długości fali ponieważ własności płytek dwójłomnych i rotatorów Faraday'a zależą od długości fali.

5.3 Aparatura i materiały

3-portowy i 4-portowy cyrkulatory optyczne, laser @1550 nm, szerokopasmowe źródło światła @1550 nm, światłowodowa siatka Bragg @1553 nm, miernik mocy, kable światłowodowe.

5.4 Przebieg ćwiczenia

W trakcie tego ćwiczenia badane są własności 3- i 4-portowych cyrkulatorów optycznych.

5.4.1 Badanie 3-portowego cyrkulatora optycznego

- Podłączyć źródło światła @1550 nm do portu 1 i zmierzyć moc wyjściową w portach 2 i 3. Co zaobserwowano? Dlaczego?

- Podłączyć źródło światła @1550 nm do portu 2 i zmierzyć moc wyjściową w portach 1 i 3. Co zaobserwowano? Dlaczego?
- Podłączyć źródło światła @1550 nm do portu 1 i zmierzyć moc wyjściową w porcie 3, gdy równocześnie siatka Bragga podłączona jest do portu 2.
- Podłączyć źródło światła @1550 nm do portu 3 i zmierzyć moc na wyjściu z portów 1 i 2. Wytłumaczyć obserwacje.
- Podłączyć źródło światła @1550 nm do portu 1, a siatkę Bragga do portu 2 i zmierzyć moc wyjściową na wolnym końcu siatki i w porcie 3. Opisać i wyjaśnić swoje obserwacje dotyczące rejestrowanych mocy światła.

5.4.2 Badanie 4-portowego cyrkulatora optycznego

- Podłączyć laser @1550 nm do portu 1 i zmierzyć moc wyjściową w portach 2, 3 i 4. Wyjaśnić swoje obserwacje.
- Podłączyć laser @1550 nm do portu 2 i zmierzyć moc wyjściową w portach 1, 3 i 4. Wyjaśnić swoje obserwacje.
- Podłączyć laser @1550 nm do portu 3 i zmierzyć moc wyjściową w portach 1, 2 i 4. Wyjaśnić swoje obserwacje.

Ćwiczenie 6

ŚWIATŁOWODOWE SIATKI BRAGGA

Cel ćwiczenia: 1) zapoznanie się z działaniem i podstawowymi charakterystykami siatek Bragga, 2) zapoznanie się z zastosowaniem światłowodowych siatek Bragga.

Słowa kluczowe: światłowodowa siatka Bragga (fiber Bragg grating - FBG), długość fali Bragga, transmisja, odbicie

6.1 Pytania i problemy do przestudiowania

- Wyprowadzić równanie Bragga: $\lambda_B = 2n\Lambda$, gdzie n jest średnim współczynnikiem załamania rdzenia światłowodu, a Λ - odległością pomiędzy dwiema kolejnymi płaszczyznami współcz. załamania siatki Bragga (okres siatki).
- Współczynnik odbicia siatki Bragga można zmieniać od kilku % do 99%. Jak to zrobić?
- Opisać dwie podstawowe metody wytwarzania siatek Bragga w światłowodzie.
- Co to jest **distributed FBG**?

6.2 Podstawy teoretyczne

Światłowodowa siatka Bragga (SSB) to światłowód, w którego części współczynnik załamania rdzenia zmienia się w sposób okresowy. Pomimo, że doniesienia o pierwszych światłowodowych siatkach Bragga pojawiły się już w 1978 roku [?], to intensywne badania nad ich własnościami rozpoczęły się dopiero 10 lat później [6] po opanowaniu metody ich wytwarzania.

Siatki tego typu otrzymuje się poprzez naświetlenie specjalnego światłowodu promieniowaniem UV o przestrzennie modulowanym rozkładzie natężenia. Jeżeli szeroka spektralnie wiązka światła (na przykład z diody elektroluminescencyjnej) zostaje wprowadzona do takiego światłowodu i oddziałuje z wytworzoną siatką, wówczas promieniowanie o długości fali Bragga λ_B , w wąskim zakresie spektralnym rzędu 0.2 nm, zostaje odbite, a transmisja pozostałych długości fal odbywa się bez zakłóceń (Rys. 6.1). Jeżeli okres siatki wynosi Λ to długość fali Bragga spełnia warunek:

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda, \quad (6.1)$$

gdzie n_{ef} jest efektywnym współczynnikiem załamania rdzenia światłowodu. Szerokość spektralna odbitego sygnału zależy głównie od długości siatki i dla większości siatek wynosi od około 0.05 do 0.3 nm.

