

Światłowody z kryształów fonicznych

Okresowe zmiany współczynnika załamania są wykorzystane w zwierciadłach Bragga i w falowodach zbudowanych z *kryształów fonicznych*¹ – PCF (ang. *Photonic Cristal Fibre*). Zachowanie się światła w kryształach fonicznych wykazuje na znaczne podobieństwa w zachowaniu się elektronów w „zwykłych” kryształach². Z ważniejszych właściwości kryształów fonicznych jest występowanie fonicznego pasma energii wzbronionej³ (ang. *photonic band – gap*). Narzuca się tutaj oczywista analogia do pasmowej teorii ciała stałego. Podstawy fizyki materiałów z optyczną przerwą energetyczną zostały podane⁴ w 1987 r. Od tego czasu ukazało się wiele prac na ten temat. Zbadano wiele materiałów pod kątem przydatności w budowie kryształów fonicznych, np.: półprzewodniki grupy II–VI, III–V i IV, tlenki, polimery i inne struktury, w tym metaloorganiczne. Bardzo obiecującym materiałem okazał się krzem⁵, również porowaty.

Kryształy foniczne dzieli się na jedno-, dwu- i trójwymiarowe.

Oczywiście najprostszą strukturą są foniczne kryształy jednowymiarowe. Stanowi je w istocie zwierciadło Bragga złożone z warstw na przemian o dużym i małym współczynnikiem załamania o określonej grubości ($\lambda/4$). Zwierciadło Bragga zachowuje się jak filtr pasmowy: pewne częstotliwości są przepuszczane przez strukturę, a pewne nie – są odbijane.

Zwinięcie zwierciadła Bragga w rurkę, pod warunkiem istnienia takiej możliwości, jest realizacją dwuwymiarowego kryształu fonicznego, który jest światłowodem z cylindrycznym zwierciadłem Bragga (ang. *Bragg fiber*) (rys. IV.23c). Światłowody z „klasycznych” kryształów fonicznych⁶ mogą być z rdzeniem kwarcowym (ang. *silica core fiber, Holey fiber*) (rys. IV.23a) i powietrznym (ang. *hollow core fiber, photonic band -gap fiber*) (rys. IV.23b) oraz

¹T. A. Birks, *Endlessly single mode photonic crystal fiber*, Opt. Lett., 22, 961 (1997); J. C. Knight, T. A. Birks, S. S. J. Russel, J. P. Sandro, *Properties of photonic crystal fiber and the effective index model*, J. Opt. Soc. Am., A15, 748, (1998).

²J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn, *Photonic Crystals. Molding the Flow of Light*, Princeton University Press, Princeton 1995.

³K. M. Ho, C. T. Chan, and C. M. Soukoulis, *Existence of a photonic gap in periodic dielectric structures*, Phys. Rev. Lett., 65, 3152 (1990); S. John and J. Wang, *Quantum electrodynamics near a photonic band gap: Photon bound states and dressed atoms*, Phys. Rev. Lett., 64, 2418 (1990).

