

TLUMIENIE ŚWIATŁA W OŚRODKACH OPTYCZNYCH

Jednym z parametrów opisujących właściwości optyczne światłowodów jest **tłumienność**. W wyniku zjawiska tłumienia, energia fali elektromagnetycznej niesionej w światłowodzie maleje eksponencjalnie w funkcji jego długości. Oznacza to, że jeżeli na wejście światłowodu o długości L zostanie wprowadzony sygnał optyczny o mocy P_0 , to moc na jego wyjściu dana będzie zależnością [2]:

$$P(L) = P_0 \exp(-\alpha' L), \quad 2.1$$

gdzie: α' – współczynnik tłumienia [1/km].

Straty w jednorodnym światłowodzie podaje się na jednostkę długości, za pomocą wielkości zwanej **tłumiennością jednostkową**, definiowaną jako [2]:

$$\alpha[\text{dB/km}] = -\frac{10}{L} \log \frac{P(L)}{P_0} = 4,343\alpha'[\text{1/km}], \quad 2.2$$

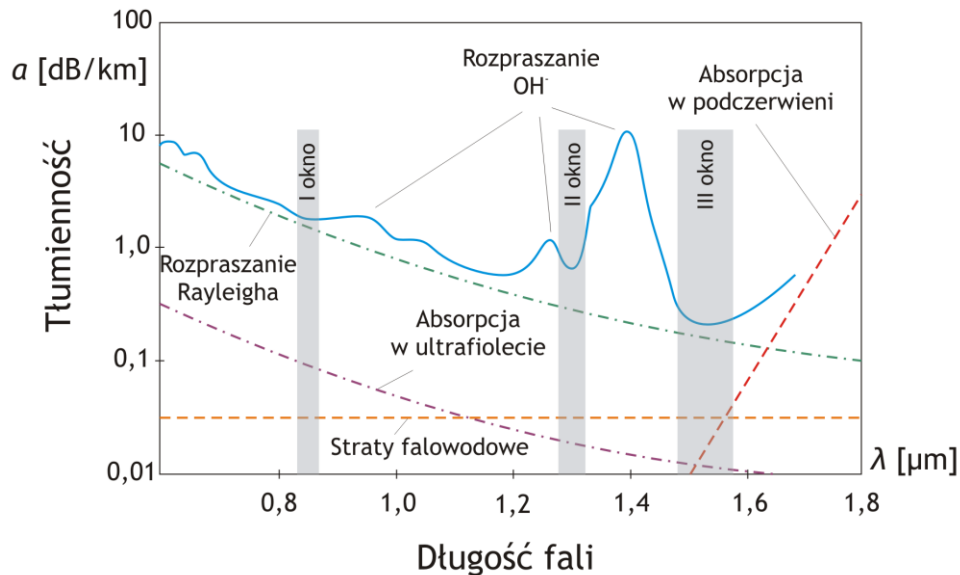
Tłumienność α wyrażaną w [dB/km] podaje się zazwyczaj dla jedno- lub wielomodowych światłowodów włóknistych, natomiast dla światłowodów planarnych w [dB/cm]. W przypadku światłowodów o niewielkiej długości (rzędu metra) i o większej średnicy (rzędu milimetra) straty optyczne podaje się w procentach. Tłumienność równa np. 10 dB/km oznacza, że na wyjściu odcinka światłowodu od długości 1 km odbierzemy 10 % wartości mocy sygnału wejściowego.

Obecnie produkowane światłowody jednomodowe charakteryzują się tłumiennością <0,4 dB/km przy długości fali 1,3 μm i <0,2 dB/km przy długości fali 1,55 μm . Z kolei światłowody wielomodowe mają przy długości fali 0,85 μm tłumienność <3,2 dB/km, a przy długości fali 1,3 μm <1 dB/km.