Działanie siatki Bragga jest więc podobne do działania zwierciadła o dużym stopniu selekcji. Oczywistym zastosowaniem jest więc użycie SSB jako zwierciadła np. w rezonatorach laserów diodowych. Z drugiej strony SSB o małym współczynniku odbicia mogą dostarczyć sprzężenia zwrotnego na określonej długości fali po to aby wymusić pracę laserów diodowych takich jak lasery pompujące na określonej długości fali z dużą stabilnością.

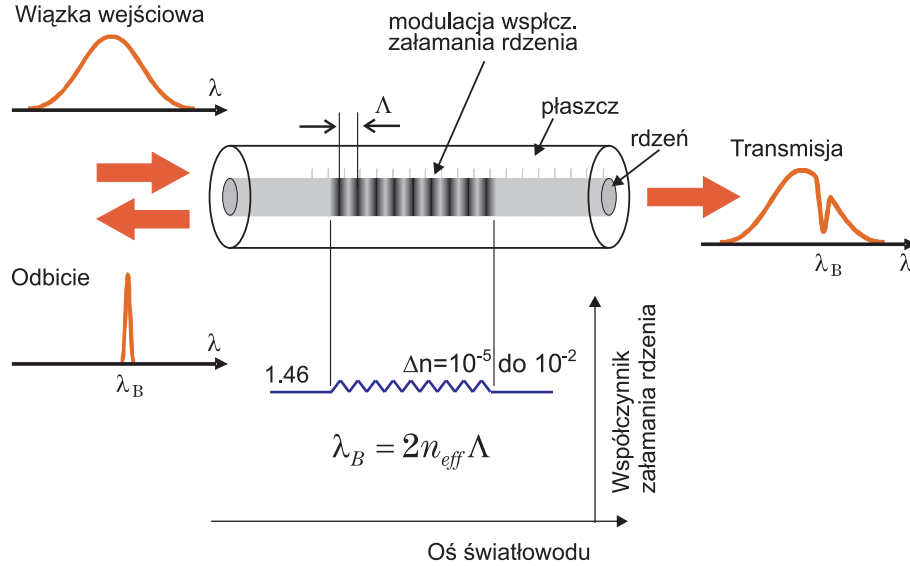


Figure 6.1: Charakterystyki odbiciowa i transmisyjna światłowodowej siatki Bragga.

Zaburzenie siatki, czy to poprzez zmianę jej okresu, czy też współczynnika załamania, powoduje przesunięcie długości fali Bragga. Zmiany te można wykrywać mierząc rozkład spektralny sygnału odbitego lub sygnału przechodzącego (Rys. 6.1).

Zastosowania SSB jako czujnika wynikają głównie z zależności λ_B od odkształcenia światłowodu, które może być powodowane zarówno jego wydłużeniem (prowadzącym do zmiany okresu siatki Λ) jak i zmianą efektywnego współczynnika załamania na skutek efektów elastooptycznych. Zmianę długości fali Bragga można wtedy zapisać jako:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_{el})\varepsilon, \quad (6.2)$$

gdzie ε jest wielkością odkształcenia jakiemu poddany został czujnik SSB, a p_{el} jest współczynnikiem elastooptycznym. Oprócz zmian związanych z odkształceniem światłowodu, zmiana λ_B zachodzi także pod wpływem zmian temperatury. Temperaturowa zależność długości fali Bragga pojawia się wskutek: 1) termicznej rozszerzalności szkła i 2) temperaturowej zależności współczynnika załamania szkła, który to efekt jest dominujący w przypadku światłowodów krzemowych. Typowe przesunięcia długości fali Bragga pod wpływem odkształcenia wynoszą $0.64\text{pm}/\mu\varepsilon$, $1.0\text{pm}/\mu\varepsilon$ i $1.2\text{pm}/\mu\varepsilon$ dla długości fal odpowiednio 830nm, 1300nm i 1550nm. Jednostką odkształcenia jest strain (ε). Odkształcenie ma wartość $1\mu\varepsilon$, jeżeli światłowod o długości 1m uległ wydłużeniu o $1\mu\text{m}$. Z kolei temperaturowe zmiany λ_B wynoszą $6.8\text{pm}/^\circ\text{C}$, $10.0\text{pm}/^\circ\text{C}$ i $13.0\text{pm}/^\circ\text{C}$ dla długości fal odpowiednio 830nm, 1300nm i 1550nm.

