

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **227732**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **406372**

(51) Int.Cl.
G02B 6/02 (2006.01)
G02B 6/122 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **04.12.2013**

(54) **Mikrostrukturalny światłowód z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym współczynniku załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
08.06.2015 BUP 12/15

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
31.01.2018 WUP 01/18

(73) Uprawniony z patentu:

**POLSKIE CENTRUM FOTONIKI
I ŚWIATŁOWODÓW, Rogoźnica, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

ZBIGNIEW HOŁDYŃSKI, Żytkiejmy, PL
ŁUKASZ SZOSTKIEWICZ, Toruń, PL
TOMASZ NASIŁOWSKI, Warszawa, PL
KATARZYNA JOANNA PAWLIK, Warszawa, PL
MAREK ADAM NAPIERAŁA, Wrocław, PL
TADEUSZ TENDERENDA, Warszawa, PL
MICHAŁ MURAWSKI, Warszawa, PL
MICHAŁ SZYMAŃSKI, Warszawa, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Alicja Rumpel

PL 227732 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest mikrostrukturalny światłowód z selektywnie powiększonymi przeszczeniami o zmniejszonym współczynniku załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń.

Efektywne źródło szerokospektralne jest poszukiwanym produktem ze względu na możliwość szerokiego wykorzystania na wielu płaszczyznach nauki i technologii, w tym np. mikroskopii, spektroskopii, metrologii i innych. Ponadto, posiadając szerokie spektrum światła, możliwe jest, stosując specjalne filtry optyczne, wyizolowanie z niego długości fali niemożliwych do uzyskanie przez konwencjonalne lasery. Możliwość generacji szerokospektralnych źródeł światła odbywa się w oparciu o wystąpienie szeregu zjawisk nieliniowych, które w połączeniu skutkują widmem promieniowania obejmującym szeroki zakres długości fali. Wśród szczególnie istotnych efektów nieliniowych wyróżnić należy zjawiska: samomodulacji fazy (ang. self phase modulation), mieszania czterech fal (ang. four wave mixing), skośnej modulacji fazy (ang. cross phase modulation), niestabilności modulacji fazy (ang. modulation instability), wymuszone rozpraszanie Ramana (ang. stimulated Raman scattering) i inne. Zjawisko poszerzenia impulsu światła zachodzące w wyniku wystąpienia kombinacji tych efektów skutkuje generacją supercontinuum (ang. supercontinuum lub w skrócie SC). W wyniku generacji supercontinuum stosując impuls światła o wąskiej szerokości spektralnej otrzymujemy szeroki zakres długości fali, za co odpowiedzialne są wspomniane efekty nieliniowe i oddziaływanie między nimi. Medium, w których zachodzą zjawiska nieliniowe może być np. szkło, światłowód, a w szczególności światłowód mikrostrukturalny (ang. microstructured optical fiber, w skrócie MOF).

Przed wynalezieniem światłowodów mikrostrukturalnych, za pomocą których możliwa jest generacja supercontinuum, efekt ten uzyskiwano w szklach i światłowodach. Ten sposób generacji supercontinuum wymagał jednak stosowania długich odcinków światłowodów, przewężeń światłowodów i laserów o ekstremalnych wartościach mocy szczytowej, np. femtosekundowego lasera tytanowo-szafirowego. Pomimo to światłowody klasyczne nie dają możliwości zmian (adaptacji, dostosowania) ich charakterystyki dyspersji chromatycznej oraz wyższych rzędów dyspersji w tak szerokim zakresie, jak jest to możliwe z wykorzystaniem światłowodów MOF, aby uzyskać oczekiwane spektrum światłowodowego źródła światła, jakim jest np. supercontinuum. Dodatkowo niezwykle szeroki zakres możliwych zmian charakterystyki dyspersji chromatycznej oraz wyższych rzędów dyspersji otwiera szansę inżynierii efektów nieliniowych i wykorzystywania ich do pożądanых zastosowań. Jednym z przykładów takich efektów może być generacja fotonów splątanych i wykorzystywanie ich do kryptografii kwantowej. Inne zastosowania to np. generacja przestrajalnych włóknowych źródeł światła itd.

Znane z literatury światłowody mikrostrukturalne charakteryzują się występowaniem przestrzeni powietrznych, nie występujących tradycyjnie w światłowodach transmisyjnych. Ze względu na fizyczne możliwości koncentracji światła w małym rdzeniu otoczonym przestrzeniami powietrznymi możliwe są do osiągnięcia efekty i parametry nie występujące w konwencjonalnych światłowodach. Z tego powodu światłowody mikrostrukturalne znajdują zastosowanie w: transmisji światłowodowej, laserach światłowodowych, przyrządach nieliniowych, transmisji wysokich mocy, różnorodnych czujnikach, przestrajalnych elementach światłowodowych (np. przełącznikach, filtrach) i innych.