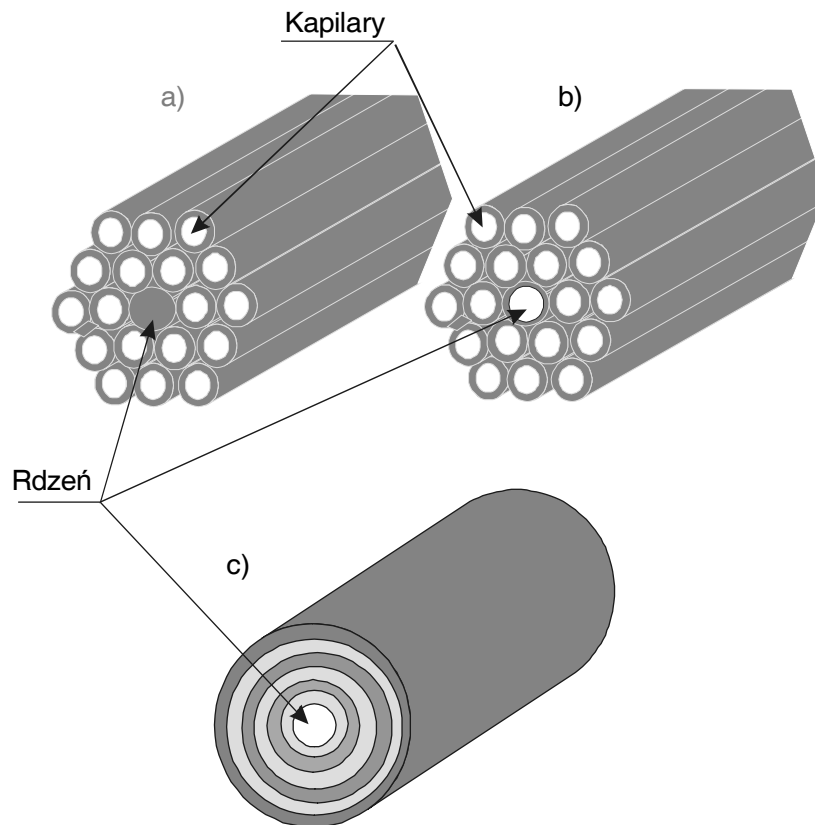
⁴E. Yablonovitch, *Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics*, Phys. Rev. Lett., 58, 2059 (1987); S. John, *Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices*, Phys. Rev. Lett., 58, 2486 (1987),

⁵A. Birner, R. B. Wehrspohn, U. M. Gösele, K. Busch, *Silicon-Based Photonic Crystals*, Adv. Mater., 13, 377 (2001).

⁶Rozumiem przez to obszary dielektryka o wymiarach porównywalnych z długością fali światła rozmieszczone periodycznie w otoczeniu o innej stałej dielektrycznej.

IV. ŚWIATŁOWODY

Światłowody należące do dwu ostatnich grup są zbudowane z kapilarnych rurek szklanych ułożonych zwykle w układ o symetrii heksagonalnej⁷. Technika produkcji włókien PCF polega na ułożeniu kapilar (ok. 1 mm) wokół pręta kwarcowego lub rurki kwarcowej i poddaniu procesowi wyciągania. Dalsza procedura związana z zabezpieczeniem światłowodu jest już standardowa. Bez względu na to, czy rdzeń jest szklany, czy wypełniony powietrzem traktuje się go jako defekt w strukturze. Jeśli więc światło wprowadzone do rdzenia nie może się rozchodzić w strukturze płaszczu, zatem jest w rdzeniu uwięzione i w nim propaguje się.



Rys. IV.23. Światłowody z kryształów fotonicznych typu Holey z wypełnionym rdzeniem (a), pustym (b) i typu Bragga (c)

Rozchodzenie się światła w PCF zależy, między innymi, od geometrii układu. Jak wspomnieliśmy, wyróżnia się dwa typy włókien z kryształów fotonicznych: z rdzeniem i z kanałem powietrznym. Parametry wpływające

⁷J. C. Knight, T.A. Birks, S. S. J. Russel, D. M. Atkin, *Pure silica single - mode fibre with hexagonal photonic cristal cladding*, Optics Lett., 21, 1547 (1996).

na właściwości transmisyjne światłowodu to średnica otworów – d i odległość między środkami otworów w płaszczu – Λ . Okazuje się, że jeżeli Λ jest rzędu połowki długości fali, to przez taki PCF nie przechodzi fala od dowolnej polaryzacji i dowolnej długości fali⁸. Jeżeli odległość między wewnętrznymi średnicami kapilar będzie porównywalna z długością fali, to światło przechodzące przez taki układ będzie ulegało dyfrakcji, podobnie promienie roentgenowskie przechodzące przez kryształ.