To co odróżnia czujniki SSB od innych czujników światłowodowych to to, że informacja o zachodzących zmianach interesującego nas parametru zostaje zapisana jako zmiana długości fali, a nie natężenia. Taki sposób detekcji ma szereg zalet. Przede wszystkim, rejestrowana długość fali nie zależy od poziomu strat w światłowodzie i na złączach pomiędzy światłowodami i układami sprzęgającymi oraz jest ona odporna na ewentualne fluktuacje natężenia źródła światła. Dodatkowo, taki sposób kodowania informacji pozwala na rozmieszczenie szeregu czujników w ramach pojedynczego światłowodu, z których każdy przypisany jest do innego obszaru spektralnego

używanego źródła światła. To z kolei umożliwia kontrolę przestrzennego rozkładu odkształcenia lub/i temperatury.

6.3 Aparatura i materiały

szerokopasmowe źródło światła @1550nm, analizator widma, miernik mocy, światłowodowa siatka Bragga @1553nm, 3-portowy cyrkulator optyczny, kable światłowodowe

6.4 Przebieg ćwiczenia

W trakcie tego ćwiczenia demonstrowane jest selektywne odbicie SSB i możliwości praktycznych zastosowań z tym związanych.

- Za pomocą analizatora widma zmierzyć rozkład natężenia I_0 źródła światła szerokopasmowego
- Podłączyć źródło światła do portu 1, siatkę Bragga do portu 2 cyrkulatora optycznego.
- Za pomocą analizatora widma zmierzyć rozkład natężenia światła I_3 na wyjściu z portu 3 cyrkulatora.
- Wyznaczyć krzywą transmisji I_3/I_0 w zależności od długości fali.
- Dla tych samych połączeń jak powyżej zmierzyć rozkład natężenia światła I_{FBG} na wyjściu z siatki Bragga i wyznaczyć krzywą transmisji I_{FBG}/I_0 .
- Jaka jest długość fali Bragga dla tej siatki?
- Zakładając, że średnia wartość współczynnika załamania materiału rdzenia światłowodu wynosi $n = 1.46$ wyznaczyć okres Λ siatki Bragga.

Ćwiczenie 7

WZMACNIACZ ŚWIATŁOWODOWY EDFA

Cel ćwiczenia: 1) wyznaczenie krzywej absorpcyjnej światłowodu kwarcowego domieszkowanego erbem – optymalizacja długości fali światła wzbudzającego jony Er, 2) wyznaczenie krzywej fluorescencyjnej światłowodu kwarcowego domieszkowanego erbem – wyznaczenie zakresu długości fal, w którym zachodzi wzmocnienie optyczne, 3) zapoznanie się z zasadą działania wzmacniacza optycznego typu EDFA, 4) budowa podstawowego układu wzmacniacza optycznego EDFA, 5) wyznaczenie charakterystyki wzmacniacza EDFA.

Słowa kluczowe: światłowód szklany domieszkowany erbem, absorpcja, fluorescencja, wzmacniacz optyczny, wzmocnienie, EDFA (erbium-doped fiber amplifier)

7.1 Pytania i problemy do przestudiowania

- Wymienić przyczyny, dla których światłowody domieszkowane erbem (SDErb) są idealnym materiałem do budowy wzmacniaczy optycznych.
- Podać inne rodzaje szkieł domieszkowanych erbem używanych jako ośrodki wzmacniające.
- Opisać strukturę poziomów energetycznych jonu Er^{3+} oraz podać maksima absorpcyjne i fluorescencyjne.
- Co się stanie jeśli SDErb będzie pompowany światłem lasera o długości fali 1550nm?
- Pompując SDErb laserem o długości fali 980nm obserwowana jest emisja na długości fali 550nm. Wyjaśnić pochodzenie tej emisji.
- Opisać zasadę działania wzmacniacza światłowodowego. Jakie 3 podstawowe procesy zachodzą we wzmacniaczu EDFA.
- Na jakiej zasadzie powstaje wzmocniona emisja spontaniczna (amplified spontaneous emission – ASE)?
- Moc wyjściowa wzmacniacza EDFA jest zwykle podawana w dBm. Podaj wartość mocy wyrażoną w mW, która odpowiada wartości 0dBm.