Światłowody mikrostrukturalne do generacji efektów nieliniowych znane z literatury charakteryzują się bardzo małym rdzeniem (zazwyczaj poniżej 2 μm). W przypadku takiej minimalizacji wymiarów światło zostaje uwięzione na powierzchni ok. dwa rzędy wielkości mniejszej niż w przypadku konwencjonalnych światłowodów mikrostrukturalnych. Parametrem określającym ilościowo stopień uwięzienia światła na danej powierzchni jest koncentracja pola modu. Im większa koncentracja pola modu, tym mniejsze moce lasera pompującego są potrzebne do zaobserwowania efektów nieliniowych na pożądaną skalę, tak jak np. generacja supercontinuum. Parametrem światłowodu umożliwiającym porównywanie jego własności nieliniowych jest parametr nieliniowości, który wyraża się przez stosunek nieliniowego współczynnika załamania światła materiału, z którego jest wykonany światłowód, do pola modu propagowanego w tym światłowodzie. Dodatkowo, w celu zwiększenia parametru nieliniowości można stosować specjalne rodzaje szkieł, które charakteryzują się wysoką nieliniowością, np. szkła tellurowe czy chalkogenidowe. Kombinacja małego rdzenia z wysokim współczynnikiem nieliniowości samego materiału pozwala uzyskać ekstremalne wartości nieliniowości. Stosowanie szkieł innych niż krzemionkowe jest jednak kosztowne i problematyczne. Ponadto, produkcja światłowodu o zminimalizowanym rdzeniu niesie za sobą poważne trudnienia technologiczne, a także ryzyko znacznego odstępstwa od projektowanych wymiarów a w konsekwencji właściwości dyspersyjnych,

które uniemożliwiają generację efektów nieliniowych. W wielu znanych światłowodach mikrostrukturalnych w związku z minimalizacją rdzenia występuje jego niekorzystna izolacja od materiału płaszczka światłowodowego, taki rdzeń nazywany jest w literaturze zawieszonym rdzeniem (ang. suspended core).

Przed wynalezieniem światłowodów mikrostrukturalnych do generacji efektów nieliniowych ze zmniejszonym rdzeniem, koncentracja pola modu była możliwa jedynie w przewężkach światłowodowych (ang. fibre tapers). W chwili obecnej metody przewężania stosuje się również w światłowodach mikrostrukturalnych w celu uzyskania szerokospektralnych widm. Przewężanie światłowodu mikrostrukturalnego w sposób zapewniający uzyskanie pożądaných zmian geometrii z odpowiednią dokładnością stwarza niezwykle delikatny i niestabilny mechanicznie element niezwykle trudny w praktycznych zastosowaniach, jednocześnie nie dając często niezbędnej kontroli charakterystyki dyspersji chromatycznej. Ponadto przewężanie światłowodu nie daje kontroli charakterystyki modowej propagowanego promieniowania (np. zaburza jednomodowość pracy) a tym samym wpływa niekorzystnie na stabilność widma supercontinuum.

Przykładem może być światłowód według US20130182999, w którym przewężone zostają odcinki mikrostrukturalnego światłowodu a przewężenie jest warunkiem generacji supercontinuum. Światłowody mikrostrukturalne mogą być natomiast wytwarzane w dowolnej długości i średnicach odpowiadających standardowym światłowodom, np. SMF-28e+ firmy Corning jako włókna spełniające rekomendację G.652.

W celu generacji supercontinuum, uzyskanie wysokiego parametru nieliniowości we włóknie jest warunkiem koniecznym, ale niewystarczającym. Równorzędne znaczenie ma kontrola parametru dyspersji i właściwości struktury umożliwiające jednomodowość pracy światłowodu. Oba te aspekty – kontrola dyspersji i utrzymanie jednomodowości struktury zostały równolegle rozwinięte wraz z pojawieniem się światłowodów mikrostrukturalnych.