Jeżeli rdzeń jest szklivem, to wyróżniamy dwa tryby pracy⁹:

1. Jeśli otwory w płaszczu są małe, wtedy prowadzenie światła jest możliwe ze względu na wielkość *efektywnego współczynnika załamania* rdzenia, który jest większy niż współczynnik załamania otaczającej rdzeń struktury. Przerwy energetyczne wtedy nie powstają.

2. Jeśli otwory są duże (d/Λ jest rzędu 0.4 lub więcej) promieniowanie o określonej stałej propagacji β jest uwięzione w rdzeniu ponieważ ze względu na istnienie energetycznych przerw fotonicznych (ang. *photonic band gap guiding*) nie może się rozchodzić w płaszczu¹⁰. Przy periodycznej strukturze odbicie światła od płaszczu można rozpatrywać jak odbicie od zwierciadła Bragga.

Światłowód typu Holey można rozpatrywać jak światłowód skokowy, przy czym efektywny współczynnik załamania płaszczu jest średnią wartością współczynnika załamania szkła i dziur. Tutaj struktura periodyczna nie jest konieczna. W płaszczu muszą być dziury w celu obniżenia współczynnika załamania, a ich rozkład w zasadzie może być dowolny¹¹. Możemy też zdefiniować efektywną częstość znormalizowaną¹²

$$V_{ef} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_{ef}^2}.$$

Światłowód jest jednomodowy, jeśli V_{ef} jest mniejsze od częstotliwości odcięcia, która zależy od konstrukcji światłowodów. Specyfiką tych światłowodów jest to, że ze wzrostem długości fali efektywny materiałowy współczynnik załamania pokrycia maleje. Wynika to stąd, że głębokość wnikania fali zanikającej promieniowania do płaszczu jest proporcjonalna do długości fali. Im głębiej będzie wnikać fala, tym więcej dziur będzie się znajdowało w obszarze jej penetracji, co z kolei będzie wpływało na zmniejszanie efektywnego współczynnika załamania. Dzięki odpowiedniej konstrukcji można

⁸A. A. Maradudin, A. R. McGurn, *Photonic Band Structure of a Truncated Two-Dimensional Periodic Dielectric Medium*, J. Opt. Soc. of America B, 10, 307 (1993).

⁹J. A. Buck, *Fundamentals of Optical Fibers*, John Wiley & Sons, New York 2004.

¹⁰T. M. Munro, D. J. Richardson, N. G. K. Broderick, P. J. Bennett, *Holey Optical Fibers: An Efficient Modal Model*, IEEE J. of Lightwave Technology., 17, 1093 (1999).

¹¹Zakłócenia periodyczności są powodem wzrostu tłumienności włókna.

¹²T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russel, *Endless Single-Mode Photonic Crystal Fiber*, Opt. Lett., 22, 961 (1997).

IV. ŚWIATŁOWODY

zbudować światłowód, który jest jednomodowy w szerokim zakresie widmowym¹³. Natężenie modu podstawowego maleje monotonicznie z promieniem.

Dyspersja prędkości grupowej może zmieniać się w dużym zakresie. Długość fali odpowiadająca zerowej dyspersji zależy od wymiarów i wielkości powietrznych otworów, można ją zatem kontrolować. Możliwa staje się budowa jednomodowych światłowodów PCF z kontrolą dyspersji dla widzialnego i UV widma promieniowania¹⁴. Badania dyspersji pokazały¹⁵, że możliwa jest realizacja PCF z dużym współczynnikiem dyspersji, z zerem w kontrolowanej długości fali mniejszej niż dyspersja materiałowa w dużym zakresie widmowym. Dyspersja falowodowa światłowodów może osiągać duże wartości ponieważ Δ może osiągać dużą wartość. Okazuje się również, że w pewnych warunkach¹⁶ grupowy współczynnik załamania PCF może osiągnąć wartość 100. Umożliwia to kontrolę prędkości propagacji światła w dużym zakresie, co jest ważne w układach optyki zintegrowanej. Właśnie w optyce zintegrowanej zastosowania mogą być największe: w filtrach optycznych, dzielnikach światła, sprzęgaczach kierunkowych i innych urządzeniach. Jak dotąd tego krysztaly fotoniczne wykorzystywane są najczęściej jako włókna do specjalnych celów.

