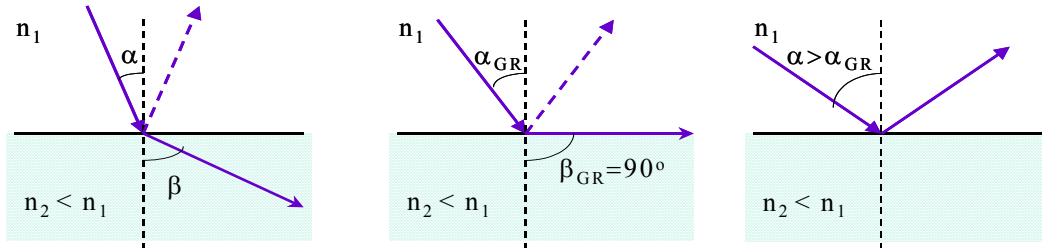


8. Światłowodowy

Całkowite wewnętrzne odbicie

Przechodzenie światła do drugiego ośrodka i obserwowany przy tym efekt załamania może się odbywać tylko w pewnym zakresie kątów padania. Granicznym kątem padania jest kąt α_{GR} , dla którego fala załamana porusza się wzdłuż granicy rozdzielającej oba ośrodki (kąt załamania $\beta_{GR} = 90^\circ$), co po wstawieniu do wzoru na prawo załamania prowadzi do wyniku: $\sin \alpha_{GR} = n_2/n_1$. Dla kątów padania $\alpha > \alpha_{GR}$ wartość $n_1/n_2 \sin \alpha$ jest większa od jedności, prawo załamania przestaje obowiązywać i światło ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu.

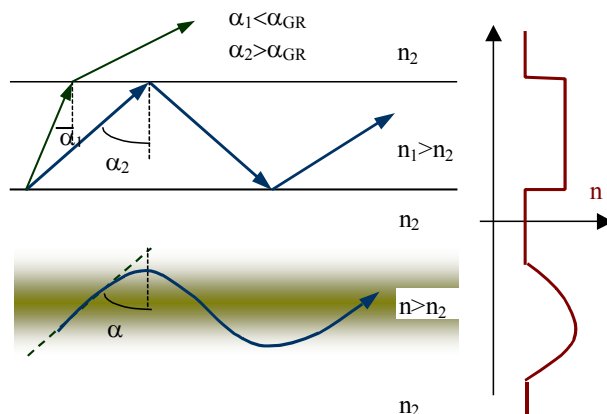


Zjawisko całkowitego odbicia występuje, gdy $n_1/n_2 > 1$, czyli gdy fala pada z ośrodka o większym współczynniku załamania na ośrodek o mniejszym współczynniku załamania np. od strony szkła o współczynniku załamania $n_1 > 1$ na granicę z powietrzem, którego współczynnik załamania $n_2 \approx 1$.

Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia wykorzystuje się w układach optycznych m.in. w elementach pełniących rolę zwierciadeł. Wykonuje się wtedy pryzmaty o powierzchniach polerowanych pod odpowiednim kątem, aby światło wchodząc do pryzmatu ulegało całkowitemu wewnętrznemu odbiciu na tych powierzchniach. W szczególności dla pryzmatu powstałego ze ściętego narożnika sześcianu światło po kilkukrotnym całkowitym odbiciu wewnętrznym wraca dokładnie w kierunku, z którego padało (dla zwierciadeł płaskich ma to miejsce tylko, gdy światło pada prostopadłe na zwierciadło). Zestawy takich pryzmatów zostały m.in. umieszczone na Księżycu jako zwierciadła odbijające impulsy laserowe wysyłane z Ziemi (dzięki temu wykonano pomiary odległości Księżyca od Ziemi z dokładnością do kilkunastu centymetrów). Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia wykorzystywane jest także w światłowodach do transmisji światła z wyjątkowo małymi stratami na duże odległości.

