RZECZPOSPOLITA POLSKA

Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **240386**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **425320**

(22) Data zgłoszenia: **24.04.2018**

(51) Int.Cl.
G02B 6/036 (2006.01)
G02B 6/04 (2006.01)
G02B 6/14 (2006.01)
H01S 3/067 (2006.01)
H01S 3/17 (2006.01)
C03B 37/023 (2006.01)

(54) **Światłowód z kształtowanym profilem fotoczułości oraz sposób wytwarzania takiego światłowodu**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
04.11.2019 BUP 23/19

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
28.03.2022 WUP 13/22

(73) Uprawniony z patentu:
SIEĆ BADAWCZA ŁUKASIEWICZ – INSTYTUT MIKROELEKTRONIKI I FOTONIKI, Warszawa, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
RYSZARD BUCZYŃSKI, Warszawa, PL
TOMASZ OSUCH, Warszawa, PL
ALICJA ANUSZKIEWICZ, Warszawa, PL
KONRAD MARKOWSKI, Siedlce, PL
MARCIN FRANCZYK, Warszawa, PL
RAFAŁ KASZTELANIC, Nadarzyn, PL
DARIUSZ PYSZ, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Jakub Sielewiesiuk

PL 240386 B1

Opis wynalazku

Dziedzina wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest światłowód z kształtowanym profilem fotoczułości oraz sposób wytwarzania światłowodu o rdzeniu zawierającym strukturę pozwalającą na modulację współczynnika załamania światłem ultrafioletowym. W zależności od konkretnego typu takie światłowody znajdują zastosowanie m.in. w generacji laserowej i w technikach wzmocnienia (światłowody aktywne) i/lub w czujnikach światłowodowych i zastosowaniach telekomunikacyjnych (światłowody pasywne).

Stan techniki

Modulacja współczynnika załamania we włóknach światłowodowych stanowi jedno z podstawowych narzędzi kształtowania charakterystyki tych włókien w zależności od przewidzianego zastosowania. Okresowa zmiana współczynnika załamania włókna wzdłuż kierunku propagacji światła w praktyce jest realizowana dzięki strukturom periodycznym lub ewentualnie quasi-periodycznym. W zależności od długości okresu, struktury periodyczne można zaklasyfikować do grupy siatek długookresowych (okresy rzędu setek mikrometrów), bądź krótkookresowych (tj. siatek Bragga, okresy rzędu kilkuset nanometrów). W światłowodowych siatkach Bragga światło dopasowane fazowo do okresu struktury ulega silnemu rozproszeniu wstecznemu, co efektywnie prowadzi do selektywnego odbicia od struktury siatki Bragga fali elektromagnetycznej o określonej długości fali. Z kolei w transmisji siatki Bragga stanowią wysoce selektywne optyczne filtry pasmowo-zaporowe. Efekt silnego odbicia wstecznego nie występuje w siatkach długookresowych lub jest bardzo słaby, jednakże struktury te wykazują właściwości filtracyjne w transmisji wynikające ze sprzęgania modów płaszczowych z modem rdzeniowym (podstawowym] i są zwykle używane w tej konfiguracji.

W ostatnich dekadach wykorzystanie struktur periodycznych, tj. siatek Bragga i siatek długookresowych, niemalże zdominowało obszar fotoniki związany z technologią i wykorzystaniem czujników światłowodowych w wielu dziedzinach życia, jak również z telekomunikacją światłowodową i fotoniką mikrofalową. Siatki Bragga znajdują zastosowanie jako czujniki wielkości fizycznych (takich jak temperatura, odkształcenie), zwierciadła laserów światłowodowych lub selektywne filtry optyczne, a także stosowane są do stabilizacji długości fali generacji diod laserowych. Z kolei siatki długookresowe pracujące w konfiguracji transmisyjnej można stosować w szeroko rozumianej filtracji optycznej, jako dyskryminatory długości fali w systemach czujnikowych, a także jako czujniki wrażliwe miedzy innymi na warunki (współczynnik załamania) otoczenia lub jako element spłaszczający charakterystykę wzmocnienia erbowych wzmacniaczy światłowodowych.

Wytwarzanie struktur periodycznych bazuje na wykorzystaniu zjawiska fotoczułości cylindrycznych włókien światłowodowych o rdzeniu domieszkowanym tlenkiem germanu (IV), ze względu na fakt, że szkło germanowo-krzemionkowe wykazuje silną absorbcję ultrafioletu z zakresu 193–266 nm. W samej technologii wykonywania siatek Bragga, powszechnie wykorzystuje się źródła promieniowania optycznego o długości fali 193, 244 oraz 248 nm – wynika to głównie z dostępności takich laserów (lasery ekscymerowe ArF oraz KrF, jak również lasery argonowe pracujące w reżimie podwajania częstotliwości). W zależności od długości fali, jaką oświetlane jest włókno, zmiana współczynnika załamania następuje w wyniku procesu absorbcji jedno- (~244 lub ~248 nm), bądź dwufotonowej (~193 nm). Dla absorbcji jednofotonowej, postuluje się, że najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem tego mechanizmu jest teoria powstawania centrów barwnych w światłowodzie. W tym wypadku przyjmuje się, że za fotoczułość odpowiedzialne są połączenia walencyjne atomów Ge-Ge, których występowanie jest skutkiem defektów strukturalnych szkła (tj. miejscowego braku atomów tlenu). Wiązanie takie ma energię równą 5,1 eV, a zatem zbliżoną do długości fali ~240 nm. W przypadku procesu dwufotonowego, przyjmuje się, że elektrony atomów germanu wzbudzają się z poziomu energii walencyjnego do poziomu przewodnictwa, zarówno przez faktyczny stan energetyczny jak i wirtualny. [[K. O Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview", J. Lightwave Technol. 15, 1263–1276 (1997); David N Nikogosyan "Multi-photon high-excitation-energy approach to fibre grating inscription" Meas. Sci. Technol. 18 R1–R29 (2007); M. Lancry, B. Poumellec, "UV laser processing and multiphoton absorption processes in optical telecommunication fiber materials", Physics Reports, 523, 207–229 (2013)].

Ze względu na małe okresy zmianę współczynnika załamania rdzenia w przypadku siatek Bragga uzyskuje się metodami interferencyjnymi, metodami wykorzystującymi naświetlanie przez maski fazowe, jak również metodami zapisu punkt-po-punkcie [m.in. R. Kashyap, „Fiber Bragg Gratings", Academic Press, Amsterdam ect. (2010); I. Bennion, J. A. R. Williams, L. Zhang, K. Sugden, N. J. Doran,

"UV-written in-fibre Bragg gratings, Opt Quantum Electron. 28, str. 93–135 (1996), K. O. Hill, G. Meltz, „Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," J. Lightw. Technol. 15 (8), 1263–1276 (1997)]. Z kolei siatki długookresowe, ze względu na dużo większe okresy, wytwarza się głównie metodą punkt-po-punkcie lub z wykorzystaniem maski amplitudowej.

Metoda maski fazowej jest obecnie najczęściej stosowaną metodą wytwarzania światłowodowych siatek Bragga, ponieważ umożliwia uzyskiwanie dużej powtarzalności parametrów spektralnych, w szczególności długości fali Bragga. Polega ona na bocznym naświetleniu włókna wiązką laserową przez element dyfrakcyjny, tj. maskę fazową. Parametry maski fazowej, takie jak wysokość stopnia fazowego oraz współczynnika wypełnienia dobiera się tak, aby maksymalizować transmitowaną moc w ±1 rzędach dyfrakcji, jednocześnie minimalizując energię rzędu 0. Typowo, przyjmuje się wartości powyżej 35% mocy światła w ±1 rzędzie dyfrakcji oraz poniżej 2% mocy światła w rzędzie 0 za optymalne. W przestrzeni, w której wiązki z ±1 rzędów dyfrakcji nakładają się na siebie dochodzi do interferencji, co skutkuje odwzorowaniem wzoru interferencyjnego w fotoczułym rdzeniu włókna światłowodowego. Ponadto, przez modyfikację techniki, tj. skanowanie maski fazowej wiązką lasera, możliwa jest precyzyjna kontrola długości siatki Bragga.

Ponieważ wykonywanie siatek Bragga na różne długości fali (tj. o różnej wartości okresów) wymaga stosowania wielu masek fazowych, większą elastyczność w kontekście płynnej regulacji długości fali Bragga zapewniają metody interferometryczne. Jedną z najpowszechniej stosowanych jest metoda z wykorzystaniem interferometru Talbota [K. O Hill, G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview", J. Lightwave Technol. 15, 1263–1276 (1997)].

W metodzie naświetlania punkt-po-punkcie, okresową zmianę współczynnika załamania wywołuje się umieszczając włókno w obszarze skupionej lub ograniczonej przestrzennie w inny sposób wiązki lasera, oświetlając lokalnie obszary włókna oddalone o zadany dystans. Metoda ta wymaga stosowania precyzyjnych przesłon oraz stolików liniowych o zadanej rozdzielczości i dokładności [A. D. Kersey, et al., "Fiber Grating Sensors", J Lightwave Technol. 15, 1442–1463 (1997)].