7.2 Podstawy teoretyczne

Światłowód kwarcowy domieszkowany erbem został opracowany na Uniwersytecie Southampton w 1980 roku. Cechą charakterystyczną jonów erbu jest to, że ich widmo fluorescencyjne przy-

pada na obszar małej tłumienności światłowodu kwarcowego czyli okolice 1550 nm. Fakt ten sprawił, że taki domieszkowany światłowod był idealnym materiałem do konstrukcji wzmacniacza optycznego w zastosowaniu do sieci światłowodowych. Dalszy rozwój technologii, w szczególności technologii wytwarzania laserów półprzewodnikowych, spowodował, że wzmacniacze typu EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) są podstawowymi elementami wszystkich najnowszych sieci światłowodowych.

Światłowody domieszkowane erbem mogą być łączone w sposób trwały (spawane) z innymi elementami światłowodowymi, co daje złącza o małej tłumienności. Jedyną wadą jest to, że koncentracja atomów erbu w światłowodzie kwarcowym nie może przekraczać wartości 400ppm, powyżej której następuje klasteryzacja. To ograniczenie oznacza, że aby wzmacniacz typu EDFA był użyteczny, czyli aby otrzymać odpowiednio duże wzmocnienie, należy stosować dosyć długie (od kilku do kilkudziesięciu metrów) odcinki takich światłowodów.

Oprócz wzmacniaczy EDFA, światłowody domieszkowane erbem znalazły także zastosowanie w laserach włóknowych i czujnikach światłowodowych.

Widma absorpcji i fluorescencji Er^{3+}

Konfiguracja elektronowa stanu podstawowego jonu Er^{3+} wynosi $[\text{Kr}]4d^{10}4f^{11}5s^25p^6$. Oddziaływania spin-spin i spin-orbita w przypadku nie całkowicie zapełnionej powłoki $4f$ prowadzą do pojawienia się wielu poziomów jak to pokazano na rysunku 7.1. W wyniku oddziaływania z materiałem macierzystym (szkłem) każdy z tych poziomów ulega rozszczępieniu Starka.

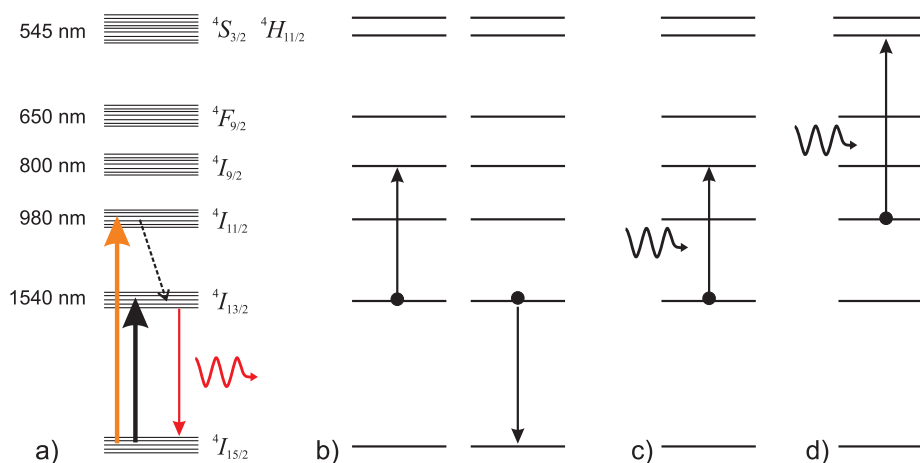


Figure 7.1: Schematyczny układ poziomów energetycznych $4f$ jonu Er^{3+} . a) przejście 1540nm, strzałki oznaczają wzbudzenie przy użyciu światła o długościach fal 980nm i 1480nm. b) proces konwersji w górę, gdzie oddziaływanie pomiędzy dwoma wzbudzonymi jonami Er^{3+} prowadzi do obsadzenia wyżej położonych poziomów energetycznych. c) i d) procesy absorpcji fotonów przez wzbudzone jony odpowiednio fotonów o długości fali 1480nm i 980nm.