Drugi rodzaj PCF ma środek rdzenia pusty (światłowody z „pustym” rdzeniem są badane od 1999 r.), a struktura otaczająca tę centralną część z periodycznym współczynnikiem załamania zachowuje się tak jak zwierciadło Bragga. W tym przypadku nie występuje całkowite wewnętrzne odbicie, a odbicie fresnelowskie od periodycznej struktury dielektrycznej (zwierciadło Bragga).

W ogólności włókno może posiadać wielokrotne przerwy fotoniczne, a to znaczy, że jeśli częstotliwość światła leży w obszarze przerwy wtedy nie tworzy ono modu prowadzonego, ponieważ rozchodzi się w strukturze płaszczu. Poza zabronionymi częstotliwościami promieniowanie tworzy mody prowadzone. Osiągnięta tłumienność takich światłowodów jest na poziomie

¹³W pracy *Endless Single-Mode Photonic Crystal Fiber* T. A. Birks, J. C. Knight i P. S. J. Russel opublikowanej w *Opt. Lett.*, 22, 961 (1997) donoszą o światłowodzie PCF, który jest jednomodowy w zakresie od 337 nm – 1550 nm.

¹⁴J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks, A. Ortigosa-Blanch, P. S. J. Russel, *Anomalous Dispersion in Photonic Crystal Fiber*, *IEEE Photonic Tech. Lett.*, 12, 807 (2000).

¹⁵D. Mogilevtsev, T. A. Birks, P. S. J. Russel, *Group Velocity Dispersion in Photonic Crystal Fibers*, *Opt. Lett.*, 23, 1662 (1998); A. Ferrando, E. Silvestre, J.J. Miret, P. Andres, *Full-Vector Analysis of a Realistic photonic Crystal Fiber*, *Opt. Lett.*, 24, 276 (1999).

¹⁶M. Notomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, I. Yokohama, *Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs*, *Phys. Rev. Lett.*, 87, 253902 (2001).

0.5 dB/km. Centralny heksagonalny otwór funkcjonuje jak rdzeń, a struktura go otaczająca – jak płaszcz. Ważną zaletą takich włókien jest to, że jednomodowy światłowód może mieć dużą średnicę, nawet dziesięciokrotnie większą niż w konwencjonalnych światłowodach, zatem moc przenoszona w tym przypadku może być znacznie większa niż w zwykłych falowodach jednomodowych. Dzięki temu unika się efektów nieliniowych wywołanych dużą mocą propagowanego promieniowania.

Naturalnym dążeniem badaczy było skonstruowanie trójwymiarowych kryształów fotonicznych z trójwymiarową, szeroką przerwą energetyczną. Udane realizacje pojawiły się już w tym stuleciu¹⁷. Tego typu struktury będą wykorzystane do kontroli propagacji światła bez strat, bez względu na kierunek propagacji. Dwójłomność PCF uzyskuje się, podobnie jak w przypadku światłowodów innych typów, tzn. przez modyfikacje struktury płaszczka, np. wprowadzając dziury po obu stronach rdzenia¹⁸.

Właściwości optyczne PCF zwróciły uwagę uczonych zajmujących się generacją koherentnego światła białego – *superkontinuum* i w tej dziedzinie znalazły one zastosowanie¹⁹. Okazuje się bowiem, że włókna typu Holey charakteryzują się silnym efektem przesunięcia fazowego w wyniku samomodulacji fazowej. Również próg wymuszonego rozpraszania Brillouina jest poważnie obniżony (kilka razy) w stosunku do konwencjonalnych materiałów. Wspomniane wyżej zjawiska nieliniowe odgrywają dużą rolę w generacji superkontinuum. Wymienimy kilka możliwych zastosowań superkontinuum: szerokopasmowe testowanie urządzeń fotonicznych, spektroskopia, interferometria czy koherentna tomografia optyczna (OCT).

