

Anna CYSEWSKA-SOBUSIAK*
Dariusz PROKOP*
Marcin JUKIEWICZ**

TENDENCJE ROZWOJOWE I OBSZARY ZASTOSOWAŃ TECHNIK ŚWIATŁOWODOWYCH

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia związane z nowoczesnymi technikami światłowodowymi. Przedstawiono wykorzystywane zjawiska fizyczne i optyczne oraz przedstawiono reprezentatywne przykłady współczesnych zastosowań różnych rodzajów światłowodów. Konwencjonalne układy światłowodowe są stosowane w nowoczesnej aparaturze pomiarowej, urządzeniach przemysłowych i medycznych oraz powszechnego użytku. Przedstawiono również specyficzne właściwości i obszary zastosowań światłowodów fotonicznych, które należą do najszybciej rozwijających się dziedzin przemysłu związanego ze współczesną fotoniką.

SŁOWA KLUCZOWE: światłowody, metrologia, optoelektronika, wideoendoskopia

1. WSTĘP

We współczesnych obszarach techniki stosuje się ultradźwięki oraz prawie całe widmo promieniowania elektromagnetycznego. Poszczególne zakresy tego widma wykorzystuje się w różnym stopniu, a ciągły postęp technologiczny umożliwia realizację coraz bardziej zaawansowanych metod detekcji, pomiaru i obrazowania właściwości obiektów.

Rozwój nauki i techniki stawia przed konstruktorami i projektantami konieczność rozwiązywania interdyscyplinarnych problemów leżących na pograniczu wielu dziedzin, do których należą także optoelektronika i fotonika [2, 7, 15, 18]. Fotonika jest intensywnie rozwijającą się technologią dwudziestego pierwszego wieku. Jest to dziedzina interdyscyplinarna obejmująca optoelektronikę półprzewodnikową, obrazową, zintegrowaną i informacyjną, technikę laserową i światłowodową, telekomunikację światłowodową, a także elementy fizyki fotonu, optyki klasycznej i nieliniowej.

W elektronice wykorzystuje się do przesyłania informacji strumień elektronów, a optoelektronika i fotonika zajmują się zagadnieniami związanymi z pro-

* Politechnika Poznańska.

** Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.

pagacją i przetwarzaniem strumienia fotonów w celu przesyłania informacji. Granicą dzielącą elektronikę od fotoniki jest częstotliwość 300 GHz generowanej fali elektromagnetycznej. Początek XX wieku spowodował niezwykle burzliwy rozwój nauki i techniki opartej o właściwości fotonów. W nowoczesnej technice coraz częściej stosuje się promieniowanie optyczne do przesyłania i przetwarzania informacji. Światłowody, lasery, diody elektroluminescencyjne i fotodetektory półprzewodnikowe zrewolucjonizowały współczesną elektronikę. Nie buduje się już sieci komputerowych i telekomunikacyjnych wykonanych bez udziału światłowodów. Warto zauważyć, że w prawie każdym współczesnym urządzeniu codziennego użytku także wykorzystuje się fotony na różne potrzeby. Systemy światłowodowe, aparatura optoelektroniczna i inżynieria fotoniczna pełnią istotną rolę we współczesnej telekomunikacji, metrologii, biomedycynie i wielu innych dziedzinach. Osiągnięcia w zakresie elektroniki, optoelektroniki, techniki sensorowej i informatyki stwarzają realną szansę rozstrzygnięcia kwestii dotąd nierozwiązanych.

Zakres wykorzystywania optycznej części promieniowania obejmuje zastosowania przemysłowych, biomedyczne i wciąż się poszerza. W zakresie optoelektroniki i fotoniki wchodzi interdyscyplinarna metrologia i inżynieria pomiarowa bazująca na akwizycji, przetwarzaniu i pomiarach sygnałów optycznych na potrzeby licznych dziedzin przemysłu, ochrony środowiska i medycyny. W obszarze optoelektroniki mieszczą się elementy optyczne i podzespoły optoelektroniczne, lasery półprzewodnikowe i inne urządzenia laserowe. W szerokim zakresie fotoniki mieści się m.in. optyka, fizyka ciała stałego, technologia półprzewodników, technika podczerwieni. Fotony są nośnikami danych w układach przesyłania i przetwarzania informacji.