Przejście z pierwszego stanu wzbudzonego $4I_{13/2}$ do stanu podstawowego $4I_{15/2}$ zachodzi na długości fali 1540nm. Długość emitowanej fali jest stosunkowo nieczuła na materiał macierzysty ponieważ elektrony na powłóce $4f$ są dobrze izolowane od otoczenia przez zapełnione powłoki $5s$ i $5p$.

Widmo fluorescencji jonów erbu charakteryzuje się szerokim pasmem wyśrodkowanym na długości fali 1550nm. Emisję w tym zakresie spektralnym można otrzymać poprzez wzbudzenie promieniowaniem z zakresu długości fal: 850 nm, 980 nm lub 1480 nm, które są silnie absorbowane.

Lasery o takich długościach fal mogą być zatem używane jako źródła wzbudzenia.

Oprócz procesów absorpcji fotonów pompujących i emisji fotonów użytecznych z punktu widzenia wzmocnienia optycznego istnieje szereg innych procesów bezpośrednio wpływających na kształt widm absorpcyjnego i emisyjnego. Mianowicie, fotony użyteczne w procesie wzmocnienia i fotony pompujące są reabsorbowane przez jony w stanach odpowiednio podstawowym i wzbudzonych (patrz Rys.7.1b-d). Prowadzi to do zmniejszenia liczby fotonów użytecznych i w efekcie zmniejszenia wzmocnienia. Całkowity współczynnik wzmocnienia wzmacniacza światłowodowego jest wypadkową wielu czynników takich jak: a) koncentracja jonów erbu, b) tłumienność światłowodów, c) przekrywanie się modów, d) długość fali źródła pompującego, e) przekrój czynny na absorpcję, f) promieniowania pompującego, g) proces konwersji w górę, h) migracja wzbudzenia i tłumienie nieradiacyjne, i) absorpcja przez jony w stanach wzbudzonych, które zostały szczegółowo omówienie na przykład w pracy [5].

Podstawowym procesem fizycznym odpowiedzialnym za wzmocnienie jest emisja wymuszona. Układ poziomów energetycznych bezpośrednio zaangażowanych w proces wzmocnienia został przedstawiony na rysunku 7.2. Wzmacniacz typu EDFA działa albo w układzie 3-poziomowym

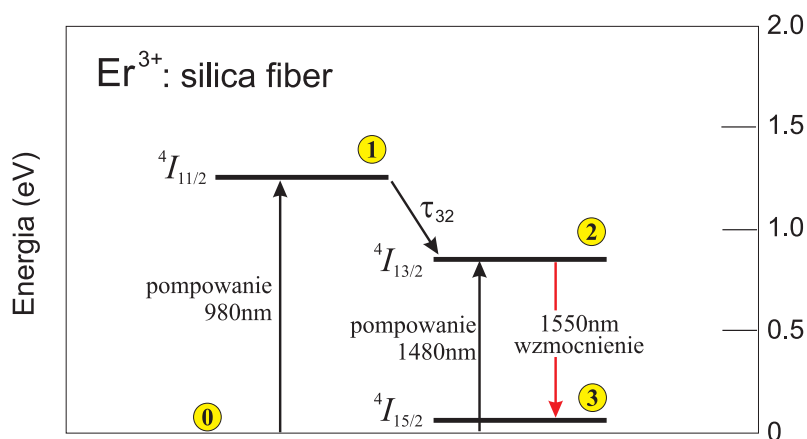


Figure 7.2: Uproszczona struktura poziomów energetycznych wzmacniacza typu EDFA.

albo 4-poziomowym, a pompowanie odbywa się na długościach fali odpowiednio 1480nm lub 980nm. W przypadku układu 3-poziomowego pompowanie następuje ze stanu podstawowego bezpośrednio do stanu górnego danego przejścia wzmacniającego ($2 \rightarrow 3$), co wymaga dość silnego pompowania aby otrzymać inwersję obsadzeń na tym przejściu. W przypadku zaś układu 4-poziomowego pompowany jest poziom ${}^4I_{11/2}$ (1), z którego populacja ulega szybkiemu nieradiacyjnemu zanikowi do górnego stanu (2) przejścia wzmacniającego.

7.3 Aparatura i materiały

szerokopasmowe źródło światła (np. lampa halogenowa lub dioda superluminescencyjna), spektrometr lub optyczna analizator widma, miernik mocy, laser pompujący @980nm, światłowód szklany domieszkowany erbem, kable światłowodowe, sprzęgacz światłowodowy.