Ciekawe zastosowania mogą mieć kryształy fotoniczne w konstrukcjach o ujemnym współczynniku załamania²⁰. Są to tzw. metamateriały (ang.

¹⁷Steven G. Johnson and J. D. Joannopoulos, *Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap*, Appl. Phys. Lett., 77, 3490 (2000); C. Reese, C. Becher, A. Imamoglu, E. Hu, B. D. Gerardot, and P. M. Petroff, *Photonic crystal microcavities with self-assembled InAs quantum dots as active emitters*, Appl. Phys. Lett., 78, 2279 (2001).

¹⁸N. Shibata, Y. Sasaki, K. Okamoto, T. Hosaka, *Fabrication of Polarization-Maintaining and Absorption-Reducing Fibers*, IEEE J. of Lightwave Technology., LT-1, 38 (1983).

¹⁹M. Lehtonen, G. Genty, H. Ludvigsen, and M. Kaivola, *Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber*, Appl. Phys. Lett., 82, 2197 (2003); S. Coen, A. H. L. Chau, R. Leonhardt, J. D. Harvey, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, P. S. Russell, *White light supercontinuum generation with 60 - ps pump pulses in a photonic crystal fiber*, Opt. Lett., 26, 1356 (2001); J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz, *Visible continuum generation in air - silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm*, Opt. Lett., 25, 25 (2000).

²⁰D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, S. Schultz, *Composite medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity*, Phys. Rev. Lett., 84, 4184 (2000).

IV. ŚWIATŁOWODY

metamaterials), czy ogólniej materiały lewoskrętne²¹ (ang. *left-handed material*). Takie materiały w naturze nie istnieją, chociaż plazma w jonosferze może mieć tego typu właściwości. Wyniki badań nadal nie są jednoznaczne²², a eksperymenty przeprowadzano, jak dotychczas tylko w obszarze mikrofalowym²³.

Mniej egzotyczne zastosowania kryształów fotonicznych w optoelektronice, poza omawianymi wyżej światłowodami to pryzmaty, polaryzatory, układy do odchyłania wiązki, rezonansowe filtry, przełączniki itd.

²¹Nazwa: materiały lewoskrętne bierze się stąd, że w nich dla fali płaskiej iloczyn $\vec{E} \times \vec{H} = -\vec{k}$, przy czym kierunek wektora Poyntinga jest taki sam w obu układach. V. G. Veselago w pionierskiej pracy p.t. *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* zamieszczonej w *Sov. Phys. Usp.* 10, 509 (1968) przewidział takie efekty jak odwrotność konwencjonalnego załamania (promień odbity i załamany leży z tej samej strony normalnej do powierzchni rozdziału), promieniowania Czerenkowa, przesunięcia Dopplera, ogniskowanie cylindrycznej fali przez płaskie zwierciadła.

²²Na przykład różna interpretacja prędkości grupowej: P. M. Valanju, R. M. Walser, A. P. Valanju, *Wave refraction in negative-index Media: Always Positive and Very Inhomogeneous*, *Phys. Rev. Lett.*, 88, 187401 (2002) i komentarz J. B. Pedry, D. R. Smith, *Comment on "Wave refraction in negative-index Media: Always Positive and Very Inhomogeneous"*, *Phys. Rev. Lett.*, 90, 029703 (2003).

²³Na przykład A. K. Iyer, P. C. Kremer, G. V. Eleftheriades, *Experimental and theoretical verification of focusing in a large, periodically loaded transmission line negative refractive index metamaterial*, *Opt. Express*, 11, 696 (2003).