2. KONWENCJONALNE ŚWIATŁOWODY WŁÓKNISTE

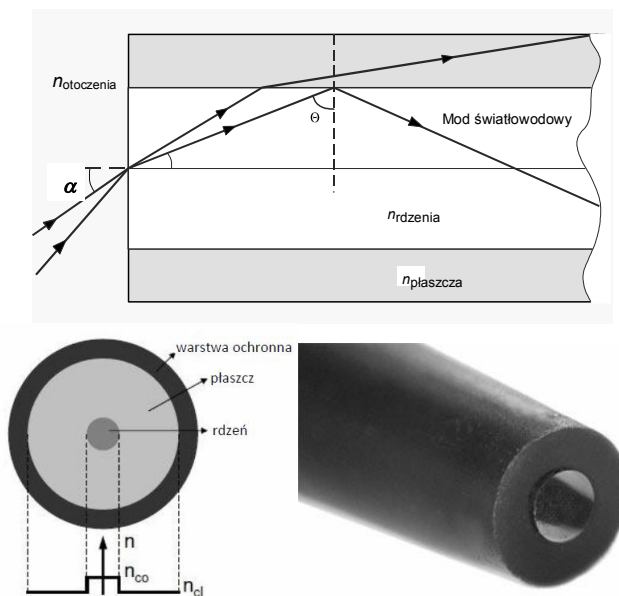
2.1. Zasada działania, rodzaje i właściwości światłowodów

W roku 1854 John Tyndall przeprowadził w Royal Institution w Wielkiej Brytanii doświadczenie wykazujące, że światło przepuszczone przez strumień wody „pozostaje” wewnątrz tego strumienia. W 1880 roku amerykański inżynier William Wheeler skonstruował i opatentował konstrukcję, którą nazwał rurociągiem świetlnym (light piping). Była to prawdopodobnie pierwsza "poważna" próba prowadzenia światła w ośrodku szklanym. W tym czasie najczystsze szkło miało bardzo dużą tłumienność (sięgającą 1000 dB/km), co uniemożliwiało praktyczne wprowadzenie efektów doświadczeń Tyndalla i Wheelera do transmisji sygnałów. Okazało się to możliwe dopiero po upływie ponad stulecia – koncepcja wykorzystania światłowodu do transmisji promieniowania optyczne-

go na potrzeby telekomunikacji światłowodowej pojawiła się w latach sześćdziesiątych dwudziestego wieku [2, 3, 15].

Współczesny konwencjonalny światłowod jest dielektrycznym medium transmisyjnym bazującym na technologii włóknistej, którego zadaniem jest przesyłanie sygnałów optycznych, również po torach krzywoliniowych, bez wprowadzania strat, zniekształceń i innych odkształceń. Może pełnić jednocześnie rolę optycznego przewodnika i elektrycznego izolatora. Materiał, z którego wykonany jest światłowod, nie przewodzi prądu elektrycznego, natomiast potrafi przewodzić promieniowanie optyczne (strumień fotonów). W zasadzie światłowod może być wykonany z każdego materiału, który jest optycznie przezroczysty w określonym zakresie długości fali. Ze względu na materiał rozróżnia się głównie światłowody szklane i plastikowe.

Światłowod składa się z rdzenia i warstwy otaczającej. Jeśli jego struktura ma symetrię kołową, warstwę otaczającą nazywa się płaszczem. Światło powinno być utrzymywane wewnątrz włókna – współczynnik załamania w płaszczu ($n_{cl} = n_{płaszcz}$) musi być mniejszy niż w rdzeniu ($n_{co} = n_{rdzenia}$). Zasadę działania i widok konwencjonalnego światłowodu włóknistego zilustrowano na rysunku 1.



Rys. 1. Ilustracja zasady działania i widok konwencjonalnego światłowodu włóknistego;

$$n_{co} = n_{rdzenia} = n_1 > n_{cl} = n_{płaszcz} = n_2$$

Rozróżnia się światłowody jednomodowe i wielomodowe, w zależności od liczby przesyłanych modów, czyli rodzajów fal wprowadzanych do rdzenia

światłowodu pod różnymi kątami. Mody są rozwiązaniami równania falowego (wynikającego z równań Maxwella), a tych rozwiązań jest skończona liczba. Propagacja światła we włóknie światłowodowym bazuje na zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia. Zdolność światłowodu do pobierania użytecznej energii świetlnej określa tzw. apertura numeryczna NA (*Numerical Aperture*), którą wyraża równanie:

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

gdzie α oznacza kąt akceptacji światłowodu. Jeśli wartość tego kąta przekroczy wartość graniczną, występuje zjawisko wyciekania promieniowania do płaszczu. Płaszcz powinien „chronić” światło przed wyciekaniem na zewnątrz światłowodu, dzięki czemu przechodzi ono z jednego końca światłowodu do drugiego praktycznie bez strat, ale w światłowodach świecących bokiem (*sidelight*) płaszcz częściowo przepuszcza światło i uzyskuje się zamierzony efekt świecenia bokiem. Na otrzymane światło można wówczas patrzeć gołym okiem. Ze względu na rozkład współczynnika załamania w rdzeniu rozróżnia się światłowody skokowe i gradientowe. W światłowodach skokowych wartość współczynnika załamania zmienia się skokowo między rdzeniem i płaszczem, natomiast światłowód gradientowy ma budowę warstwową. Każda warstwa jest domieszkowana inaczej, dzięki czemu współczynnik załamania zmienia się w sposób ciągły. Wartość minimalna współczynnika występuje na granicy rdzenia-płaszcz, natomiast maksymalna na osi rdzenia.