UWAGA! Ponieważ nawet najmniejsze sprzężenie może prowadzić do akcji laserowej, co z kolei zmniejsza liczbę jonów erbu biorących udział w procesie wzmacniania, to niezwykle istotnym jest zaopatrzenie końcówek SDErb w izolatory optyczne albo używanie światłowodów ze ściętymi końcówkami.

7.4 Przebieg ćwiczenia

W trakcie ćwiczenia badana jest charakterystyka spektralna SDErb, jego widmo absorpcji i fluorescencji. Ponadto zestawiony zostanie wzmacniacz EDFA i zbadane zostaną jego własności.

7.4.1 Badanie absorpcji światła pompującego przez SDErb

- Za pomocą spektrometru lub analizatora widna zarejestrować widmo W_1 używanego źródła światła (lampa halogenowa lub dioda superluminescencyjna)
- Używając sprzęgacza światłowodowego wprowadzić wiązkę używanego źródła światła do SDErb. Zarejestrować widmo W_2 na wyjściu światłowodu.
- Wyznaczyć krzywą absorpcyjną SDErb W_2/W_1 .
- Zidentyfikować maksima absorpcyjne w badanym obszarze widna i przyporządkować je odpowiednim przejściom w układzie poziomów energetycznych jonu Er^{3+} .

7.4.2 Badanie fluorescencji SDErb

- Używając kabla światłowodowego wprowadzić światło lasera diodowego @980nm do SDErb.
- Za pomocą spektrometru lub analizatora widna zarejestrować widmo na wyjściu SDErb w jak najszerszym zakresie spektralnym.
- Na podstawie zarejestrowanego widma fluorescencyjnego zidentyfikować występujące w nim struktury i przypisać maksima konkretnym przejściom w ramach struktury poziomów jonu Er^{3+} .

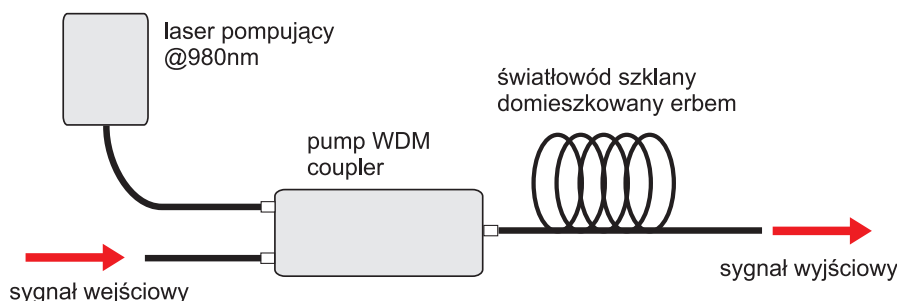


Figure 7.3: Układ klasycznego wzmacniacza EDFA.

7.4.3 Badanie wzmacniacza optycznego typu EDFA

- Zbudować wzmacniacz EDFA jak na rysunku.
- Ustawić moc lasera diodowego @980nm na 50mW i zarejestrować ASE za pomocą analizatora widna.
- Zwiększyć moc lasera diodowego do wartości maksymalnej i ponownie zarejestrować widmo ASE.
- Porównać oba zarejestrowane widma. Czy widoczne są ostre maksima w okolicy 1530nm?
- Uruchomić laser diodowy @1550nm i ustawić jego moc na około 0.01mW.

- Podłączyć laser @1550nm do wejścia sygnałowego wzmacniacza EDFA. Przy wyłączonym wzmacniaczu EDFA (brak pompowania laserem @980nm) zmierzyć moc na wyjściu wzmacniacza.
- Zmierzyć moc na wyjściu wzmacniacza przy włączonym wzmacniaczu EDFA.
- Powtórzyć wszystkie poprzednie pomiary z podłączonym izolatorem optycznym na wyjściu. Porównać zmierzone w obu przypadkach ASE.
- Na podstawie zmierzonych mocy wejściowej lasera @1550nm i mocy na wyjściu wzmacniacza wyliczyć wzmocnienie optyczne (w dB).