Wśród komercyjnie dostępnych światłowodów wykazujących fotoczułość rdzenia włókna, tj. umożliwiających okresową modulację współczynnika załamania za pomocą promieniowania UV znajdują się klasyczne włókna telekomunikacyjne (np. SMF-28 firmy Corning) o zawartości germanu ok. 3–4% mol., a także włókna o zwiększonej zawartości germanu (do kilkunastu % mol.; np. GF3 firmy Nufern lub PS1250/1500 firmy Fibercore). Włókna typu SMF-28 ze względu na niską zawartość germanu wymagają dodatkowego procesu wodorowania w celu zwiększenia fotoczułości, zaś uzyskane siatki charakteryzują się ograniczoną termiczną stabilnością długookresową i muszą być dodatkowo poddawane procesom przyspieszonego starzenia w celu stabilizacji parametrów spektralnych. Z kolei większa koncentracja germanu wiąże się ze wzrostem współczynnika załamania rdzenia, co z kolei zwiększa zarówno aperturę numeryczną światłowodu, jak i długość fali odcięcia drugiego modu. W przypadku pożądanej jednomodowości włókien fotoczułych silnie domieszkowanych germanem w zakresie długości fali powyżej 1300 nm światłowody fotoczułe dostępne komercyjne występują w dwóch wersjach:

(a) o zmniejszonej średnicy rdzenia, co z jednej strony przesuwa długość fali odcięcia drugiego modu w kierunku krótkich fal, ale czyni włókno niekompatybilnym (pod względem średnicy rdzenia i średnicy pola modowego) z klasycznymi włóknami i podzespołami w standardzie telekomunikacyjnym; przykładem jest włókno SM1500 firmy Fibercore o średnicy pola modowego ok. 4 μm dla długości fali 1550 nm [https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/h63/h88/8797113188382/Highly-Germanium-Doped-Fiber.pdf];

(b) o rdzeniu współdomieszkowanym borem (a dokładniej B_2O_3], który obniża współczynnik załamania kompensując efekt domieszkowania GeO_2 i zapewniając w ten sposób kompatybilność rdzenia/pola modowego z SMF-28; zasadniczą wadą domieszkowania borem jest znaczący wzrost tłumienności jednostkowej światłowodu nawet o 2 rzędy wielkości względem SMF-28 lub włókna fotoczułego bez B_2O_3; przykładem jest włókno PS1250/1500 firmy Fibercore, o tłumienności rzędu 120 dB dla długości 1550 nm [https://www.newport.com/medias/sys_master/images/images/hee/h2d/8797055221790/Boron-Doped-Photosensitive-Fiber.pdf];

Odrębną grupę włókien, w których wprowadza się okresową modulację współczynnika załamania stanowią światłowody fotoniczne, posiadające strukturę dwuwymiarowego kryształu fotonicznego z centralnym defektem sieci (rdzeń). W tego typu światłowodach modyfikacja parametrów geometrycznych

mikrostruktury (kształtu, wielkości i wzajemnego rozmieszczenia otworów powietrznych w płaszczu) pozwala na kształtowanie w szerokim zakresie właściwości propagacyjnych oraz czujnikowych włókna a zatem i właściwości spektralnych siatek w nim zapisanych. Jest to niewątpliwie znacząca zaleta światłowodów fotonicznych w porównaniu z klasycznymi włóknami. Warto nadmienić, że w przypadku niskiej koncentracji germanu w obszarze defektu sieci spełniającego rolę rdzenia, światłowody fotoniczne, podobnie jak klasyczne, mogą wymagać dodatkowego procesu wodorowania, poprzedzającego naświetlanie wiązką UV.

Poza wymienionymi zaletami, struktura mikrootworów powietrznych w płaszczu światłowodu fotonicznego posiada jednak również wady. Poważnym problemem wynikającym z istnienia otworów powietrznych wokół rdzenia jest silne rozpraszanie promieniowania UV podczas wytwarzania siatki. Jest to zasadnicza przeszkoda w uzyskiwaniu serii siatek o powtarzalnych parametrach, a także złożonych struktur periodycznych o kształtowanym rozkładzie periodycznych zmian współczynnika załamania w obszarze rdzenia. Ponadto, występują problemy z obróbką termiczną włókna (zapadanie otworów) oraz spawaniem ze standardowymi włóknami optycznymi. Problematyczne jest również łączenie włókien fotonicznych w sposób mechaniczny w otoczeniu płynu immersyjnego z uwagi na efekt kapilarny.

W ostatnich latach opracowano włókna światłowodowe z nanostrukturyzowanym rdzeniem [R. Buczyński, M. Klimczak, T. Stefaniuk, R. Kasztelanie, B. Siwicki, G. Stępniewski, J. Cimek, D. Pysz, and Stępień, "Optical fibers with gradient index nanostructured core," Opt Express 23, 25588–25596 (2015)]. W odróżnieniu od dotychczas znanych włókien fotonicznych, w tym przypadku modyfikacja właściwości propagacyjnych odbywa się poprzez kształtowanie rozkładu współczynnika załamania rdzenia. Jest to realizowane poprzez wykonanie preformy w postaci odpowiednio ułożonych dwóch rodzajów szklanych prętów różniących się współczynnikiem załamania. Po wyciągnięciu włókna profil współczynnika załamania rdzenia wynika ze sposobu ułożenia pręcików, a sam światłowód w przekroju jest włóknem litym (bez otworów).

Konkretny wariant tej technologii opisano w polskim zgłoszeniu patentowym P.419944, ujawniając sposób wytwarzania światłowodu aktywnego, którego rdzeń składa się z prętów szklanych co najmniej dwóch rodzajów, przy czym co najmniej jeden rodzaj prętów zawiera co najmniej jedną domieszkę aktywną (pierwiastek ziem rzadkich], umożliwiającą generowanie promieniowania laserowego. Kontrola rozkładu poprzecznego domieszki w postaci zaprojektowanej i pocienianej struktury domieszkowanych i niedomieszkowanych prętów szklanych umożliwia ograniczenie zjawiska klasteryzacji domieszki, co wpływa na zwiększenie efektywności absorpcji promieniowania pompy. Dzięki zastosowaniu licznych prętów wszelkie niejednorodności ulegają uśrednieniu i maleje rozrzut parametrów wzdłuż wykonanego włókna. Ponadto, w zależności od konkretnego układu poszczególnych rodzajów pręcików w rdzeniu, możliwe jest kształtowanie profilu współczynnika załamania w zależności od konkretnych potrzeb, w szczególności profilu gradientowego, skokowego lub nieciągłego.

Omówienie istoty wynalazku

Celem wynalazku było przezwyciężenie wspomnianych powyżej problemów, związanych ze stosowaniem znanych rozwiązań dotyczących wytwarzania struktur periodycznych w światłowodach, poprzez opracowanie światłowodu z możliwością kształtowania profilu fotoczułości i własności propagacyjnych, a w szczególności umożliwiającego bardziej efektywną modulację współczynnika załamania światłem UV, niż w przypadku powszechnie stosowanych włókien fotoczułych.

Korzystając z koncepcji nanostrukturyzacji rdzenia twórcy przedmiotowego rozwiązania opracowali włókna pasywne z niezależnym profilowaniem rozkładu fotoczułości oraz niezależnym profilowaniem rozkładu współczynnika załamania wpływającego na właściwości propagacyjne światłowodu, w wyniku zastosowania szklanych prętów co najmniej trzech rodzajów, a zależnym gdy stosuje się tylko dwa rodzaje prętów. Z kolei w przypadku włókna aktywnego wykorzystanie koncepcji nanostrukturyzacji rdzenia poprzez rozdzielenie obszarów fotoczułych i aktywnych rdzenia w skali nano w tej samej objętości, a więc z uzyskaniem tego samego obszaru rdzenia jednocześnie wykazującego fotoczułość i aktywność, pozwoliło na znaczące ograniczenie niekorzystnego zjawiska klasteryzacji jonów domieszki aktywnej (np. erbu) z jonami szkła bazowego i domieszkowanego, co powoduje obniżenie sprawności generacji promieniowania we włóknie. Zastosowanie obszarów fotoczułych oraz aktywnych w tej samej objętości pozwala na uzyskanie włókna laserowego z siatkami Bragga, pełniącymi rolę zwierciadeł we wnęce rezonansowej lasera. Obecnie w celu uzyskania wnęki laserowej w układach „all-fiber" dołącza się do włókna aktywnego siatki Bragga nanoszone na oddzielnych fotoczułych, ale nie-aktywnych światłowodach. Innym sposobem jest wykorzystanie do zapisu siatki BG włókna z fotoczułym płaszczem i aktywnym rdzeniem, ale wówczas przekrycie pola modu z obszarem, gdzie wytworzona jest siatka

(płaszcz wewnętrzny) jest małe, co pogarsza efektywność wnęki rezonansowej [L. Dong, W. H. Loh, J. E. Caplen, J. D. Minelly, K. Hsu, and L. Reekie, "Efficient single-frequency fiber lasers with novel photosensitive Er/Yb optical fibers," Opt. Lett 22, 694–696 (1997)].

Przedmiotem wynalazku jest światłowód z kształtowanym profilem fotoczułości, przystosowany do prowadzenia i generowania promieniowania o długości fali λ oraz do indukowania modulacji współczynnika załamania. Światłowód ten jest wyposażony w płaszcz oraz nanostrukturyzowany rdzeń złożony z podłużnych elementów szklanych zorientowanych wzdłuż światłowodu i tworzących zwartą wiązkę, przy czym wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od długości fali λ, zaś rdzeń złożony jest z co najmniej dwóch rodzajów elementów podłużnych, różniących się współczynnikiem załamania. Istotą wynalazku jest to, że wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od 1/3 długości fali λ, zaś elementy podłużne pierwszego rodzaju są wykonane ze szkła krzemionkowego domieszkowanego GeO_2, a elementy podłużne drugiego rodzaju są wykonane z czystej krzemionki, przy czym na elementach podłużnych pierwszego rodzaju naniesiona jest struktura o fotoindukowanej modulacji współczynnika załamania, korzystnie wybrana z grupy obejmującej siatkę Bragga i siatkę długookresową.

Korzystnie światłowód zawiera elementy podłużne trzeciego rodzaju wykonane ze szkła zawierającego przynajmniej jedną domieszkę aktywną.

Korzystnie domieszka aktywna jest wybrana spośród erbu, prazeodymu, iterbu, neodymu, tulu, holmu oraz innych.

Korzystnie współczynnik załamania elementów podłużnych jednego rodzaju ma wartość mniejszą lub równą najniższej wartości charakterystyki współczynnika załamania w przekroju poprzecznym rdzenia, a współczynnik załamania elementów podłużnych innego rodzaju ma wartość większą lub równą najwyższej wartości charakterystyki współczynnika załamania w przekroju poprzecznym rdzenia.

Korzystnie światłowód posiada płaszcz fotoniczny.

Korzystnie światłowód jest światłowodem dwójłomnym, przy czym dwójłomność uzyskuje się poprzez anizotropię materiału rdzenia lub anizotropię geometrii rdzenia i/lub płaszcza.

Korzystnie światłowód jest włóknem kilkumodowym.