Oprócz cylindrycznych światłowodów włóknistych stosuje się także światłowody płaskie planarne i paskowe. Światłowód planarny składa się z co najmniej trzech materiałów o różnych współczynnikach załamania. Światło propagowane w środkowej warstwie na skutek całkowitego wewnętrznego odbicia fali świetlnej od powierzchni granicznych może rozchodzić się w niej bez ograniczeń. Propagacja wiązki światła w światłowodach paskowych jest ograniczona w dwóch kierunkach.

Charakterystycznym parametrem światłowodu cylindrycznego, zależnym od średnicy rdzenia a i długości fali λ , jest tzw. częstotliwość znormalizowana V , którą określa równanie:

$$V = \frac{\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (2)$$

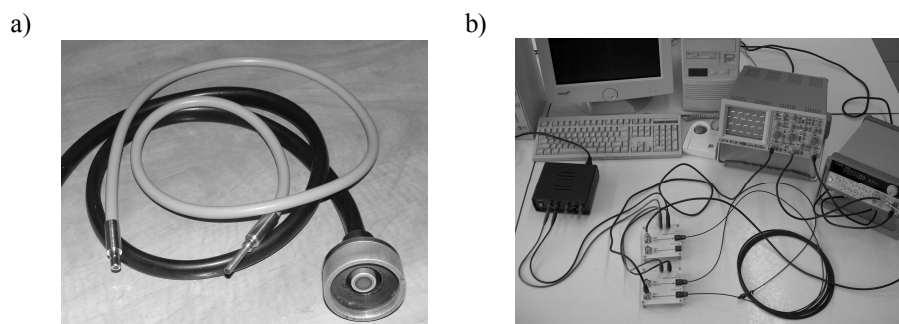
Im większa częstotliwość, tym mniejsza długość fali. Proporcjonalna do częstotliwości sygnału optycznego wartość V jest powiązana z liczbą modów m , które mogą występować w światłowodzie. Zależność ta ma postać

$$m = 2 \left(\frac{2V}{\pi} + 1 \right) \quad (3)$$

Warunkiem otrzymania jednodomowego światłowodu skokowego jest uzyskanie wartości $V < 2,405$ (dla falowodu cylindrycznego) oraz $V < 1,57$ (dla

falowodu planarnego). Kilka przykładów powiązania wartości V z modami liniowo spolaryzowanymi LP: $V = 0$ dla LP01, $V = 2,405$ dla LP11; $V = 3,83$ dla LP02; $V = 3,83$ dla LP21; $V = 5,14$ dla LP31 [18]. W celu uzyskania jednomodowej transmisji światła stosuje się światłowody o odpowiednio małej średnicy rdzenia (np. 9 μm), porównywalnej z długością fali świetlnej. Ponieważ prędkość rozchodzenia się poszczególnych modów może być różna, występuje zniekształcenie impulsu wyjściowego (rozmycie krawędzi przesyłanego sygnału) oraz zmniejszenie szybkości transmisji i/lub odległości, na jaką sygnał może być transmitowany.

Włókna światłowodów mają średnicę rdzenia od kilku μm (światłowody jednomodowe) do (50–1000) μm (światłowody wielomodowe). Mogą występować w postaci pojedynczego włókna, wiązki włókien lub setek tysięcy zespawanych włókien (płytki światłowodowe). Kable światłowodowe stosowane do realizacji odległych połączeń zawierają wiązki włókien umieszczone wewnątrz kabla zabezpieczonego warstwami ochronnymi i wzmacniającymi. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe wielomodowe kable światłowodowe.



Rys. 2. Przykłady połączeniowych kabli światłowodowych: a) krótkich szklanych do celów pomiarowych, b) długiego plastikowego do celów przemysłowych (zdjęcia wykonane przez autorów)

W zależności od przeznaczenia, światłowody wykonuje się najczęściej ze szkła (szkła optyczne mają współczynnik załamania światła równy od 1,5 do 1,6) oraz różnych polimerów. Tłumienność obecnie produkowanych włókien szklanych (w szczególności dla bardzo „suchego” szkła, czyli o małej zawartości jonów OH) może być wystarczająco mała, przy czym zależy ona od długości fali. Dla długości fali 1550 nm uzyskuje się np. tłumienność nieprzekraczającą 0,2 dB/km, co ma szczególnie znaczenie w optotelekomunikacji [14]. Producenci oferują firmowe nowatorskie rozwiązania sumatorów światłowodowych, homogenizatorów, lejków światłowodowych, kompletnych kabli oraz specjalistycznych sond, sensorów i obrazowodów na potrzeby zastosowań w przemyśle i inżynierii biomedycznej [3, 17, 19–21].