Tłumienność jednostkowa jest współczynnikiem niezależnym od długości światłowodu. Tłumienie na odcinku światłowodu o znanej długości L można natomiast wyrazić w postaci:

$$A[\text{dB}] = -10 \log \frac{P(L)}{P_0} = \alpha \cdot L, \quad 2.3$$

Należy pamiętać, że tak definiowane straty są ujemne, gdy moc maleje, natomiast są dodatnie, gdy w torze światłowodowym zachodzi wzmocnienie sygnału optycznego, np. za pomocą wzmacniacza optycznego.



Rys. 2.1. Zależność tłumienności jednostkowej od długości fali w jednomodowym światłowodzie kwarcowym [1,2].

Straty w światłowodzie zależą od długości fali transmitowanego światła λ . Na rysunku 2.1 przedstawiono przykładową zależność tłumienności jednostkowej w funkcji długości fali, dla (jednomodowego) światłowodu kwarcowego. Na wykresie można zauważyć trzy charakterystyczne minima dla fal świetlnych o długościach 0,85 μm , 1,3 μm i 1,55 μm , które noszą nazwę pierwszego, drugiego i trzeciego okna transmisyjnego (okna telekomunikacyjne). Obecnie w telekomunikacji światłowodowej wykorzystuje się drugie i trzecie okno transmisyjne, pierwsze okno było jedynie używane w początkowym okresie jej rozwoju.

Całkowite tłumienie występujące w światłowodach pochodzi z dwóch źródeł, jednym z nich jest materiał światłowodu, a drugim jego struktura (konstrukcja). Do strat materiałowych zalicza się przede wszystkim *absorpcję* i *rozpraszanie*, natomiast do strukturalnych należą m.in. *wyciekanie* i *sprzęganie modów*, *makrozgięcia* światłowodu (duży promień krzywizny), *mikrozgięcia* (mały promień krzywizny), czy *promieniowanie*.

Absorpcja jest procesem polegającym na pochłanianiu energii fali świetlnej przez ośrodek materialny, z którego wykonany jest światłowód i jej zamiany w energię cieplną. Dla czystego szkła kwarcowego SiO_2 w zakresie długości fal $0,8\div 1,6\ \mu\text{m}$ absorpcja jest niewielka. Zwiększają ją wszystkie zanieczyszczenia oraz defekty w jednolitej strukturze szkła, powstające w procesie fabrykacji lub po wprowadzeniu do czystego szkła różnego rodzaju domieszek: F, GeO_2 , BO, PO, AlO – w celu zmiany wartości współczynnika załamania światła. Mogą to być także większe wtrącenia obcych domieszek, związanych z zanieczyszczeniami atmosfery przy produkcji światłowodów lub luki powstałe w wyniku działania promieniowania o wysokiej energii. Największy wpływ na straty optyczne ma jednak obecność jonów OH^- , będących śladami pary wodnej w szkłe. Nawet niewielkie ilości tych jonów (rzędu 0,001 ppm) powodują silną absorpcję przy długościach fal $0,95\ \mu\text{m}$, $1,23\ \mu\text{m}$, $1,37\ \mu\text{m}$ (Rys. 1). W zakresie długości fal $0,6\div 1,6\ \mu\text{m}$ obserwuje się również zwiększoną absorpcję, spowodowaną obecnością różnych zanieczyszczeń metalicznych, jonami metali przejściowych takimi jak: Fe, Co, Cu, Mn, Cr, Ni i Ti. Aby osiągnąć małą tłumienność, poziom zanieczyszczeń wywołanych różnymi zanieczyszczeniami musi być bardzo ograniczony. Współcześnie możliwe jest wytwarzanie światłowodów o tłumienności mniejszej niż 1 dB/km, dzięki opracowaniu nowoczesnych technologii, dzięki którym uzyskuje się materiały o czystości poniżej 0,001 ppm (ang. *parts per million*) [2].