Światłowody według wynalazku wykazują wszystkie zalety włókien nanostrukturyzowanych, w tym przede wszystkim zapewniają możliwość uzyskania arbitralnego rozkładu współczynnika refrakcji dzięki możliwości zaprojektowania struktury rdzenia z pręcików szklanych o różnych współczynnikach załamania, oraz uśrednieniu niejednorodności. Ponadto, zastosowanie jednego rodzaju prętów ze szkła domieszkowanego GeO_2 pozwala na niezależne profilowanie rozkładu fotoczułości, podczas, gdy zastosowanie drugiego rodzaju prętów (z innego rodzaju szkła, a więc różniących się od pręcików pierwszego rodzaju współczynnikiem załamania) umożliwia niezależne profilowanie rozkładu współczynnika załamania wpływającego na własności propagacyjne światłowodu. Należy przy tym podkreślić, że nanostrukturyzacja zapewnia możliwość doboru składu materiałowego rdzenia (w sensie przestrzennym) poprzez użycie prętów z dowolnymi domieszkami kształtującymi rozkład współczynnika załamania w rdzeniu oraz, w przypadku domieszkowania GeO_2, kształtującymi fotoczułość, przez co uzyskuje się ten sam obszar rdzenia jednocześnie o zadanym profilu współczynnika załamania i zadanym profilu fotoczułości.

Jedną ze szczególnych zalet światłowodów według wynalazku jest zapewnienie możliwości zwiększenia fotoczułości względem standardowego włókna SMF-28 przy zachowaniu efektywnie tego samego poziomu domieszkowania GeO_2 oraz przy zachowaniu pełnej kompatybilności z SMF-28 w odniesieniu do średnicy pola modowego. Konsekwencją jest uzyskanie włókna kompatybilnego z SMF-28 o zwiększonej fotoczułości, co przekłada się na większą efektywność fotoindukowania zmian współczynnika załamania, co wyraża się na przykład w możliwości uzyskania siatki o zadanym współczynniku odbicia przez dostarczenie mniejszej dawki promieniowania UV niż w przypadku włókien o mniejszym poziomie fotoczułości. Kolejna konsekwencja struktury światłowodu według wynalazku to uzyskanie pełnej kompatybilności (w sensie średnicy pola modowego) ze standardowym włóknem SMF-28 bez potrzeby współdomieszkowania borem, jak ma to miejsce w komercyjnych włóknach fotoczułych np. PS1250/1500 firmy Fibercore. Bor, a dokładniej B_2O_3, stosuje się w rozwiązaniach ze stanu techniki dla skompensowania wzrostu współczynnika załamania rdzenia na skutek domieszki GeO_2 w celu zmiany pola modowego światłowodu fotoczułego tak, aby było ono kompatybilne ze standardowym światłowodem telekomunikacyjnym takim, jak SMF-28. Domieszka B_2O_3 zwiększa tłumienność, co jest niekorzystne z punktu widzenia transmisji i zmniejsza czułość temperaturową włókna, co jest nie-

korzystne z punktu widzenia zastosowania jako czujnika temperatury. Eliminacja konieczności współdomieszkowania borem w przypadku światłowodów według wynalazku przy zachowaniu kompatybilności z włóknami SMF-28 w zakresie średnicy pola modowego pozwala na uniknięcie tych niekorzystnych zjawisk.

Inna zaleta światłowodów według wynalazku to możliwość uzyskania światłowodu fotoczułego kompatybilnego z SMF-28 o obniżonej długości fali odcięcia drugiego modu (ang. cut-off wavelength), co zapewnia pracę jednomodową włókien w szerszym zakresie spektralnym – poszerzonym od strony fal krótkich. Jest to korzystne na przykład w zastosowaniach światłowodów jako mediów do uzyskania akcji laserowej (a więc światłowodów aktywnych) w modzie podstawowym.

Kolejna zaleta światłowodów według wynalazku to zapewnienie możliwości kształtowania rozkładu przestrzennego domieszki GeO_2 celem modyfikacji efektywności oddziaływania poszczególnych modów ze strukturą wytworzonej siatki. Pozwala to na uzyskanie struktury o fotoindukowanej zmianie współczynnika załamania (np. siatki Bragga), która będzie silniej oddziaływała z modem wyższego rzędu niż z modem podstawowym, lub na odwrót, zależnie od rozkładu koncentracji domieszki GeO_2.

Ponadto, światłowody według wynalazku zapewniają możliwość kształtowania wzajemnych relacji pomiędzy stałymi propagacji modów światłowodu kilkumodowego poprzez kształtowanie profilu współczynnika załamania rdzenia. Dokładniej, oznacza to możliwość kształtowania we włóknie z naniesioną siatką wzajemnych relacji długości fali odbicia dla poszczególnych modów światłowodu kilkumodowego. Niesymetryczny rozkład domieszki GeO_2 daje możliwość selektywnego wzmocnienia efektywności odbicia dla wybranego modu, a zatem przy koncentracji domieszki GeO_2 w środku rdzenia siatka silnie odbija mod podstawowy, natomiast jeśli domieszka germanowa jest skoncentrowana na obrzeżach rdzenia siatka silnie oddziałuje z modem wyższym, przy założeniu, że rozkład innych prętów zapewnia profil współczynnika załamania odpowiedni do prowadzenia podstawowego modu gaussowskiego lub o podobnej charakterystyce.

Warto przy tym podkreślić, że w porównaniu ze światłowodami fotonicznymi, we włóknach z nanostrukturyzowanym rdzeniem nie ma otworów powietrznych rozpraszających promieniowanie UV podczas nanoszenia struktur periodycznych oraz utrudniających termiczną obróbkę włókna. Mimo to, dzięki odpowiedniemu profilowaniu nanostrukturyzowanego rdzenia w światłowodach według wynalazku, możliwe jest kształtowanie właściwości propagacyjnych (w szczególności takich, jak dyspersja, efektywne pole modowe, stała propagacji, dwójłomność, modowość, długość fali odcięcia drugiego modu, apertura numeryczna] tak, jak w światłowodach fotonicznych. Światłowody według wynalazku łączą w sobie zalety włókna klasycznego i fotonicznego, a jednocześnie są pozbawione niektórych wad łych znanych włókien.

Jeśli elementy podłużne nie zawierają domieszki aktywnej, światłowód według wynalazku jest światłowodem pasywnym, a włókno jest zbudowane z prętów pierwszego rodzaju i drugiego rodzaju. Jednakże w jednym z korzystnych wariantów wykonania światłowodów według wynalazku elementy podłużne trzeciego rodzaju są wykonane ze szkła zawierającego przynajmniej jedną domieszkę aktywną (pręty trzeciego rodzaju) a tym samym uzyskany światłowód jest światłowodem aktywnym. Korzystnie domieszka aktywna jest wybrana spośród erbu, prazeodymu, iterbu, neodymu, tulu, holmu i innych.

Główną zaletą światłowodów aktywnych według wynalazku jest możliwość uzyskania rdzenia wykazującego wysoką fotoczułość wynikającą z domieszki GeO_2 oraz aktywność wynikającą z domieszki pierwiastka ziem rzadkich, w tej samej objętości, dzięki naprzemiennemu ułożeniu elementów podłużnych pierwszego i trzeciego rodzaju. W skali długości fali λ promieniowania prowadzonego i generowanego w światłowodzie materiał rdzenia wykazuje uśrednione własności i dzięki temu może być jednocześnie aktywny, fotoczuły i wykazywać określony efektywny profil/rozkład współczynnika załamania.

Jak wspomniano powyżej rdzeń zawiera elementy podłużne drugiego rodzaju wykonane z czystej krzemionki, a zatem o współczynniku załamania różnym od współczynnika załamania elementów podłużnych pierwszego i trzeciego rodzaju. Odseparowanie elementów podłużnych pierwszego rodzaju (fotoczułych) od elementów podłużnych trzeciego rodzaju (aktywnych) przez elementy podłużne z czystej krzemionki (drugiego rodzaju) w postaci prętów lub kapilar, pozwala na całkowitą eliminację zjawiska klasteryzacji jonów. Ponadto, zarówno w przypadku światłowodów aktywnych, jak i pasywnych, zastosowanie elementów podłużnych drugiego rodzaju ze szkła pozbawionego domieszki aktywnej umożliwia zastosowanie szerszego zakresu wartości współczynnika załamania w rdzeniu.

W innym korzystnym wariancie realizacji światłowodu według wynalazku współczynnik załamania elementów podłużnych jednego rodzaju ma wartość mniejszą lub równą najniższej wartości charakterystyki współczynnika załamania w przekroju poprzecznym rdzenia, a współczynnik załamania elementów podłużnych innego rodzaju ma wartość większą lub równą najwyższej wartości charakterystyki współczynnika załamania w przekroju poprzecznym rdzenia. Dzięki takiemu rozwiązaniu arbitralny rozkład współczynnika załamania można uzyskać stosując zaledwie dwa rodzaje szkła (w przypadku światłowodów pasywnych) lub trzy rodzaje (w przypadku światłowodów aktywnych).

W jeszcze innym korzystnym wariancie realizacji światłowód aktywny według wynalazku posiada płaszcz fotoniczny, na przykład w postaci pojedynczego pierścienia otworów.

W kolejnym korzystnym wariancie realizacji światłowód według wynalazku jest światłowodem dwójłomnym, przy czym uzyskanie dwójłomności możliwe jest na dwa sposoby: poprzez anizotropię materiału rdzenia lub anizotropię geometrii rdzenia i/lub płaszcza (brak symetrii osiowej w rdzeniu i/lub płaszczu).

Korzystnie wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od długości fali λ.

Dzięki tak niewielkim wymiarom poprzecznym elementów rdzenia nie są one rozróżniane przez falę świetlną i nie dochodzi do propagacji światła w postaci modu w pojedynczym elemencie, co jest pożądane w przypadku światłowodów jednomodowych.

Zgodnie z wynalazkiem na elementach podłużnych pierwszego rodzaju naniesiona jest struktura o fotoindukowanej modulacji współczynnika załamania, która w szczególności jest wybrana z grupy obejmującej siatkę Bragga i siatkę długookresową. Możliwość zapisu siatki wynika wprost z zastosowania fotoczułych elementów podłużnych pierwszego rodzaju (domieszkowanych GeO_2).

W kolejnym korzystnym wariancie realizacji światłowód jest włóknem kilkumodowym. Nanostrukturyzacja rdzenia umożliwia kształtowanie charakterystyki modowej światłowodu (rozkładu efektywnego współczynnika załamania), w tym ilości liczby modów, rozkładu pola modu i wartości stałych propagacji dla poszczególnych modów.