Dyspersja światłowodu określa zmiany prędkości propagującej się fali elektromagnetycznej w zależności od jej częstotliwości (długości fali) i może przyjmować wartości ujemne jak i dodatnie. Gdy dyspersja przyjmuje wartości dodatnie, nazywana jest dyspersją anomalną, natomiast gdy przyjmuje wartości ujemne mówi się o dyspersji normalnej. Jednym z najistotniejszych parametrów charakterystyki dyspersyjnej jest zero dyspersji (w skrócie ZDW – Zero Dispersion Wavelength) czyli długość fali, dla której dyspersja jest zerowa. Bardzo istotne są również nachylenie krzywej dyspersji, szczególnie w zerze dyspersji (ZDW), a mówiąc ogólnie wyższe rzędy dyspersji. Gdy pompowanie (wprowadzenie krótkiego impulsu światła) włókna mikrostrukturalnego odbywa się przy użyciu źródła laserowego generującego impulsy femtosekundowe o długości fali, odpowiadającej zakresowi, w którym światłowód ma dyspersję normalną, możliwe jest uzyskanie bardziej spójnych czasowo widm, w przeciwieństwie do sytuacji, w której pompowanie przypada na długości fali, dla których światłowód ma dyspersję anomalną – wtedy propagacja solitonów zaburza uzyskanie spójnych czasowo widm. Występowanie dyspersji normalnej dla sygnału pompy umożliwia uzyskanie lepszych właściwości koherencyjnych niż gdy sygnałowi pompy odpowiada dyspersja anomalna. Jednocześnie pompowanie w zakresie dyspersji anomalnej w pobliżu zera dyspersji światłowodu umożliwia często uzyskanie szerszego spektralnie widma w porównaniu z pompowaniem w zakresie dyspersji normalnej.

Wymaganie jednomodowości pracy przy generacji supercontinuum jest spowodowane tym, że występowanie modów wyższych rzędów w celu uzyskania takiego spektrum generuje konieczność stosowania większych mocy przy jednomodowym prowadzeniu sygnału. Wynika to z faktu, że wyższe mody generują często mniej efektywnie supercontinuum, ponieważ mają inne charakterystyki dyspersyjne niż mod podstawowy. Ponadto, w sytuacji, gdy w strukturze propaguje się kilka modów, znacznie trudniej jest zaspokoić warunek dopasowania fazowego potrzebny do powstawania zjawisk nieliniowych, co w konsekwencji może powodować niestabilności mocy w rozkładzie spektralnym supercontinuum, czy zmniejszenie efektywnej nieliniowości, czyli przesunięcia granicy od której efektywnie zachodzą zjawiska nieliniowe. Bardzo ważną z punktu widzenia zastosowań jest geometria wiązki światła opuszczającej światłowód, którą często opisuje się parametrem M^2 . Jeśli ten parametr jest możliwie bliski wartości 1 mówimy o wiązce wysokiej jakości i tak się dzieje, gdy w światłowodzie mamy propagację jednomodową. Gdy propagacja, a więc i generacja światła w światłowodzie, nie jest jednomodową parametr M^2 osiąga wartości często znacznie większe od 1 i wtedy znacznie trudniej wykorzystać taką wiązkę światła w różnych układach optycznych.

Jednomodowe, szczególnie dla krótszych długości fali, prowadzenie jest utrudnione w przypadku światłowodów z zawieszonym rdzeniem (czy ogólniej w rdzeniach otoczonych otworami o dużej

powierzchni całkowitej), które występują często w znanych rozwiązaniach światłowodów do generacji efektów nieliniowych. Dzieje się tak, ponieważ otaczający rdzeń płaszcz składa się w istocie z otworów powietrznych rozdzielonych bardzo cienkimi mostkami czy stosunkowo niewielkimi obszarami szklanymi. Taka struktura uniemożliwia ucieczkę modów wyższych rzędów z obszaru rdzenia. Aby struktura złożona z rdzenia i otworów prowadziła jeden mod w możliwie szerokim zakresie spektralnym konieczne jest, żeby parametr wypełnienia (stosunek średnicy otworu powietrznego do odległości pomiędzy otworami) był nie większy od 0,45.

Możliwość sprawnej manipulacji położenia zera dyspersji w stosunku do długości fali pompy (wprowadzanego do światłowodu impulsu światła) oraz właściwego nachylenia krzywej dyspersji i charakterystyki wyższych rzędów dyspersji w pobliżu długości fali pompy, co pozwoli na generację supercontinuum w szerokim zakresie spektralnym czy pożądanym widmie przy jednoczesnym jednomodowym prowadzeniu, jest poszukiwanym w technice rozwiązaniem, które umożliwi znaczną poprawę jakości widm szeroko spektralnych i stworzeniu nowych włóknowych źródeł światła. Jednocześnie, istniejące rozwiązania nie rozwiązują problemu ograniczenia zawieszenia rdzenia, jego trudnych technologicznie do zrealizowania niewielkich wymiarów wynikających z minimalizacji wymiarów dla osiągnięcia wysokiej koncentracji modu i małych tolerancji geometrycznych, które są możliwe w procesie produkcyjnym, żeby zachować projektowane własności włókna. Dodatkowo, takie światłowody jest znacznie trudniej obcinać zachowując niezbędną optycznej jakości powierzchnię.