2.2. Obszary nowoczesnych zastosowań

Do obszarów obecnych zastosowań konwencjonalnych światłowodów należy optotelekomunikacja oraz liczne zastosowania niatelekomunikacyjne na potrzeby techniki sensorowej, metrologii, biomedycyny, układów wizualizacji, systemów wojskowych, systemów oświetleniowych. Do szerokiego stosowania światłowodów przyczyniają się ich unikatowe zalety, takie jak: niewielka waga i średnica włókien, niska cena materiału i niskie koszty eksploatacji, długi czas życia, szerokie pasmo i gwarancja dużej przepływności, mała tłumienność, dobre właściwości izolacyjne, odporność na zakłócenia, niski poziom przesłuchu międzykanałowego, wysoki stopień utajnienia przesyłanej informacji. Kable światłowodowe wykonuje się ze szkieł wieloskładnikowych o aperturze numerycznej $NA = (0,4-0,8)$ do transmisji promieniowania widzialnego oraz z włókien kwarcowych na potrzeby techniki UV i NIR. Światłowody specjalne wykorzystuje się do laserów dużej mocy, spektroskopii i techniki sensorowej w przedziale widmowym $(0,2-18) \mu\text{m}$. Światłowody grubordzeniowe kwarcowe domieszkowane fluorem i germanem o profilu skokowym i gradientowym są pokrywane m.in. akrylem, nylonem, tefzelem, polimidem, PVC, aluminium, miedzią [2, 14, 18]. Na krótkich odległościach są stosowane zwykle tańsze i bardziej elastyczne kable z włóknami polimerowymi (plastikowymi).

Światłowody paskowe stosuje się jako czujniki oraz w układach optoelektroniki i fotoniki zintegrowanej, takich jak np. źródła światła (lasery półprzewodnikowe), modulatory, przełączniki sygnału świetlnego [8, 17].

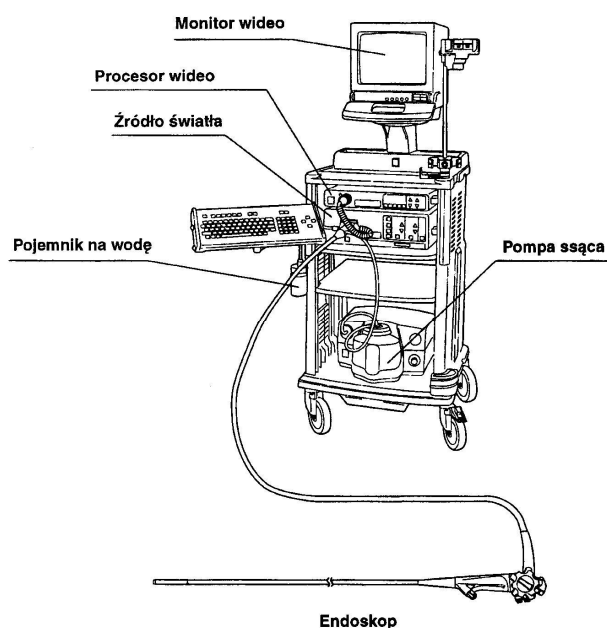
Kable optotelekomunikacyjne ze wzmocnioną powłoką są przeznaczone do bezpośredniego zakopywania w ziemi na terenach o dużym zagrożeniu uszkodzeniami mechanicznymi. Oddzielna grupa to samonośne kable napowietrzne lub podwieszane do przewodów odgromowych linii energetycznych.

Jednym z najnowszych zastosowań światłowodów jest tworzenie na ich bazie systemów oświetleniowych, które mają liczne zalety w porównaniu do tradycyjnych sposobów oświetlenia [19]. Do najważniejszych można zaliczyć bezpieczeństwo stosowania. Energia elektryczna dostarczana jest tylko do tzw. iluminatorów, w kablu światłowodowym prąd nie płynie, można je więc zastosować nawet do oświetlenia podwodnego, np. w basenach i fontannach. Na potrzeby techniki oświetleniowej wytwarza się polimerowe włókna światłowodowe z bardzo czystego Polimetakrylanu metylu (PMMA), który ma dużą przezroczystość, łatwość obróbki, jest odporny na działanie promieniowania UV i substancji nieorganicznych.

Natomiast na potrzeby inżynierii biomedycznej wykonuje się oświetlacze światłowodowe połączone ze źródłami światła zimnego oraz giętkie sondy (tzw. fiberoskopy) z obrazowodami polimerowymi lub kwarcowymi [1, 11, 21]. Sondy światłowodowe znajdują zastosowanie we wszystkich dziedzinach medycy-

ny, w tym np. w stomatologii. Lasery medyczne są wyposażone w odpowiednie światłowodowe kable transmisyjne i sondy, a także w rękojeści i aplikatory o ergonomicznych kształtach i specjalistycznym przeznaczeniu [20].