Struktura światłowodów

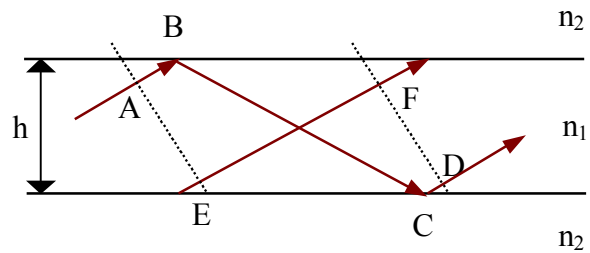
Umieszczony w środku rdzeń światłowodu ma większy współczynnik załamania niż otoczenie. Promień świetlny w światłowodzie padający pod kątem większym od kąta granicznego ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i zostaje uwięziony w obszarze rdzenia. Do uzyskania takiego efektu nie jest jednak niezbędna skokowa granica, na której występuje odbicie. Jeżeli współczynnik załamania będzie się zmieniał w sposób ciągły, to promienie będą zakrzywiane w stronę obszaru o większym współczynniku załamania. W identyczny sposób tłumaczyć można działanie soczewek skupiających: w



środku soczewka jest grubsza, co jest równoznaczne z większym przyrostem fazy fali, czyli średnia wartość współczynnika załamania jest większa niż na brzegu soczewki.

Mody światłowodowe

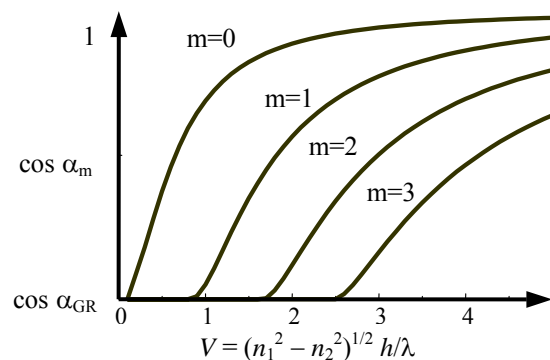
Prowadzenie fali świetlnej wewnątrz światłowodu wymaga, aby kąt padania był większy od kąta granicznego. Nie jest to jednak warunek wystarczający. Jeśli fala kolejno odbita na dwu granicach (tor promienia ABCD na rysunku) nie będzie miała tej samej fazy, co fala, która przebyła inną drogę (tor promienia EF) to obie fale będą się wygaszać i energia fali będzie wypływać na zewnątrz światłowodu. Dla propagacji światła wewnątrz światłowodu konieczna jest pozytywna interferencja fal płaskich odbijanych na granicach, czyli różnica faz pomiędzy nimi musi być całkowitą wielokrotnością 2π . Dla przypadku jak na rysunku warunek ten wynosi:



$$\left(\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} - \overline{EF} \right) \frac{2\pi}{\lambda} n_1 + \Delta\phi_B + \Delta\phi_C = 2\pi m, m = 0, 1, 2, \dots$$

gdzie oprócz różnicy dróg optycznych (będących iloczynem odległości i liczby falowej) uwzględniona jest zmiana fazy $\Delta\phi$ powstająca przy odbiciu w punktach B i C. Analogiczny warunek można wprowadzić dla promieni zakrzywianych w falowodzie o nieskokowej zmianie współczynnika załamania światła. Uwzględnienie warunku interferencji powoduje, że dla każdej wartości liczby całkowitej m uzyskuje się co najwyżej jeden kąt α_m i w rezultacie liczba kątów α_m dla których propaguje się światło w światłowodzie jest skończona. Postać pola związana z jednym kątem α_m nazywana jest modem światłowodowym.