Przedmiotem wynalazku jest również sposób wytwarzania światłowodu według wynalazku o rdzeniu przystosowanym do wytwarzania struktury o fotoindukowanej modulacji współczynnika załamania. Istotą wynalazku jest to, że wiązką lasera UV naświetla się światłowód, który przystosowany jest do prowadzenia i generowania promieniowania o długości fali λ, który wyposażony jest w płaszcz oraz nanostrukturyzowany rdzeń złożony z podłużnych elementów szklanych zorientowanych wzdłuż światłowodu i tworzących zwartą wiązkę, w którym wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od 1/3 długości fali λ, zaś rdzeń złożony jest z co najmniej dwóch rodzajów elementów podłużnych, różniących się współczynnikiem załamania, przy czym elementy podłużne pierwszego rodzaju są wykonane ze szkła domieszkowanego GeO_2, a elementy podłużne drugiego rodzaju są wykonane z czystej krzemionki, przy czym prowadzi się naświetlanie boczne laserem pracującym w trybie ciągłym lub impulsowym.

Korzystnie naświetlanie światłowodu wiązką lasera UV prowadzi się metodą interferometryczną, metodą z wykorzystaniem maski fazowej, metodą zapisu punkt po punkcie, lub metodą maski amplitudowej.

Do niewątpliwych zalet sposobu według wynalazku należy przede wszystkim możliwość wykorzystania istniejących urządzeń do uzyskiwania struktur o fotoindukowanej modulacji współczynnika załamania w światłowodach z kształtowanym profilem fotoczułości dzięki obecności domieszki GeO_2 w jednym z rodzajów elementów podłużnych wchodzących w skład nanostrukturyzowanego rdzenia. Ponieważ w elementach podłużnych drugiego i trzeciego rodzaju (a więc nie zawierających domieszki GeO_2) nie zachodzi fotoindukowana modulacja współczynnika załamania, odpowiednie rozmieszczenie fotoczułych elementów podłużnych pozwala na kształtowanie pożądanej docelowej charakterystyki współczynnika załamania rdzenia, niezależnie od wpływu na inne własności propagacyjne lub aktywność, wynikające z obecności i rozkładu pozostałych rodzajów elementów podłużnych. W sposobie według wynalazku możliwe jest zastosowanie lasera UV zarówno o pracy ciągłej, jak i impulsowej, w zależności od konkretnych wymagań i pożądanych parametrów światłowodu końcowego.

Dzięki zastosowaniu światłowodów z kształtowanym profilem fotoczułości według wynalazku większa jest efektywność procesu zapisu/wytwarzania siatki, co oznacza, że dla do uzyskania siatki o zadanym współczynniku odbicia potrzebna jest mniejsza dawka promieniowania UV. Ma to związek z kształtowaniem profilu fotoczułości rdzenia poprzez nanostrukturyzację.

Wynalazek zostanie teraz bliżej przedstawiony w korzystnych przykładach wykonania, z odniesieniem do załączonego rysunku, na którym:

fig. 1 przedstawia strukturę przekroju poprzecznego rdzenia światłowodu według wynalazku o parabolicznym rozkładzie współczynnika załamania w rdzeniu;

fig. 2 a–f przedstawia strukturę przekroju preformy i subpreformy światłowodu z fig. 1;

fig. 3 a–b przedstawia obraz ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM] przekroju światłowodu z fig. 1;

fig. 4 a–e przedstawia wyniki pomiarów długości fali odcięcia drugiego modu i tłumienności dla przykładowych światłowodów według wynalazku;

fig. 5 a–b przedstawia zmierzoną i wyliczoną charakterystykę dyspersji D dla światłowodów przykładowego światłowodu według wynalazku oraz zmianę różnicy dyspersji w funkcji eksperymentalnie wyznaczonego ZDW;

fig. 6 przedstawia schematu kładu pomiarowego do charakteryzacji siatek Bragga wykonanych na przykładowym światłowodzie według wynalazku;

fig. 7 przedstawia widmo transmisyjne siatki Bragga z λ_B = 1061,5 nm, wykonanej na przykładowym światłowodzie według wynalazku;

fig. 8 przedstawia widmo transmisyjne siatek Bragga z λ_B w okolicy trzeciego okna transmisyjnego (1550 nm), wykonanych na przykładowym światłowodzie według wynalazku;

fig. 9 a–b przedstawia zależne od temperatury przesunięcie długości fali Bragga dla przykładowego światłowodu według wynalazku;

fig. 10 a–b przedstawia zależne od temperatury przesunięcie długości fali Bragga dla przykładowego światłowodu według wynalazku;

fig. 11 przedstawia zależną od gęstości energii fotoindukowaną modulację współczynnika załamania dla przykładowego światłowodu z profilem skokowym współczynnika załamania według wynalazku;

fig. 12 przedstawia zależną od rozkładu prętów domieszkowanych GeO_2 fotoindukowaną modulację współczynnika załamania dla takiej samej gęstości mocy;

fig. 13 przedstawia zależną od rozkładu prętów domieszkowanych GeO_2 efektywność modulacji współczynnika załamania w funkcji gęstości mocy.

Opis szczegółowy preferowanego wariantu wykonania

Przykładowy światłowód nGRIN (ang. nanostructured Graded-Index) według wynalazku, którego przekrój rdzenia pokazano na fig. 1, otrzymano w następujący sposób:

Wytwarzanie włókna

Czyste szkło krzemionkowe (Ohara SK1310) uformowano w szklane pręty o średnicy 0,45 mm. Preformę ze skokową zmianą współczynnika załamania (ang. step-index) domieszkowaną GeO_2 (Optacore) z koncentracją 8,5%mol również wyciągnięto do uzyskania szklanych prętów o tej samej średnicy. Następnie ze szklanych prętów ułożono warstwa po warstwie strukturalną preformę zgodnie ze schematem przedstawionym na fig. 1. Zastosowano łącznie 2107 szklanych prętów, z 53 prętami na przekątnej. Preformę zgrzano i wyciągnięto do utworzenia subpreform o średnicy od 1 do 3 mm. Subpreformę następnie umieszczono wewnątrz rury szklanej z czystego szkła krzemionkowego z firmy Heraeus, a wolną przestrzeń wypełniono prętami ze szkła tego samego rodzaju, celem uzyskania wymaganego rozmiaru płaszcza końcowych włókien w przedziale od 100 do 136 μm. Wszystkie procesy wyciągania prowadzone były z wykorzystaniem wieży do wyciągania włókien światłowodowych typowo stosowanej do wytwarzania włókien ze szkła krzemionkowego. Włókno #2 dodatkowo zabezpieczono powłoką polimerową w celu poprawy właściwości mechanicznych, co umożliwiło zmierzenie długości fali odcięcia drugiego modu metodą zginania.

W tabeli 1 poniżej przedstawiono właściwości użytych do wytwarzania światłowodów rodzajów szkła i szklanych preform.

Tabela 1

Parametr	Typ szkła		
	niski współczynnik załamania	wysoki współczynnik załamania (preforma o profilu skokowym)	
		rdzeń	płaszcz
	SK1310	F300 domieszkowany Ge	F300
współczynnik załamania, n_e	1,4609	1,47207	1,46007
średnica początkowa [mm]	10	18,4	24
stężenie GeO_2 [%mol]	0	8,5	0
ostateczna średnica pręta [mm]	0,45	0,45	
efektywne stężenie GeO_2 [%mol]	0	4,9*	
efektywny współczynnik załamania n_e	1,4609	1,4678	

* Ze względu na efekt dyfuzji oraz na uśrednienie koncentracji germanu w całym pręcie z preformy o skokowym profilu współczynnika załamania, efektywna koncentracja GeO_2 w pręcikach domieszkowanych wynosi 4,9%mol.

Na fig. 2 przedstawiono w przekroju złożoną preformę strukturalną i subpreformę elementu nGRIN wykonanego z prętów z czystego szkła krzemionkowego oraz szkła krzemionkowego domieszkowanego germanem. Preformę strukturalną przedstawiono w perspektywie (fig. 2a) oraz z przodu (fig. 2d). Na widoku preformy na fig. 2b można wyróżnić każdy pręt szklany o średnicy 0,45 mm. Na fig. 2c przedstawiono obraz przekroju wyciągniętej subpreformy o przekątnej 1,5 mm. Na fig. 2c i 2f przedstawiono przekrój subpreformy w powiększeniu. Ciemne obszary odpowiadają krzemionce niedomieszkowanej, a jasne – rdzeniom prętów o dużej zawartości domieszki (8,5% mol GeO_2), wykonanych z preformy bazowej o skokowym profilu współczynnika załamania. Mozaikowy wzór zaprojektowany dla włókna pokazany na fig. 2e został bardzo dobrze zachowany w rzeczywistej strukturze wyciągniętej subpreformy pokazanej na fig. 2f. Średnica pojedynczych prętów w subpreformie o przekątnej 1,5 mm wynosi około 28 μm.

W tabeli 2 poniżej przedstawiono parametry geometryczne wytworzonych włókien.

Tabela 2

Włókno	m [μm]	M [μm]	η	ϕ [μm]
#1	6,51	7,82	1,20	100,2
#2	7,15	7,72	1,08	135,8
#3	7,44	7,88	1,06	103,7
#4	7,88	9,85	1,25	125,7
#5	8,41	9,72	1,16	124,4

Średnicę płaszcza oznaczono jako ϕ. Rdzenie otrzymanych włókien zwymiarowano za pomocą osi wielkiej (M) i osi małej (m) elipsy oraz eliptyczności (η), tak, jak w przypadku włókien o rdzeniu eliptycznym. Włókna #2 i #3 mają rdzenie najbardziej zbliżone kształtem do okręgu, co prowadzi do

najmniejszej eliptyczności. Włókna #1, #4 i #5 stały się eliptyczne podczas wyciągania, co może w konsekwencji wywoływać resztkową dwójłomność włókien. Eliptyczność otrzymanych włókien nie przekracza wartości 1,25, zatem dwójłomność jest bardzo mała i w związku z tym pomijalna.

Na fig. 3a i b przedstawiono obraz SEM przekroju włókna #4 o promieniu rdzenia około 4 μm i średnicy płaszcza 125,7 μm. Średnice poszczególnych prętów w rdzeniu tego włókna wynoszą około 190 nm. Obszary ciemne na fig. 3b odpowiadają czystemu szkłu krzemionkowemu, zaś obszary jasne – prętom ze szkła krzemionkowego domieszkowanym Ge.