Na rysunku 3 przedstawiono przykład zestawu do wideoendoskopii do obrazowania trudnodostępnych organów przy wykorzystaniu giętkich fiberoskopów (rys. 3).

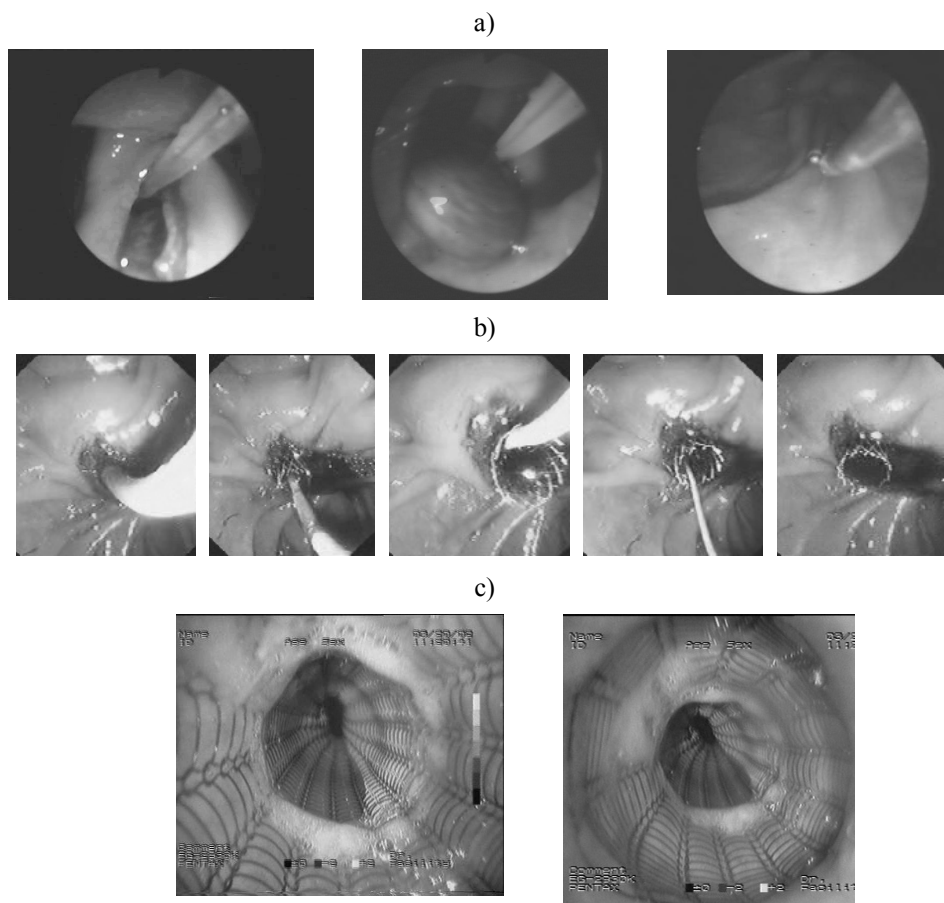


Rys. 3. Widok przykładowego zestawu do wideoendoskopii [21]

Jeżeli wiązka światłowodowa ma służyć jako obrazowód do przenoszenia obrazu optycznego, to włókna w tej wiązce muszą być uporządkowane. Przykłady obrazów pozyskanych za pomocą monitorowania wideoendoskopowego przedstawiono na rysunku 4 [4].

Światłowody są także stosowane w czujnikach służących do pomiarów różnych nieelektrycznych wielkości, takich jak np.: temperatura, ciśnienie, odkształcenie, położenie, naprężenie [8, 17]. Ze względu na sposób pobierania informacji o mierzonej wielkości rozróżnia się czujniki jednopunktowe, wielopunktowe oraz rozłożone. Skuteczne zastosowanie optoelektronicznej metody pomiarowej wymaga znajomości nie tylko właściwości optycznych obiektu, ale także jego cech termicznych, mechanicznych i elektrycznych. Badany obiekt jest elementem łącza optycznego, w którym zachowuje się jak modulator natężenia promieniowania. Informację o mierzonej wielkości uzyskuje się za pomocą światłowodowego czujnika zawierającego źródło promieniowania wnikaającego

do obiektu (fotoemiter) i odbiornik promieniowania przepuszczonego (fotodetektor). Promieniowanie o nieodpowiednio dobranej długości fali i mocy może oddziaływać nie tylko nieskutecznie, ale spowodować uszkodzenie lub zniszczenie badanego obiektu.