Kolejną przyczyną tłumienia energii fali w światłowodzie jest **rozpraszanie**, które polega na ucieczce energii transmitowanego światła z modów transmisyjnych i opóźnieniem fazy fali świetlnej. Towarzyszy temu zmiana kierunku rozchodzenia się światła, co objawia się świeceniem materiału. Istnieje kilka mechanizmów rozpraszania, należy do nich zaliczyć przede wszystkim **rozpraszanie Rayleigha** i **rozpraszanie Mie**.

Rozpraszanie Rayleigha jest efektem silnie zależnym od długości fali i wyznacza fundamentalną granicę praktycznie uzyskiwanej tłumienności. Spowodowane jest niejednorodnościami materiału (lokalne zmiany gęstości i składu materiału oraz rozkładu domieszek), co jest przyczyną fluktuacji zmian współczynnika załamania. Rozpraszanie tego typu zachodzi na cząsteczkach o rozmiarach mniejszych od długości

fali światła propagowanego w światłowodzie. Rozpraszanie Rayleigha szybko maleje ze wzrostem długości fali, a tłumienność wynikającą z tego rozpraszania można oszacować z zależności [2]:

$$\alpha_R = \frac{k}{\lambda^4}, \quad 2.4$$

przy czym k to stała materiałowa, która zawiera się w zakresie 0,7÷0,8 dB/km w zależności od składu materiału rdzenia światłowodu, czemu odpowiada tłumienność rzędu 0,12÷0,16 dB/km dla długości fali 1,55 μm . Rozpraszanie Rayleigha maleje do poziomu poniżej 0,01 dB/km dla długości fali ok. 3 μm . Wyklucza to niestety użycie szkła kwarcowego w tym zakresie długości fal, ze względu na silną absorpcję w podczerwieni (rys. 2.1). Poszukuje się zatem materiałów przezroczystych o małej absorpcji dla fal o długości powyżej 2 μm . Przykładem takiego materiału jest szkło fluorkowe ZrBaLaAlNa (w skrócie ZBLAN). Światłowody ze szkła ZBLAN mogą prowadzić światło podczerwone o długości 4 μm i teoretycznie mogą mieć tłumienie dochodzące do 0,001 dB/km [2].

Rozpraszanie Mie zachodzi na niejednorodnościach, których wymiary są większe od długości fali. Rozpraszanie to jest spowodowane niedoskonałą strukturą światłowodu, zbudowanego z nieregularnych krystalitów, a także zawierającego ziarna obcego pochodzenia lub pęcherzyki gazów pochłoniętych w procesie produkcji światłowodu [4]. Taka budowa światłowodu objawia się m.in. nieregularnością granicy rdzeń-płaszcz, zmianą współczynnika załamania wzdłuż osi światłowodu, czy fluktuacjami jego średnicy. Udoskonalenie procesu technologicznego umożliwiło znaczne ograniczenie strat mocy optycznej wynikających z tego typu rozpraszania do wartości nieprzekraczających 0,03 dB/km [2].

Ponadto, dla dużych mocy świetlnych może dochodzić do nieliniowego oddziaływania pomiędzy falą elektromagnetyczną a ośrodkiem, co także prowadzi do wzrostu tłumienia. Do procesów nieliniowych zaliczamy m.in. *wymuszone rozpraszanie Brillouina* i *wymuszone rozpraszanie Ramana*. **Wymuszone rozpraszanie Brillouina** pojawia się w światłowodach prowadzących światło o niskim poziomie mocy optycznej, rzędu kilkudziesięciu miliwatów. Polega na oddziaływaniu fal świetlnych i dźwiękowych, prowadzące do zmiany częstotliwości i kierunku rozchodzenia się fali

światłnej. Proces ten zmniejsza moc fali pierwotnej, a ponadto generuje silną falę wsteczną. Światło rozproszone jest przesunięte w stronę niższych częstotliwości. **Wymuszone rozpraszanie Ramana** jest podobne do rozpraszania Brillouina, lecz pojawia się w przypadku dużo wyższych mocy optycznych (ok. 1 W). Polega na wzroście mocy fal o niższej częstotliwości (większej długości) kosztem mocy fal o częstotliwości wyższej, zwanych falami pompującymi. Rozproszenie to zachodzi zarówno w kierunku zgodnym jak i przeciwnym do kierunku rozchodzenia się fali.