Charakteryzacja włókien nGRIN

W pierwszym etapie przeprowadzono analizę modową za pomocą obserwacji rozkładu pola modów. Włókno #2 jest co najmniej dwumodowe dla długości fali 0,85 μm, natomiast jednomodowe co najmniej od 1,064 μm. Światłowód #3 do 1,064 μm jest jeszcze dwumodowy i jednomodowy co najmniej od 1,310 μm (Fig. 4 (a–b)). Ta metoda nie jest krytyczna dla oszacowania długości fali odcięcia (λ_{odc}). W konsekwencji wartość λ_{odc} znajduje się pomiędzy tymi długościami fali. Przeprowadzono zatem dodatkowy pomiar dla włókna #2. Mody wyższego rzędu (HOM, ang. higher order mode) zostały odfiltrowane z widma wyjściowego przez zginanie (włókno było chronione powłoką polimerową). Straty generowane w zgiętym włóknie zaznaczono na fig. 4c. Początkowo włókno proste (seria ciągła] wygięto z promieniem R_1 ~ 2 cm (seria kreskowana)) i z mniejszym promieniem R_2 ~ 1 cm (seria kropkowana). Długofalowa strona piku tłumienia znajdująca się w okolicy mniejszych długości fali odpowiadała długości fali odcięcia dla modu LP_{11} i była równa λ_{LP11} = 0,95 μm. Podobnie jak w przypadku włókna krzemionkowego ze skokową zmianą współczynnika załamania, takiego jak np. SMF-28, wygiętego z tak małym promieniem (~ 1 cm), zginanie ma negatywny wpływ również na mod podstawowy (FM, ang. fundamental mode), co można zaobserwować dla krawędzi długofalowej badanego zakresu widmowego, gdzie straty rosną bardzo szybko. Transmisję dla włókien prostych i zgiętych mierzono z wykorzystaniem szerokopasmowego (600–1700 nm) analizatora widma optycznego. W następnym etapie określono aperturę numeryczną NA dla długości fali 1,55 μm, stosując standardową metodę i dla wszystkich włókien wynosi ona 0,11 ± 0,01.

Na fig. 4 zilustrowano pomiary długości fali odcięcia i tłumienności. Rozkład natężenia modów dla wszystkich włókien zarejestrowano stosując dwie kamery CCD: z czujnikiem krzemowym i z dodatkową warstwą fosforową do badania modu w bliskiej podczerwieni dla 1,55 μm. Na fig. 4a–b pokazano rozkład pola modowego zarejestrowany kamerą CCD przy różnych długościach fali i dla różnych warunków sprzęgania, odpowiednio dla włókna #2 i #3. Na fig. 4c przedstawiono charakterystykę strat na skutek zginania pokazującą długość fali odcięcia dla modu LP_{11} we włóknie #2. Na fig. 4d pokazano moc optyczną na wyjściu długiego (seria ciągła) i krótkiego (seria kreskowana) fragmentu włókna #3, zaś na fig. 4e – wyliczoną na podstawie fig. 4d tłumienność w szerokim zakresie widmowym.

Tłumienność mierzono stosując typową metodę odcięcia i w rozważanym zakresie widmowym od 0,7 to 1,7 μm było ono na tym samym poziomie 0,05 dB/m dla wszystkich włókien. Tłumienność jest jedynie wyższa przy charakterystycznym piku absorpcji na jonach OH, zlokalizowanym przy długości fali około 1,4 μm, gdzie jego wartość wynosi 0,5 dB/m (por. fig. 4e). Uzyskana tłumienność jest niska, jeśli uwzględnić laboratoryjne warunki wyciągania włókien i standardową jakość prętów szklanych zastosowanych do wytworzenia włókien. Pokazuje to również, że procedura składania nie wprowadziła żadnych poważnych zanieczyszczeń do światłowodu.

Zbadano również dyspersję D otrzymanych włókien. Pomiary przeprowadzono za pomocą interferometru Macha-Zehndera z pełną kompensacją elementów optycznych w obu ramionach. Przeprowadzono również numeryczną analizę dyspersji wytworzonych włókien. Struktury zostały zaimplementowane do modelu numerycznego przy założeniu wzoru subpreformy (fig. 2b) i wielkości rdzenia włókien końcowych (tabela 2). Przeprowadzono również symulacje dla przykładowych włókien o parabolicznym rozkładzie współczynnika załamania i sześciokątnym kształcie rdzenia o przekątnej rdzenia odpowiadającej średniej wielkości rdzeni rzeczywistych włókien. Eliptyczność rdzeni zaniedbano. Zmierzoną i obliczoną charakterystykę dyspersji przedstawiono przykładowo dla jednego światłowodu #4 na Fig. 5a. Z krzywych eksperymentalnych zmierzonych dla większości włókien wyznaczono długość fali, dla której występuje tzw. zero dyspersji (ZDW, ang. zero dispersion wavelength) i obliczono jakie wartości przyjmują krzywe dyspersji wyznaczone numerycznie dla łych długości fal. Różnice te przedstawiono na fig. 5b dla światłowodów #1, #3, #4 i #5.

Parametry D obliczone dla rzeczywistych struktur oznaczono serią kropkowaną o nazwie "nGRIN" na Fig. 5a. Wyniki eksperymentalne zaznaczono jako serie ciągłe. Obliczono również rozkłady paraboliczne (serie kreskowane) przy założeniu uśrednionej wielkości rdzeni odpowiednio dla każdego włókna.

Nanostrukturyzacja z arbitralnym, parabolicznym rozkładem współczynnika załamania z rozmiarem inkluzji wynoszącym λ/3 prowadzi do rozkładu współczynnika załamania bardzo zbliżonym do kształtu parabolicznego, co potwierdzono numerycznie dla badanych włókien. Wyniki eksperymentalne pozwalają zweryfikować, że kształt dyspersji jest zgodny z wynikami symulacji numerycznych. Niewielkie rozbieżności parametru dyspersji D, nieprzekraczające ± 3.5 ps x nm^{-1} km^{-1}, można przypisać niepewności pomiarowej (fig. 5b). Wartości ΔD odpowiadają niedopasowaniu między zmierzonymi i wyliczonymi długościami fali o zerowej dyspersji. Jeśli uwzględnić różnice dyspersji pomiędzy rozkładem eksperymentalnym i idealnym (parabolicznym), wartość ΔD jest mniejsza od ± 1,5 ps x nm^{-1} km^{-1}. Podsumowując, uzyskana doświadczalnie charakterystyka dyspersji jest zgodna z przewidywaną. Potwierdza, że proces wyciągania jest dobrze kontrolowany, a metoda umożliwia wytwarzanie włókien o przewidywalnych parametrach.

W poniższej tabeli 3 przedstawiono porównanie parametrów światłowodu według wynalazku (z nanostrukturyzowanym rdzeniem nGRIN) i typowego światłowodu telekomunikacyjnego SMF-28.

Tabela 3

Parametr	nGRIN	SMF-28
Profil współczynnika załamania	Gradientowy: paraboliczny	skokowy
Średnica rdzenia [μm]	7.6 (uśredniony)	8.2
Średnica płaszcza [μm]	125	125
Apertura numeryczna NA	0.11	0.14
Średnica pola modu dla1550 nm [μm]	9.8	10.4
Długość fali odcięcia [nm]	≤1100	1260
ZDW [nm]	1325÷1347	1304÷1324
Tłumienność dla 1550 nm [dB/m]	≤0.05	≤0.00018

Jak wynika z danych przedstawionych tabeli powyżej, parametry są w większości porównywalne. Włókno nGRIN wykazuje największą rozbieżność (dwa rzędy gorzej) dla tłumienności, co należy przypisać laboratoryjnym warunkom wytwarzania i niższej czystości użytych materiałów w porównaniu do światłowodu komercyjnego SMF-28. Badany światłowód nGRIN ma nieco mniejszy rdzeń (ale może mieć dokładnie taki sam jak SMF), co proporcjonalnie przekłada się na nieco dłuższą długość fali, dla której występuje zero dyspersji (ZDW). Zasadniczą różnicę włókna nGRIN względem SMF-28 stanowi gradientowy – paraboliczny profil współczynnika załamania oraz znaczące obniżenie wartości długości fali odcięcia, które przypisuje się możliwości wpływania na charakterystykę modową światłowodu poprzez nanostrukturyzację. Dzięki mniejszej wartości długości fali odcięcia światłowód jest jednomodowy dla szerszego zakresu długości fal.

Charakteryzacja siatki Bragga

We włóknie z nanostrukturyzowanym rdzeniem (włókno #4 o parametrach geometrycznych podanych w tabeli 2 powyżej) wytworzono metodą maski fazowej siatkę Bragga, a następnie scharakteryzowano jej właściwości.

(a) Układ pomiarowy do charakteryzacji siatki Bragga

Włókno z wytworzoną siatką Bragga (BG) umieszczono w układzie pomiarowym pokazanym na fig. 6. Światło z szerokopasmowego źródła supercontinuum (SC) wprowadzono do włókna przez obiektyw mikroskopowy o powiększeniu 20x i wyprowadzono przez obiektyw mikroskopowy o powiększeniu 40x. Zwierciadło (M) umożliwiało pomiar rozkładu pola modu na kamerze CCD. Po jego usunięciu mierzono natężenie światła na wyjściu światłowodu. W tym celu światło skupiono na wejściu jednomodowego kabla światłowodowego podłączonego do optycznego analizatora widma (OSA, ang. optical spectrum analyzer). W celu charakteryzacji siatek Bragga pod kątem czułości temperaturowej włókno z centralnie zlokalizowaną siatką BG umieszczono na module Peltiera celem wprowadzania kontrolowanej

zmiany temperatury w zakresie od 13,5°C do 100°C i monitorowano przesunięcie piku braggowskiego w widmie transmisyjnym rejestrowanym na optycznym analizatorze widma.