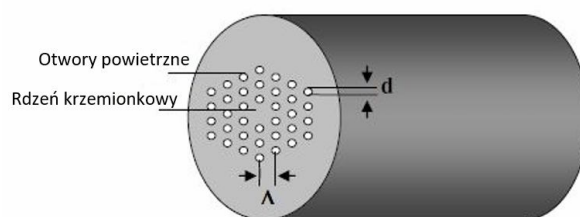
Rys. 4. Przykłady wykorzystania wideoendoskopii do obrazowania medycznego: a) początkowy i końcowy etap usuwania kamienia żółciowego oraz aplikacja cewnika, b) i c) wybrane obrazy wideoendoskopowe ilustrujące implementację samorozprężalnych stentów [4]

Pod wpływem zmian wartości mierzonej wielkości fizycznej zmieniają się parametry promieniowania przesyłanego światłowodem. Brak sygnałów elektrycznych umożliwia instalowanie czujników światłowodowych w rejonach zagrożonych wybuchem lub pożarem.

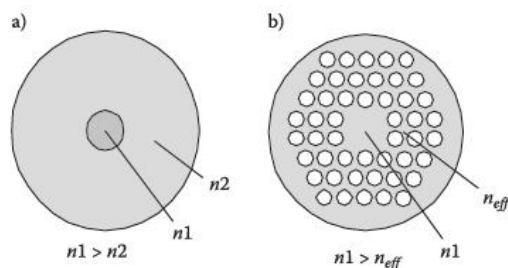
3. ŚWIATŁOWODY FOTONICZNE I KAPILARNE

3.1. Struktura i właściwości

Światłowody fotoniczne PCFs (*Photonic Crystal Fibers*) należą do najszybciej rozwijających się dziedzin przemysłu związanego z fotoniką [5, 6, 9, 10, 13]. Kryształ fotoniczny to struktura o periodycznie rozłożonym współczynniku załamania, w której występuje wzbroniona fotoniczna przerwa energetyczna. Stanowi więc materiał będący półprzewodnikiem światła. Eli Yablonovith uzyskał pierwszy kryształ fotoniczny w 1991 roku, a w 1997 roku została opracowana masowa metoda wytwarzania kryształów. Przykładem naturalnie występującego trójwymiarowego kryształu fotonicznego jest opał. W światłowodach PCF stosuje się konfiguracje mikrostrukturalne utworzone przez obszary z niskim współczynnikiem załamania zawarte w szkle (rys. 5).



Rys. 5. Ilustracja struktury światłowodu Fotonicznego [5]



Rys. 6. Porównanie przekrojów światłowodów: a) konwencjonalnego, b) fotonicznego [5]

Otworki mają średnice rzędu mikrometrów, a wypełnia się je różnymi materiałami aktywnymi, np. ciekłymi kryształami, których właściwości optyczne mogą być kontrolowane za pomocą czynników zewnętrznych, np. za pomocą zewnętrznego pola elektrycznego, dzięki czemu można sterować profilem współczynnika załamania światła. Zmiany te wpływają na parametry wiązki promieniowania. Geometria otworów i materiał szkła decydują m.in. o długości

fali, wartości apertury numerycznej NA, właściwościach dyspersyjnych, możliwości uzyskania wysokiej dwójłomności.

W propagacji promieniowania w konwencjonalnym światłowodzie włóknistym (rys. 6a) wykorzystuje się zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia TIR (*Total Internal Reflection*), natomiast istnienie sieci periodycznej w światłowodach fonicznych (rys. 6b) powoduje modyfikację tego klasycznego zjawiska. Dochodzi tu do przepuszczania przez płaszcz foniczny wysokich modów, które wyciekają – w rezultacie w rdzeniu są prowadzone tylko niższe mody, a zwłaszcza mod podstawowy o najmniejszej średnicy. Propagacja promieniowania w światłowodach fonicznych wykorzystuje więc zjawisko zmodyfikowanego całkowitego odbicia mTIR (*modified Total Internal Reflection*), ale możliwe jest także oparcie się na nowym mechanizmie przerw fonicznych – przerw wzbronionych PBG (*Photonic Band Gap*). Propagacja zależy od różnicy współczynnika załamania rdzenia i efektywnego współczynnika załamania płaszcza oraz od parametrów geometrycznych i materiałowych światłowodu.

Do zalet PCF należą w szczególności takie właściwości jak: możliwość pracy jednomodowej w zakresie od nadfioletu do podczerwieni, duża średnica pola modu, szeroki zakres wartości apertury numerycznej: od bardzo małych do aż 0,9, możliwość optymalizacji właściwości dyspersyjnych.