Liczba modów i odpowiadająca im wartość kąta α_m zależy od wielkości zwanej unormowaną częstotliwością $V = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} h / \lambda$, gdzie h jest grubością światłowodu. Wraz ze wzrostem wartości V rośnie liczba modów prowadzonych w światłowodzie (rysunek obok). W światłowodzie jednomodowym grubość h musi być mała w porównaniu z długością fali λ i mała musi być różnica współczynników załamania pomiędzy rdzeniem a otoczeniem $n_1^2 - n_2^2$. Dla światła widzialnego średnice rdzenia muszą być wówczas rzędu pojedynczych mikrometrów.



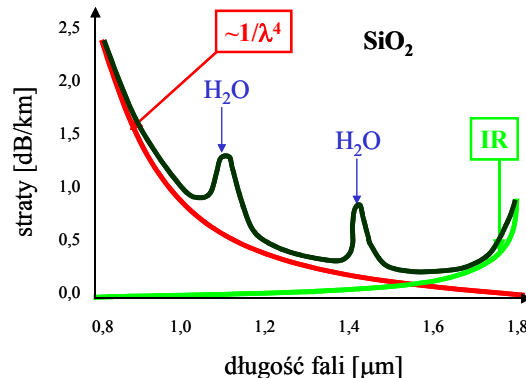
Wytwarzanie światłowodów jednomodowych wymaga bardziej zaawansowanych technologii. Światłowody takie mają jednak zalety w porównaniu ze światłowodami wielomodowymi. W światłowodzie wielomodowym każdemu z modów odpowiada inna prędkość fazowa i inna prędkość grupowa. Zatem światło wprowadzone do światłowodu wielomodowego jest przesyłane z różnymi prędkościami. W szczególności, gdy przesyłany jest impuls świetlny, to dociera on na końcu światłowodu wielomodowego wydłużony i zniekształcony. Również rozkład poprzeczny pola odbiega od rozkładu wejściowego, gdyż jest wynikiem interferencji wielu modów poprzemieszczanych w fazie a ze względu na niejednorodność światłowodu różnice faz są przypadkowe. W światłowodach jednomodowych wydłużenie impulsów jest nieznaczne i wynika z dyspersji ośrodka. Odbywa się to jednak kosztem całkowitej energii

przenoszonej przez światłowód gdyż światło wewnątrz światłowodu jednomodowego jest zlokalizowane w obszarze o szerokości rzędu najwyżej kilku mikrometrów (w światłowodach wielomodowych nawet setek mikrometrów), co utrudnia wprowadzenie do światłowodu światła o dużej mocy.

Światłowody telekomunikacyjne

W zależności od przeznaczenia wytwarza się różne typy światłowodów. Najbardziej znanym są światłowody włókniste wykorzystywane w telekomunikacji światłowodowej. Mają one strukturę cylindryczną, w której współczynnik załamania zmienia się wzdłuż promienia. Część wewnętrzna nazywa się rdzeniem a część zewnętrzna płaszczem. Są to włókna szklane (szkło kwarcowe SiO_2) o średnicy 125 mikrometrów i z kilkumikrometrowym rdzeniem o wyższym współczynniku załamania, uzyskanym przez domieszkowanie szkła.

Prowadzenie światła w cylindrycznych dielektrykach analizowane było teoretycznie już na początku XX wieku, lecz drogę do zastosowań otworzyło wytworzenie w firmie Corning Glass Works (USA) w 1970 roku światłowodów ze szkła kwarcowego o niskim tłumieniu. Straty w wyprodukowanych wówczas światłowodach wynosiły ok. 20 dB/km, co oznacza, że po przejściu przez 1 km światłowodu światło ma 1% mocy wejściowej. Produkowane obecnie światłowody jednomodowe stosowane w telekomunikacji mają straty poniżej 0,2 dB/km dla światła o długości fali $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ (tzn. dla światła niewidocznego dla oka ludzkiego). Umożliwia to przesyłanie sygnałów świetlnych na odległości setek kilometrów bez konieczności wzmacniania (obecnie w telekomunikacji światłowodowej stosuje się odcinki rzędu 100 km). Dla światła o większych i mniejszych długościach fali rośnie tłumienność szkła. Dla fal dłuższych związane jest to z absorpcją szkła w podczerwieni (IR), a dla krótszych z rozpraszaniem $\propto 1/\lambda^4$. Dodatkowym źródłem strat jest absorpcja światła przez cząsteczki wody (H_2O), których wyeliminowanie jest bardzo trudne. Początkowo w telekomunikacji wykorzystywano światło o długości fali $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ ze względu na trudności z wytworzeniem źródeł światła (laserów półprzewodnikowych) dla światła $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.