(b) Widmo transmisyjne siatki Bragga

Charakterystykę spektralną transmisyjną zmierzono dla wszystkich wytworzonych siatek BG. Jak pokazano na fig. 7 i 8 każda z czterech wytworzonych siatek BG wykazywała centralną długość fali piku Bragga odpowiednio dla λ_{B0} = 1061,5 nm, λ_{B1} = 1553,1 nm, λ_{B2} = 1552,6 nm oraz λ_{B3} = 1535,5 nm. Wartości szerokości widmowej $\Delta\lambda_{FWHM}$ zmieniały się w zakresie od 250 do 900 pm, zaś minimum transmisji odpowiadające długości fali Bragga P_B zmieniało się w zakresie od 14 do 34 dB.

(c) Zależne od temperatury przesuniecie długości fali Bragga dla BG przy λ_B = 1061,5 nm

Na fig. 9 przedstawiono piki Bragga zarejestrowane dla ogrzewanego włókna, przy czym na fig. 9a pokazano przemieszczanie się piku w widmie transmisyjnym, a na fig. 9b – przesunięcie centralnej długości fali oszacowane dla włókna ogrzanego i schłodzonego. Czułość siatki na temperaturę wynosi $d\lambda_{B0}/dT$ = 10,8 ± 0,1 pm/K lub po unormowaniu do długości fali 10,2 K^{-1}. Pik braggowski wraz ze wzrostem temperatury przesuwał się w stronę fal dłuższych.

(d) Zależne od temperatury przesunięcie długości fali Bragga dla BG przy λ_{B2} = 1552,6 nm

Na fig. 10 przedstawiono piki Bragga zarejestrowane dla ogrzewanego włókna, przy czym na fig. 10a pokazano przemieszczanie się piku w widmie transmisyjnym, a na fig. 10b – przesunięcie centralnej długości fali oszacowane dla włókna ogrzanego i schłodzonego. Czułość siatki na temperaturę wynosi $d\lambda_{B0}/dT$ = 16,2 ± 0,3 pm/K lub po unormowaniu do długości fali 10,4 K^{-1}. Pik braggowski wraz ze wzrostem temperatury przesuwał się w stronę fal dłuższych.

Efektywność modulacji współczynnika załamania zależna od rozkładu domieszki w światłowodzie z efektywnie skokową zmianą współczynnika załamania światła

Rozpatrzono trzy światłowody, tj. trzy rozkłady prętów domieszkowanych GeO_2 i niedomieszkowanych w rdzeniu światłowodu z efektywnie skokowym profilem współczynnika załamania. We włóknie W1 domieszka GeO_2 rozłożona jest równomiernie w całym przekroju rdzenia w postaci 100% upakowania prętowo koncentracji germanu 3%mol. Dla włókna W2 38% prętów w całym przekroju rdzenia zastąpiono prętami z czystej krzemionki, natomiast pozostałe 62% prętów zastąpiono prętami z większą koncentracją domieszki równą 4,9% mol. W przypadku włókna W3 64% przekroju rdzenia stanowią pręty z czystej krzemionki, a 36% pręty ze zwiększoną koncentracją germanu 8,5% mol. We wszystkich włóknach jest taka sama średnia wartość koncentracji germanu w rdzeniu równa 3% mol i wszystkie mają dla transmitowanego światła skokowy profil współczynnika załamania z maksymalną wartością odpowiadającą krzemionce domieszkowanej germanem w ilości 3% mol. W pracy [J. Albert, B. Malo, K. O. Hill, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and S. Thériault, "Comparison of one-photon and two-photon effects in the photosensitivity of germanium-doped silica optical fibers exposed to intense ArF excimer laser pulses," Appl. Phys. Lett 67, 3529 (1995)] pokazano, że fotoindukowaną efektywność modulacji współczynnika załamania w jednostce czasu zależy od koncentracji germanu w rdzeniu światłowodu i gęstości energii lasera. Na fig. 11 pokazano obliczone charakterystyki pokazujące efektywność modulacji współczynnika załamania w funkcji gęstości energii wiązki laserowej dla światłowodów stepindex z koncentracją domieszki w zakresie od 3 do 9% mol, zgodnie z wyżej wymienionym artykułem. Pokazano również, jaką modulację współczynnika załamania wzdłuż włókna uzyskuje się w trzech typach światłowodów omówionych wyżej, fig. 12 dla tej samej gęstości mocy. Widać, że dla włókna W1, które to jest tożsame z typowym światłowodem telekomunikacyjnym pod względem poziomu domieszkowania rdzenia oraz profilu współczynnika załamania, modulacja ta jest najmniejsza, podczas gdy dla światłowodów pasywnych fotoczułych według wynalazku, modulacja jest większa i rośnie nieliniowo wraz ze wzrostem koncentracji domieszki. Pokazano ponadto jak w tych trzech typach światłowodów efektywność modulacji współczynnika załamania zależy od liczby okresów siatki Bragga, fig. 13. Zatem nanostrukturyzacja rdzenia pozwala na profilowanie fotoczułości włókna przy zachowaniu takich samych właściwości propagacyjnych.

Zastrzeżenia patentowe

1. Światłowód z kształtowanym profilem fotoczułości, przystosowany do prowadzenia i generowania promieniowania o długości fali λ oraz do indukowania modulacji współczynnika załamania wyposażony w płaszcz oraz nanostrukturyzowany rdzeń złożony z podłużnych elementów szklanych zorientowanych wzdłuż światłowodu i tworzących zwartą wiązkę, przy czym wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od długości fali λ, zaś rdzeń złożony jest z co najmniej dwóch rodzajów elementów podłużnych różniących się współczynnikiem załamania, **znamienny tym**, że wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od 1/3 długości fali λ, a elementy podłużne pierwszego rodzaju są wykonane ze szkła krzemionkowego domieszkowanego GeO_2, zaś elementy podłużne drugiego rodzaju są wykonane z czystej krzemionki, przy czym na elementach podłużnych pierwszego rodzaju naniesiona jest struktura o fotoindukowanej modulacji współczynnika załamania, korzystnie wybrana z grupy obejmującej siatkę Bragga i siatkę długookresową.
2. Światłowód według zastrz. 1, **znamienny tym**, że zawiera elementy podłużne trzeciego rodzaju wykonane ze szkła zawierającego przynajmniej jedną domieszkę aktywną.
3. Światłowód według zastrz. 2, **znamienny tym**, że domieszka aktywna jest wybrana spośród erbu, prazeodymu, iterbu, neodymu, tulu, holmu oraz innych.
4. Światłowód według jednego z zastrz. 1–3, **znamienny tym**, że współczynnik załamania elementów podłużnych jednego rodzaju ma wartość mniejszą lub równą najniższej wartości charakterystyki współczynnika załamania w przekroju poprzecznym rdzenia, a współczynnik załamania elementów podłużnych innego rodzaju ma wartość większą lub równą najwyższej wartości charakterystyki współczynnika załamania w przekroju poprzecznym rdzenia.
5. Światłowód według jednego z zastrz. 2–4, **znamienny tym**, że posiada płaszcz fotoniczny.
6. Światłowód według jednego z zastrz. 1–5, **znamienny tym**, że jest światłowodem dwójłomnym, przy czym dwójłomność uzyskuje się poprzez anizotropię materiału rdzenia lub anizotropię geometrii rdzenia i/lub płaszcza.
7. Światłowód według zastrz. 1, **znamienny tym**, że jest włóknem kilkumodowym.
8. Sposób wytwarzania światłowodu określonego w dowolnym z zastrz. 1–7 o rdzeniu przystosowanym do wytwarzania struktury o fotoindukowanej modulacji współczynnika załamania, **znamienny tym**, że wiązką lasera UV naświetla się światłowód przystosowany do prowadzenia i generowania promieniowania o długości fali λ, wyposażony w płaszcz oraz nanostrukturyzowany rdzeń złożony z podłużnych elementów szklanych zorientowanych wzdłuż światłowodu i tworzących zwartą wiązkę, w którym wymiary poprzeczne elementów podłużnych są mniejsze od 1/3 długości fali λ, zaś rdzeń złożony jest z co najmniej dwóch rodzajów elementów podłużnych, różniących się współczynnikiem załamania, przy czym elementy podłużne pierwszego rodzaju są wykonane ze szkła domieszkowanego GeO_2, a elementy podłużne drugiego rodzaju są wykonane z czystej krzemionki, przy czym prowadzi się naświetlanie boczne laserem pracującym w trybie ciągłym lub impulsowym.
9. Sposób według zastrz. 8, **znamienny tym**, że naświetlanie światłowodu wiązką lasera UV prowadzi się metodą interferometryczną, metodą z wykorzystaniem maski fazowej, metodą zapisu punkt po punkcie, lub metodą maski amplitudowej.