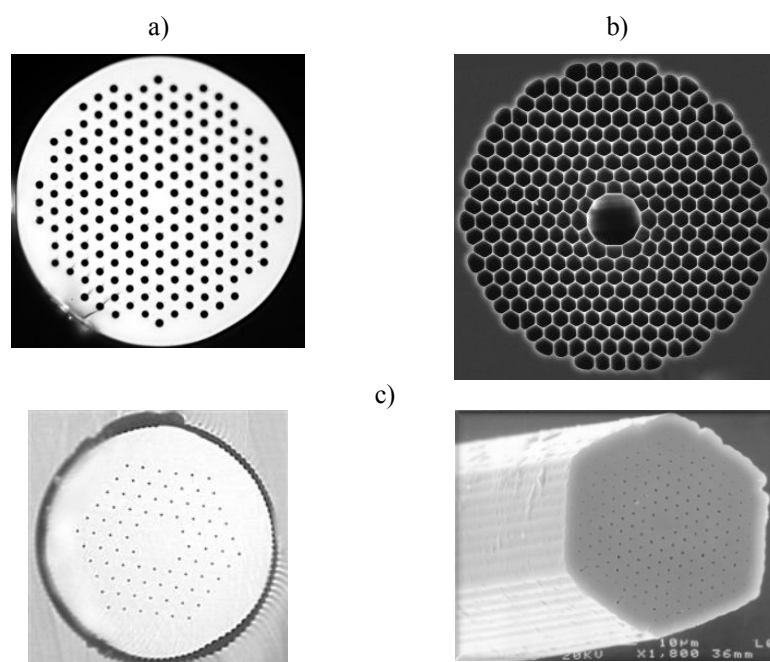
Wśród włókien PCF rozróżnia się: 1) włókna z jednorodnym rdzeniem o zwiększonym współczynniku załamania – *Index Guided Fibers* (rys. 7a i c); podobnie jak w standardowym włóknie światło propaguje się w jednorodnym rdzeniu bez domieszek (bardzo niskie straty), natomiast płaszcz ma strukturę z otworami, oraz 2) włókna z mikrostrukturą rdzenia, w szczególności „pusty” rdzeń – *Photonic Bandgap Fibers* (rys. 7b). Przerwa foniczna określa zakres długości fali, dla których światło nie może się rozchodzić – dla tego zakresu struktura jest idealnym zwierciadłem.

W Polsce prace nad wytwarzaniem i modelowaniem kryształów i światłowodów fonicznych są prowadzone w kilku ośrodkach akademickich i przemysłowych. Warto zauważyć, że jedna z niewielu grup badawczych na świecie zajmująca się badaniami nad ciekłokrystalicznymi światłowodami fonicznymi pracuje na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej już od 2003 roku [16].

3.2. Obszary zastosowań

Ze względu na swe właściwości, ciekłokrystaliczne światłowody foniczne mogą znaleźć szerokie zastosowanie np. w zintegrowanych układach optycznych, telekomunikacji światłowodowej oraz w światłowodowych czujnikach różnych parametrów badanych w trudnych warunkach i miejscach niedostępnych dla innych urządzeń [8, 17]. Możliwości aplikacyjne PCF to przede wszystkim telekomunikacja oraz nowe konstrukcje czujników optycznych [16].

Z punktu widzenia zastosowań cechuje je możliwość cięcia standardowymi narzędziami oraz łatwego spawania ze standardowymi włóknami i możliwość bezpośredniego zakładania standardowych światłowodowych złączy optycznych. Dzięki małej średnicy rdzenia uzyskuje się znaczną nieliniowość. Możliwa jest realizacja szerokopasmowych źródeł (superkontinuum).



Rys. 7. Rodzaje włókien fotonicznych PCF: a) Index Guided Fibers, b) Photonic Bandgap Fibers
c) Mikroskopowe obrazy przekrojów kwarcowych światłowodów fotonicznych [9, 10]

Światłowód fotoniczny typu hollow-core ma wydrążony, pusty rdzeń. Zanużając go w cieczy, wypełni się on wskutek działania sił kapilarnych (tzw. efekt kapilarny). Światłowody kapilarne [12] stanowią, od stosunkowo niedawna, bardzo efektywne narzędzie do budowy złożonych mikrosystemów opto–elektro-mechanicznych MOEMS. W pierwszej połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku na bazie szklanych kapilar budowano pierwszą generację niskostratnych światłowodów transmisyjnych o ciekłym rdzeniu. Światłowody kapilarne o fonicznym typie transmisji fali optycznej stanowią obecnie nowy, bardzo efektywny ośrodek transmisyjny do budowy laserów światłowodowych, szerokopasmowych źródeł światła, fonicznych elementów nieliniowych, dyspersyjnych, ultraszybkich linii transmisji sygnałów optycznych, itp. Propagacja fali optycznej w otworze kapilary o niewielkim wymiarze na znaczną odległość

stanowi podstawę do aplikacji wykorzystujących oddziaływanie takiej fali z materią.