W jednym włóknie światłowodowym można przysyłać niezależnie impulsy o różnych długościach fali, które dają się łatwo rozseparować na wyjściu (np. przy pomocy siatki dyfrakcyjnej). Dlatego pojemność linii transmisyjnej zwiększa się przez zwiększenie częstotliwości modulacji oraz przez zastosowanie światła o różnych długościach fali. Przyjmuje się, że w niedługiej przyszłości będzie wykorzystywane w pełni całe pasmo niskiej tłumienności w zakresie długości fal od ok. 1,28 μm do 1,63 μm , co pozwoli przysyłać informację z częstotliwością do 100 THz (10^{14} Hz).

Ograniczeniem przy zwiększaniu częstotliwości modulacji sygnału i liczby różnych długości fal są elektroniczne układy wzmacniające, które w klasycznych systemach składają się z detektora natężenia światła połączonego z elektronicznym wzmacniaczem zasilającym laser półprzewodnikowy, z którego zmodulowane światło wprowadzane jest do następnego odcinka światłowodu. Okazuje się jednak, że w światłowodach jest możliwe również wzmacnianie światła. Jony pierwiastków ziem rzadkich, na przykład erb i neodym, dodawane do szkła są odpowiednio stosowane do zbudowania optycznych wzmacniaczy i laserów

pompowanych optycznie. Pierwszy laser światłowodowy zbudowano w 1961 roku, wykorzystując rdzeń szklany domieszkowany neodymem o średnicy ok. 300 μm . W 1986 roku zbudowano laser w światłowodzie włóknistym domieszkowanym erbem, który może służyć jako źródło światła lub element wzmacniający sygnał przesyłany w światłowodach telekomunikacyjnych. Zastąpienie elektronicznych układów wzmacniających przez taki wzmacniacz optyczny pozwala na powiększenie pojemności linii transmisyjnej.

Inne rodzaje światłowodów

Wytwarzana są również włókniste światłowody wielomodowe o dużych średnicach rdzenia zarówno ze szkła jak i np. z polimerów. Wykorzystywane są one między innymi do oświetlania bądź przesyłania obrazów w wiązkach światłowodowych. Duże średnice rdzenia pozwalają na przesyłanie światła o dużej mocy.

Oprócz światłowodów włóknistych wytwarzane są światłowody o prostokątnym przekroju poprzecznym - światłowody paskowe lub światłowody płaskie. Są one zazwyczaj paskami lub warstwami na powierzchni płytek dielektrycznych (szklanych, kryształów elektrooptycznych, półprzewodników i in.). Ich tłumienność jest znacznie większa niż światłowodów włóknistych, ale i długości mniejsze (rzędu centymetrów), ograniczone rozmiarami podłoża. Światłowodami paskowymi są m.in. obszary aktywne laserów półprzewodnikowych. Wytwarzane są struktury światłowodów paskowych będących rezonatorami, przełącznikami optycznymi, modulatorami, głowicami pomiarowymi czujników różnych wielkości i in. Ze względu na miniaturyzację tych układów nazywa się je układami optyki scalonej. Szczególnie atrakcyjna wydaje się możliwość budowy scalonych układów na podłożu krzemowym, gdzie na jednej płytce połączone mogą być układy optyczne, mikromechaniczne i elektroniczne.