Światłowody są zazwyczaj wykonane z dwóch rodzajów szkła, odpowiednio dla rdzenia i płaszczka, więc oprócz strat związanych z materiałem rdzenia i płaszczka, dodatkowo wystąpią straty wynikające z samej struktury światłowodu. Taka struktura narzuca modową propagację fali światłnej zarówno w rdzeniu, jak i w płaszczku. Oprócz tzw. modów prowadzonych występują także mody radiacyjne (fale wyciekające).

Mody wyciekające opisują energię wypromieniowaną przez światłowód. Odpowiadają one tzw. promieniom skośnym, rozchodzącym się po torach spiralnych, nie przecinających osi rdzenia. Promienie skośne w większości spełniają warunek całkowitego wewnętrznego odbicia na granicy rdzenia i w związku z tym mody odpowiadające tym promieniom mogą propagować stosunkowo daleko wzdłuż osi światłowodu, stopniowo tracąc energię przez wypromieniowanie do płaszczka. Apertura numeryczna NA tych modów jest większa niż modów (promieni) prowadzonych. Powstające w ten sposób straty są niewielkie w stosowanych typach światłowodów, ale mogą być zwiększone przez wypromieniowanie energii na końcach światłowodów lub na złączach rozłącznych [4].

Oprócz strat radiacyjnych występują także straty wewnątrz światłowodu, wywołane np. nierównomiernością rozkładu współczynnika załamania w rdzeniu i w płaszczku, fluktuacjami średnicy rdzenia lub odstępstwem od liniowej geometrii światłowodu, w wyniku jego zginania.

Zginanie światłowodu powoduje powstawanie w nim strat energii promieniowania podczerwonego. Biorąc pod uwagę promień krzywizny zgięcia włókna, wyróżnia się **makrozgięcia** (zgięcia), których promień krzywizny jest dużo większy niż średnica włókna (> 10 mm) oraz **mikrozgięcia**, o małym promieniu krzywizny, powstające jako

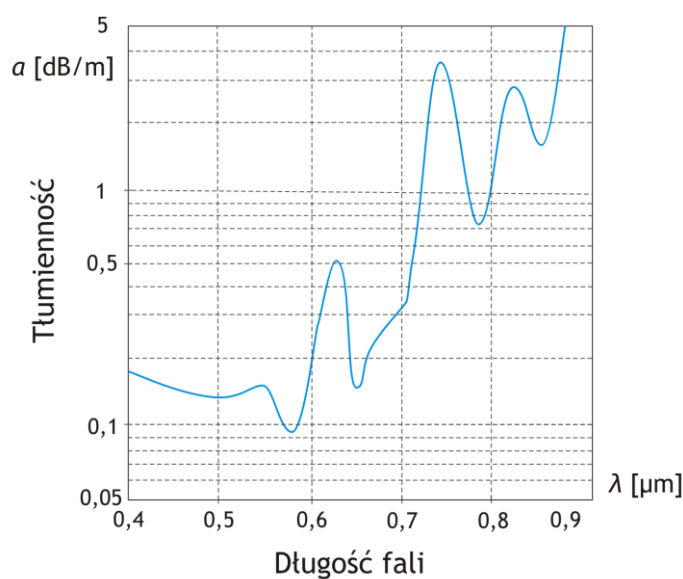
przypadkowe mikroskopijne zgięcia spowodowane niewielkimi lokalnymi poprzecznymi przesunięciami osi lub powierzchni światłowodu. Straty energii promieniowania, spowodowane makrozgięciem światłowodu dzieli się na czyste straty zginania i straty konwersji modów. Powodują one zmianę współczynnika załamania w obszarze zgięcia, co może prowadzić do tworzenia się modów wyciekających. Z kolei mikrozgięcia powodują rozmywanie się modu w światłowodach jednomodowych i niepożądane sprzężanie się modów w światłowodach wielomodowych oraz przechodzenie energii od modów podstawowych do modów wyższych rzędów, które zostają wypromieniowane [2]. Straty związane ze zgięciami są niewielkie, rzędu części dB/km w starannie wykonanych i ułożonych kablach światłowodowych, ale w niekorzystnych warunkach mogą także przekraczać 1 dB/km i więcej [4]. Zależność strat w światłowodzie powodowana jego zgięciami lub mikrozgięciami jest podstawą działania klasy amplitudowych czujników światłowodowych, tzw. czujników mikrozgięciowych. Z wykorzystaniem tego zjawiska budowane są także światłowodowe czujniki przemieszczenia, siły, ciśnienia i drgań akustycznych.