Światłowody PCF z powietrznymi otworami pozwalają na znaczące modyfikacje ich właściwości. Wzajemne oddziaływanie światła z innymi substancjami, np. cieciami lub gazem, otwierają nowe możliwości zastosowań światłowodów krystalicznych z foniczną przerwą wzbronioną. Dzięki możliwości łatwego wypełniania otworów w światłowodzie substancjami ciekłymi nadają się one np. do pobierania próbek płynów. Jednak obecność cieczy w światłowodzie może również prowadzić do m.in. dużych strat w propagacji światła, co istotnie zawęża zakres zastosowań.

4. PODSUMOWANIE

Kierunek rozwoju nowych typów włókien światłowodowych wykazuje tendencję do tworzenia możliwie uniwersalnych włókien optycznych, które spełniają wymagania różnorodnych typów transmisji. Zauważalne są tendencje do fotonizacji systemów teletransmisji i dążenie do przesyłania sygnałów cyfrowych a nie analogowych. Układy światłowodowe są stosowane w nowoczesnej aparaturze pomiarowej i urządzeniach przemysłowych oraz powszechnego użytku. Zastosowanie światłowodów w telekomunikacji, technice pomiarowej, medycynie, przemyśle, lotnictwie, oświetleniu i zdobnictwie jest już dziś bardzo znaczne, a zakres aplikacji techniki światłowodowej wciąż się poszerza i obejmuje nowe obszary. Ciągłe pojawiają się nowe osiągnięcia technologii światłowodowej. Należą do nich także światłowody foniczne i kapilarne. Do przełomowych osiągnięć zalicza się możliwość zmiany właściwości optycznych światłowodów PCF poprzez wypełnianie ich pustych otworów cieciami anizotropowymi.

LITERATURA

- [1] Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, tom 8, Obrazowanie biomedyczne, praca zbiorowa pod. red. M. Nałęcza, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
- [2] Booth K., Hill S., Optoelektronika, Warszawa, WKŁ 2001.
- [3] Cysewska-Sobusiak A., Modelowanie i pomiary sygnałów biooptycznych, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [4] Cysewska-Sobusiak A., Sowier A., Skrzywanek P., Application of combined methods of imaging in minimally invasive surgery; Proc. 25th IEEE-EMBS Annual International Conference, Ron S. Leder (ed.), IEEE, September 2003, s. 1043–1046.
- [5] Grabiec W., Światłowody foniczne, Biuletyn WAT, vol. LV, 2006, s. 241–256.
- [6] Jablonovitch E., Photonic crystals, Journal of Modern Optics, 1994, vol. 41, Issue 2, s. 173–194.

- [7] Józwicki R., Technika laserowa i jej zastosowania, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2009.
- [8] Kaczmarek Z., Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe, Warszawa, Agenda Wydawnicza PAK 2008.
- [9] Knight J.C., Photonic crystal fibres, Nature, 2003, vol. 424, s. 847–851.
- [10] Knight J.C., Photonic crystal fibers and fiber lasers, J. Opt. Soc. Am. B, vol. 24, No. 8, August 2007, s. 1661–1668.
- [11] Podbielska H. (red.), Optyka biomedyczna. Wybrane zagadnienia, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2011.
- [12] Romaniuk R.S., Światłowodowy kapilarne, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2010.
- [13] Russel P., Photonic Crystal Fibers: a historical account, IEEE LEOS Newsletter 11, October 2007, s. 11–15.
- [14] Szwedowski A., Romaniuk R., Szkło optyczne i fotoniczne. Właściwości techniczne, Warszawa, WNT 2009.
- [15] Weik M.H., Fiber Optics and lightwave communications standard dictionary, New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1981.
- [16] Woliński T.R. i inni, Photonic liquid crystal fibers for sensing applications, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurements, vol. 57, No. 8, August 2008, s. 1796–1801.
- [17] Wójcik J., Technologia światłowodów dla potrzeb metrologii, Pomiar Automatyka Komputery w Gospodarce i Ochronie Środowiska, nr 1, 2008, s. 3–11.
- [18] Ziętek B., Optoelektronika. Wydanie rozszerzone i poprawione, Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika 2005.
- [19] <http://www.optec.pl/>
- [20] <http://www.cezarint.pl/>
- [21] <http://www.olympus.com/>

TENDENCIES IN DEVELOPING AND APPLICATION OF FIBEROPTICS

In the paper some selected problems concerned with modern techniques based on optical fibers are presented. Physical and optical phenomena and the selected examples of the current applications of different kinds of optical fibers are presented. Fiberoptics systems made for modern metrological, industrial, medical and common use are mentioned. Specific properties and application areas of photonic fiberoptics are also presented. Photonic crystal fibers area still develops very rapidly.

(Received: 08. 02. 2017, revised: 24. 02. 2017)