Rysunki

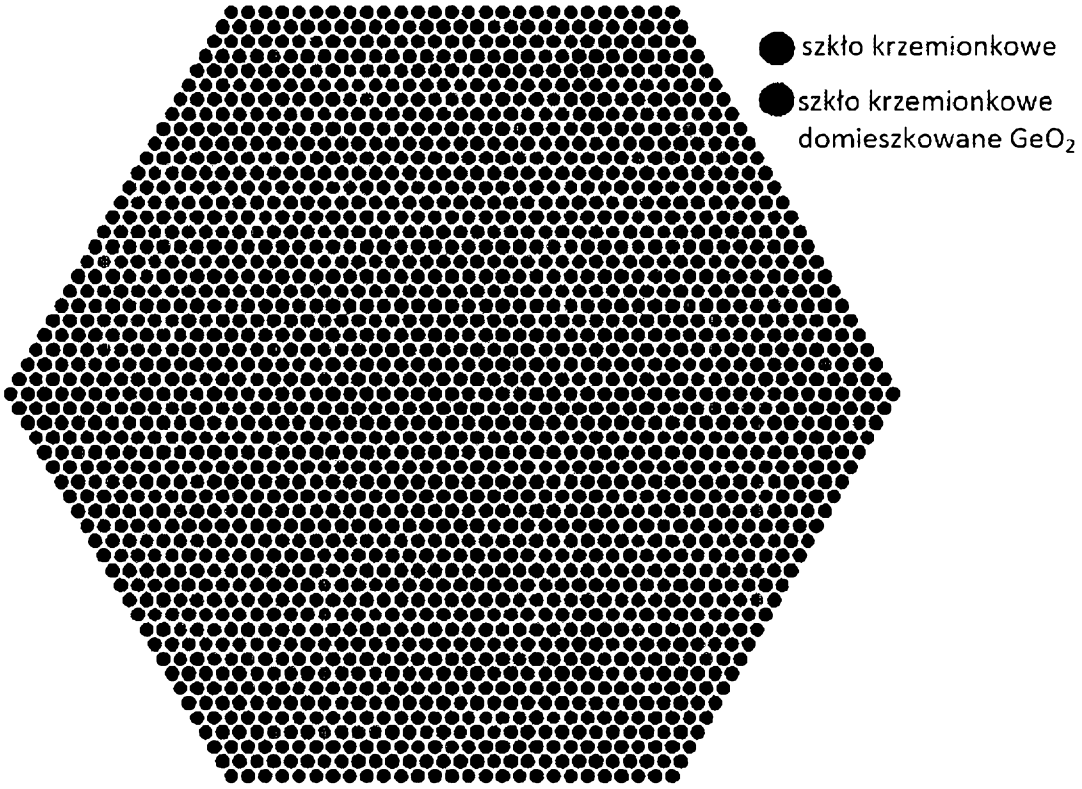


Fig. 1

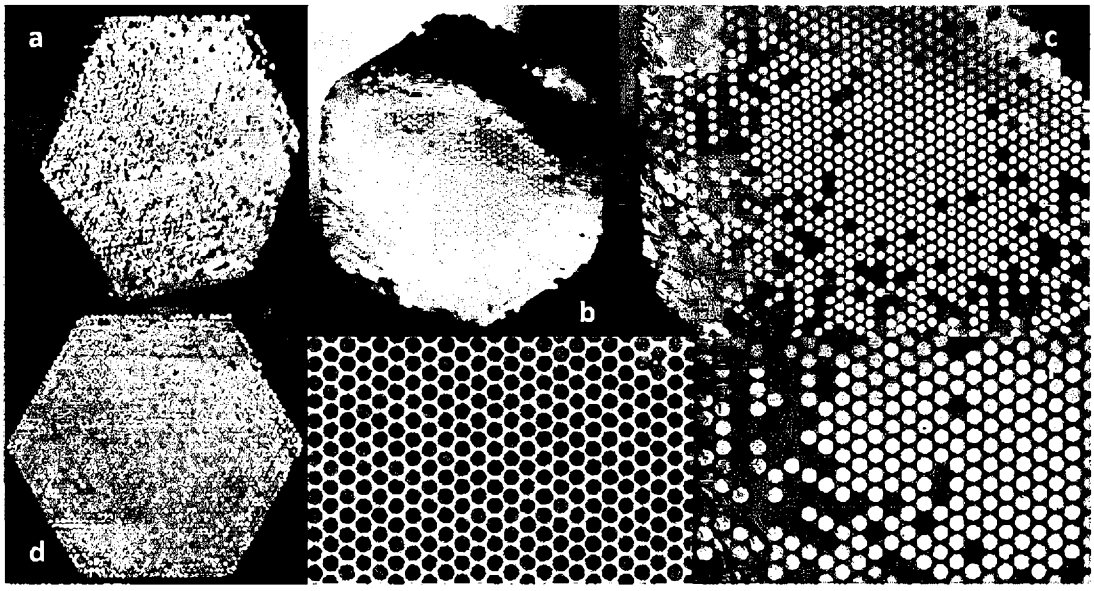


Fig. 2

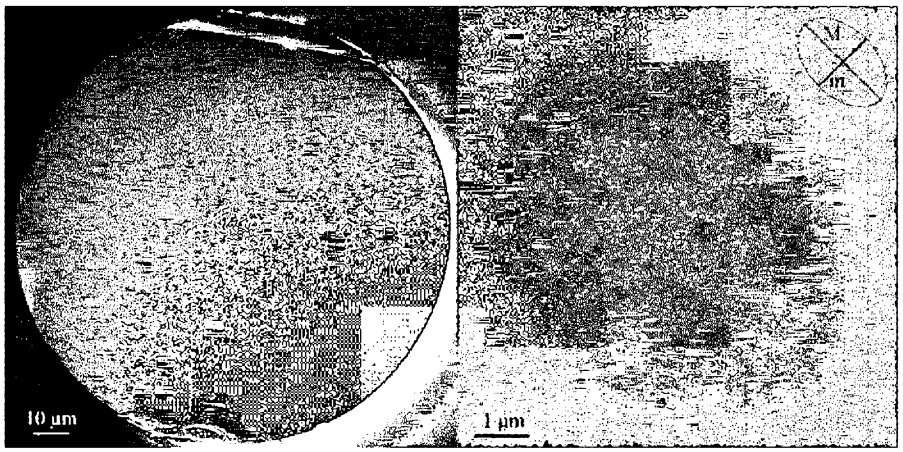

10 µm
1 µm

Fig. 3

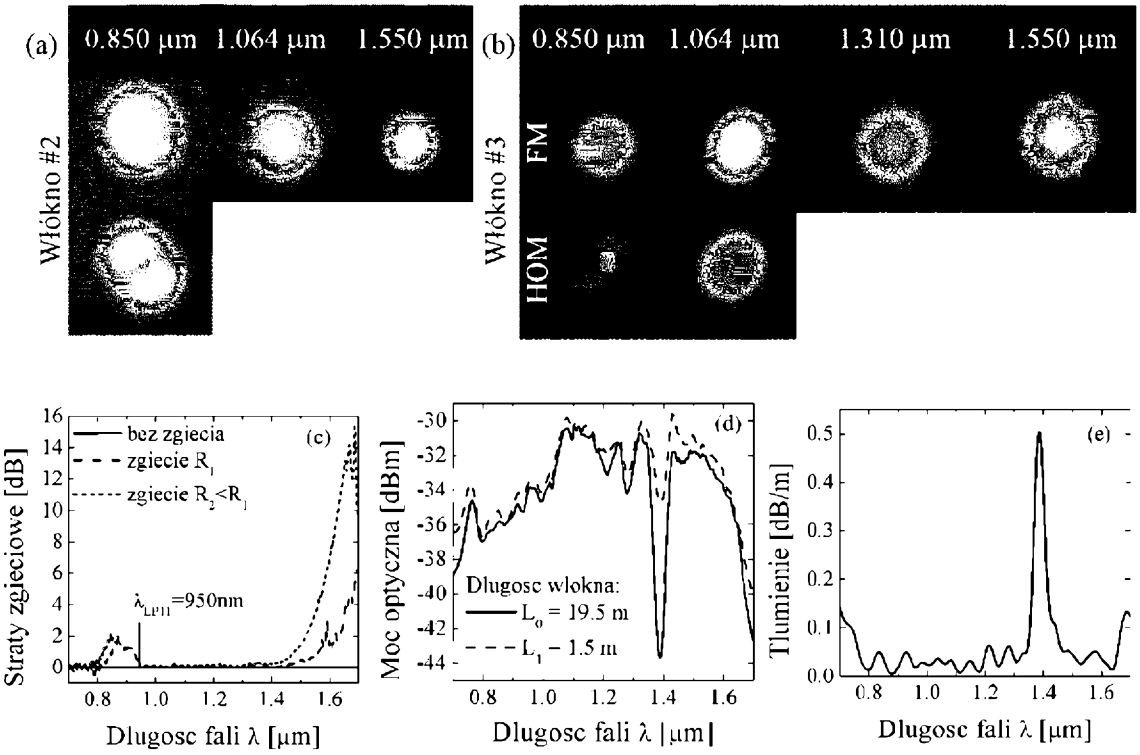

(a)
0.850 µm
1.064 µm
1.550 µm
Włókno #2
(b)
0.850 µm
1.064 µm
1.310 µm
1.550 µm
Włókno #3
FM
HOM
Straty zgieciowe [dB]
bez zgiecia
zgiecie R1
zgiecie R2<R1
(c)
λLP11=950nm
Dlugosc fali λ [µm]
Moc optyczna [dBm]
(d)
Dlugosc wlokna:
L0 = 19.5 m
L1 = 1.5 m
Dlugosc fali λ [µm]
Tlumienie [dB/m]
(e)
Dlugosc fali λ [µm]