Oddziaływanie *promieniowania* ultrafioletowego i jądrowego na światłowód powoduje powstanie w nim nowych ośrodków absorpcji i związanych z nimi zwiększonych strat. W światłowodach domieszkowanych germanem, poddanych działaniu promieniowania ultrafioletowego dochodzi dodatkowo do zmiany współczynnika załamania rdzenia rzędu 10^{-4} ÷ 10^{-3} . Ten efekt fotoczułości światłowodu wykorzystuje się obecnie w procesie wytwarzania przyrządów światłowodowych (np. siatek Bragga).

Światłowody szklane o płaszczu plastikowym lub całkowicie plastikowe charakteryzują się większymi stratami niż światłowody całkowicie szklane, lecz także znacznie mniejszą ceną. Są zazwyczaj stosowane do przesyłania informacji na niewielkich odległościach, rzędu 200 m. Dzięki dużej średnicy rdzenia (do 1000 μm) i dużej aperturze numerycznej (do $NA = 0,5$) łatwiejsze jest łączenie poszczególnych odcinków takich światłowodów, natomiast ich wadą jest mniejsza odporność na czynniki zewnętrzne i ograniczony zakres pracy (-40°C ÷ 125°C) [4].

W światłowodach o rdzeniach szklanych stosuje się płaszcz plastikowy z żywicy silikonowej, o tłumienności ok. 900 dB/km przy długości fali 0,77 μm , której

maksimum sięga 7000 dB przy 0,91 μm . Jest to spowodowane absorpcją na wiązaniach C-H występujących w tej żywicy. Tego typu światłowody wykazują tłumienność ok. 3,2 dB/km przy długości 0,84 μm . Światłowody całkowicie plastikowe wykazują jeszcze większe straty, lecz są znacznie tańsze od światłowodów całkowicie i częściowo szklanych. Wytwarzane są w postaci światłowodów wielomodowych o skokowym współczynniku załamania i średnicy rdzenia rzędu kilkuset mikrometrów. Na rdzeń światłowodów plastikowych stosuje się polimery (np. polimetakrylan metylu-PMMA) o współczynniku załamania równym 1,49). Płaszcz jest również wykonywany z polimeru, ale o mniejszym współczynniku załamania równym np. 1,40, co daje dużą aperturę numeryczną (rzędu NA=0,5). Główną przyczyną strat tego typu światłowodów jest rozpraszanie Rayleigha (przy krótkich falach) i absorpcja molekularna (przy dłuższych falach) [4]. Minimum tłumienności występuje przy fali o długości 0,57 μm i wynosi ok. 100 dB/km (Rys. 2.2), jednak użyteczne okno usytuowane jest w okolicy 0,65 μm z tłumiennością ok. 150 dB/km (ze względu na dostępność tanich i wydajnych źródeł światła- diod LED świecących światłem czerwonym o długości ok. 0,66 μm) [3]. Ogranicza to zastosowanie tego typu światłowodów do pracy jedynie na krótkich odcinkach. Na rysunku 2.2 przedstawiono tłumienność światłowodów polimerowych.



Rys. 2.2. Zależność tłumienności jednostkowej od długości fali w światłowodzie polimerowym (PMMA) [3].