Ćwiczenie 8

LASER WŁÓKNOWY

Cel ćwiczenia: 1) zapoznanie się z zasadą działania lasera włóknowego, 2) budowa układu prostego lasera włóknowego, 3) badanie własności lasera włóknowego

Słowa kluczowe: laser włóknowy, wnęka rezonansowa, mody laserowe, sprzężenie optyczne, odbicie Fresnela, laser pompujący, spójność

8.1 Pytania i problemy do przestudiowania

- Istnieją dwa praktyczne sposoby wykonania lasera włóknowego. Pierwszy polega na domieszkowaniu światłowodu szklanego pierwiastkami ziem rzadkich a następnie wbudzeniu tych pierwiastków źródłem światła. na czym polega drugi sposób?
- Czy poniżej progu na akcję laserową z lasera włóknowego emitowane jest jakiegokolwiek światło?
- Jak odróżnić światło laserowe od światła ze zwykłego, klasycznego źródła np. lampy żarowej?
- Jaka jest różnica pomiędzy emisją spontaniczną, wzmocnioną emisją spontaniczną i emisją wymuszoną?
- Co to jest odbicie Fresnela i jak duże odbicie można otrzymać od wypolerowanej powierzchni szklanej?

8.2 Podstawy teoretyczne

Odnośnik do literatury.

8.3 Aparatura i materiały

SDerb, sprzęgacz WDM (WDM pump coupler), laser @980nm, miernik mocy, siatka Bragga, kable światłowodowe, analizator widma.

8.4 Przebieg ćwiczenia

8.4.1 Budowa prostego lasera włóknowego

- Połączyć elementy lasera włóknowego jak pokazano na rysunku 8.1.

- Włączyć laser pompujący @980nm, zwiększać prąd sterowania od 0 do 80mA w krokach co 5mA.
- Zmierzyć moc na wolnym końcu SDErb.
- Wykreślić zależność mocy wyjściowej od natężenia prądu sterującego.
- Przeanalizować kształt krzywej "moc optyczna - prąd sterowania"(Moc-Prąd).
- Następnie, podłączyć siatkę Bragga do portu sygnałowego (port-4) sprzęgacza WDM i powtórzyć pomiary wykonane w poprzednich punktach.
- Jaka jest różnica pomiędzy krzywymi Moc-Prąd dla przypadków z i bez siatki Bragga?

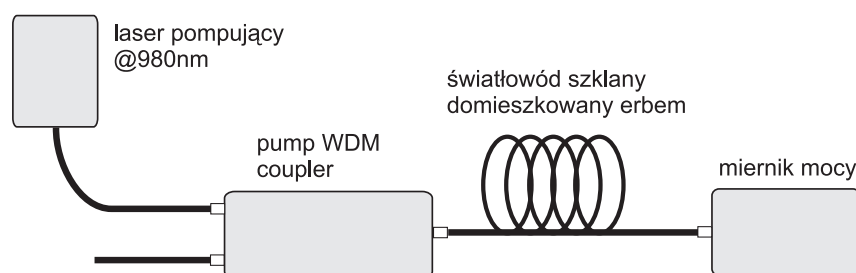


Figure 8.1: Układ lasera włóknowego.

8.4.2 Badanie widma lasera

- Zbudować laser włóknowy jak w poprzednim punkcie ale bez siatki Bragga.
- Zmierzyć widmo lasera za pomocą analizatora widma. Czy obserwuje się akcję laserową? Czy widoczne są jakieś ostre piki w okolicach 1532nm?
- Dołączyć do układu siatkę Bragga.
- Zmierzyć widmo lasera ponownie. Ile ostrych pików można teraz zaobserwować?

Bibliography

- [1] B. Ziętek, *Optoelektronika*, Wydawnictwo UMK, Toruń 2005.
- [2] P.G. Kik and A. Polman, *Erbium doped optical waveguide amplifiers on silicon*, MRS Bulletin **23**(4), 48 1998.
- [3] G. Meltz, W.W. Morey, W.H. Glen, *Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method*, Opt. Lett **14**, 823 (1989).
- [4] B.J. Ainslie, S.P. Craig, and S.T. Davey, *The Absorption and Fluorescence Spectra of Rare-Earth Ions in Silica-Based Monomode Fiber*, IEEE Journal of Lightwave Technology **6**(2), 287 (1988).
- [5] B.J. Ainslie, *A Review of the Fabrication and Properties of Erbium-Doped Fibers for Optical Amplifiers*, IEEE Journal of Lightwave Technology **9**(2), 220 (1991).