Fig. 4

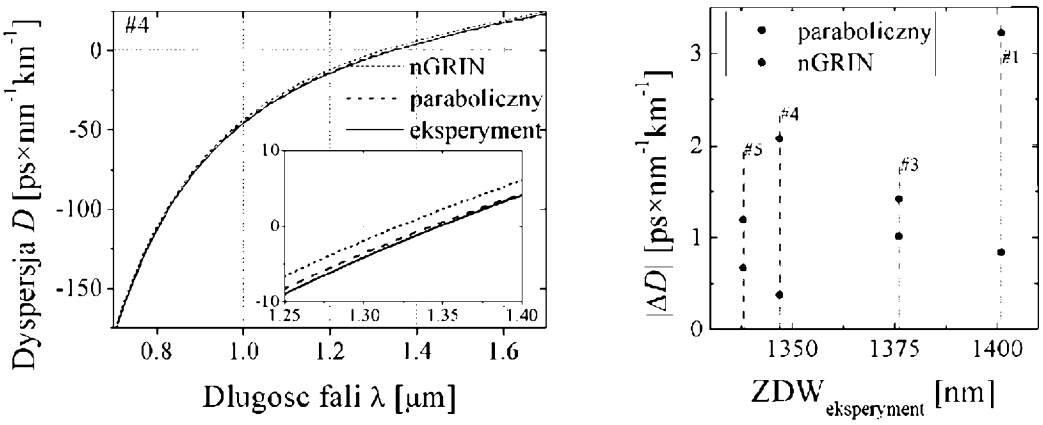


Fig. 5

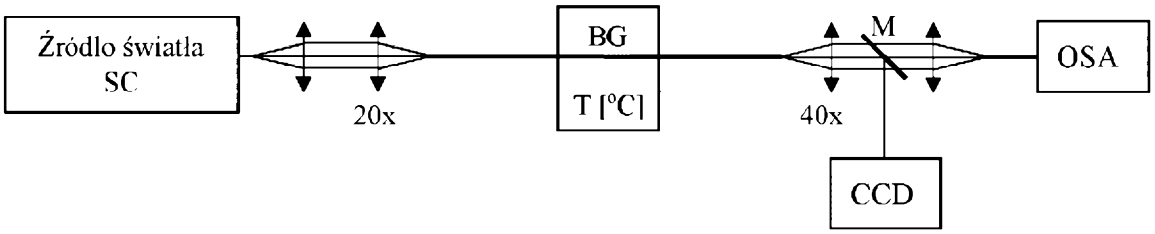


Fig. 6

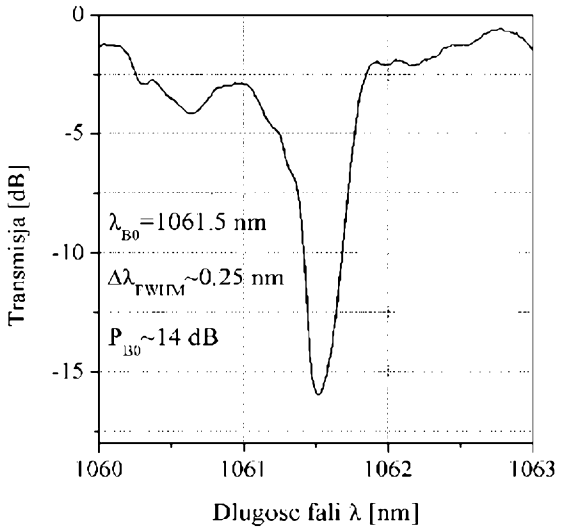


Fig. 7

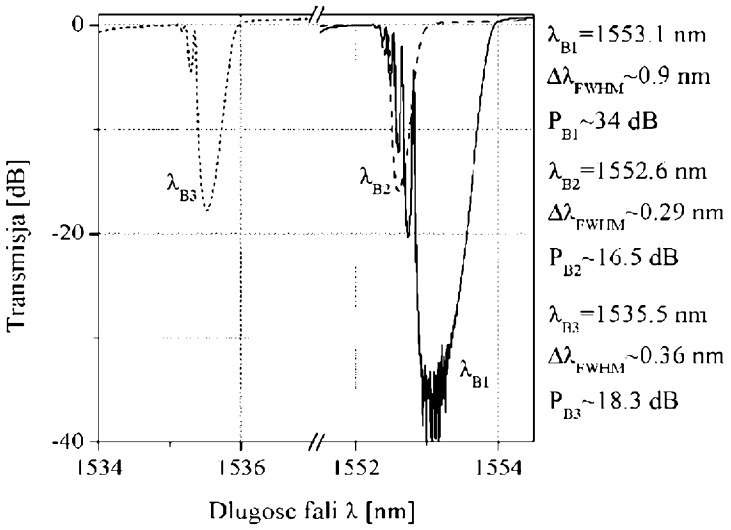


Fig. 8

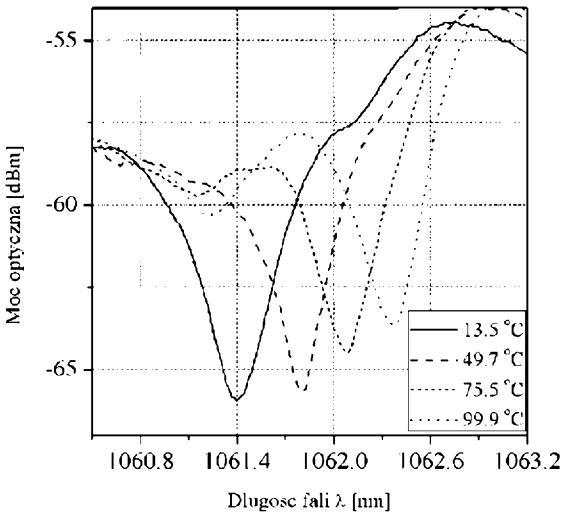


Fig. 9a

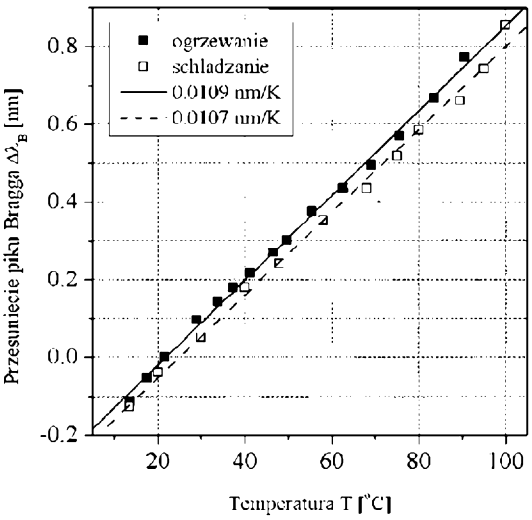


Fig. 9b

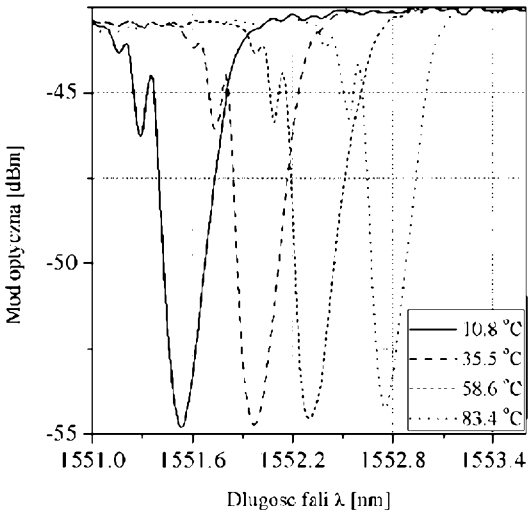


Fig. 10a

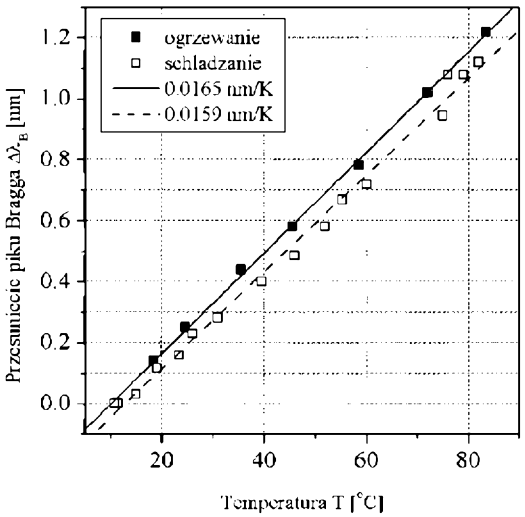


Fig. 10b

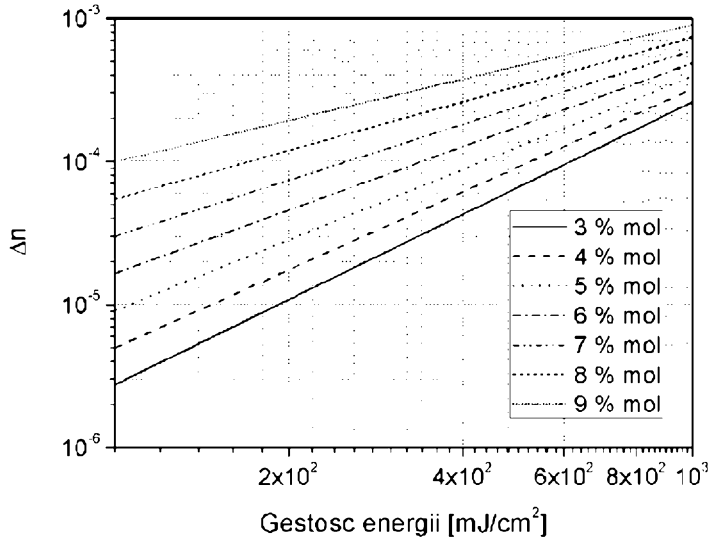


Fig. 11

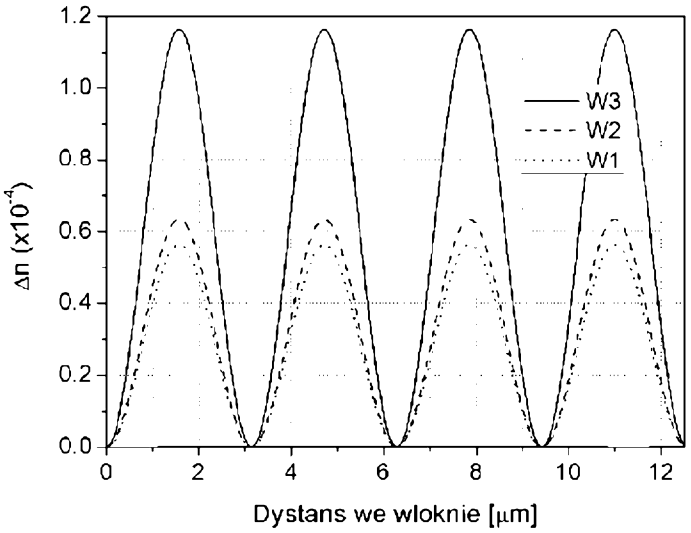

1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Δn (x10-4)
0
2
4
6
8
10
12
Dystans we wloknie [μm]
W3
W2
W1

Fig. 12

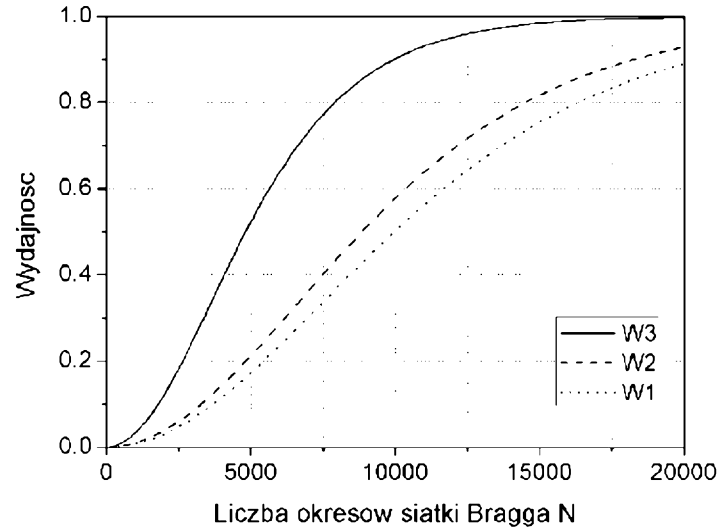

1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Wydajnosc
0
5000
10000
15000
20000
Liczba okresow siatki Bragga N
W3
W2
W1

Fig. 13