Dlatego celem wynalazku było zaprojektowanie takiej geometrii włókna, w której nie jest konieczna minimalizacja wymiarów rdzenia w celu generacji supercontinuum do wymiarów w znanych rozwiązaniach, ponieważ taka minimalizacja wymaga kosztownych i skomplikowanych procesów produkcyjnych. Po drugie, celem było zaprojektowanie takiej struktury, w której nie trzeba stymulować wzrostu parametru nieliniowości poprzez zastosowanie materiału o wysokiej nieliniowości, a światłowod może być wykonany z dostępnych, konwencjonalnych materiałów. Po trzecie, celem projektowanego wynalazku było opracowanie struktury światłowodu o takiej geometrii, która będzie wykazywała duże tolerancje geometryczne. Jest to aspekt szczególnie istotny, ponieważ w dostępnych rozwiązaniach, minimalne odstępstwa od geometrii znacznie utrudniają czy często nawet uniemożliwiają zachodzenie pożądanego zjawiska nieliniowego we włóknie. Przy czym odstępstwa od projektowanej geometrii włókna są nieuniknione ze względu na: niedoskonałości technologiczne procesu produkcji włókna (mikrostrukturalne światłowody nieliniowe są najczęściej produkowane dobrze znaną i opisaną metodą stack-and-draw), do których należą różnice w wymiarach kapilar składających się na proformę do wyciągania, niemożliwość dokładnej kontroli temperatury w piecu, przykładanego ciśnienia, szybkości wyciągania światłowodu i innych. Wysoki poziom tolerancji na odchylenia od parametrów geometrycznych założonych w modelu ułatwia kontrolę procesu wytwarzania światłowodu o wymaganych cechach dyspersyjnych oraz pozwalają na utrzymanie stabilności parametrów: charakterystyki dyspersji, jednomodowości oraz parametru nieliniowości.

Jednocześnie podstawowym celem wynalazku było opracowanie światłowodu o strukturze zapewniającej jednomodowe prowadzenie sygnału, zaprojektowanego tak by możliwa była łatwa manipulacja położeniem zera dyspersji, nachyleniem krzywej dyspersji i charakterystyką wyższych rzędów dyspersji w zależności od planowanej do zastosowania długości fali pompy i oczekiwań wobec zakresu długości fali otrzymywanych przez generację supercontinuum, w szczególności celem jest osiągnięcie zera dyspersji w zakresie widzialnych długości fali, co umożliwia generację supercontinuum w zakresie długości fal obejmujących zakresy bliższej podczerwieni (near IR), VIS i UV.

Jednoczesna realizacja pięciu wymienionych wyżej celów nie była osiągnięta w żadnym ze znanych rozwiązań.

Innym, równoległym celem wynalazku było opracowanie takiej geometrii światłowodu, która będzie charakteryzować się wysoką czułością na naprężenia, w szczególności na działanie rozciągania, a także nacisku, zginania, skręcania, ciśnienia lub innych, przy jednoczesnym jednomodowym prowadzeniu sygnału.

Z opisu patentu EP 1582915 znany jest światłowod mikrostrukturalny, w którym współczynnik załamania światła szkła użytego do budowy światłowodu zwiększa się w kierunku promieniowym na zewnątrz od środka rdzenia, przy czym w przekroju współczynnik załamania światła szkła użytego do budowy światłowodu ma kształt zbliżony do odwróconej krzywej Gaussa. Światłowod według tego rozwiązania nie pozwala jednak na jednomodowe prowadzenie sygnału, a wszystkie otwory w strukturze mają jednakowe wymiary. Dodatkowo tego typu geometria światłowodu mikrostrukturalnego nie pozwala na przesunięcie zera dyspersji.

Znany jest także światłowód według opisu US 20050238307, w jakim ujawniono konstrukcję światłowodu, w którym rdzeń otoczony jest płaszczem, w jakim zróżnicowano współczynnik załamania światła w zależności od odległości dzielącej dany punkt płaszcz od rdzenia. Obszary o obniżonym względem rdzenia i płaszcz współczynnikiem załamania światła mają współczynniki załamania światła różniące się między sobą. Ujawniona w tym opisie struktura nie pozwala na osiągnięcie jednomodowego trybu prowadzenia sygnału, a zero dyspersji przypada jedynie na zakres IR.

Znane są także światłowody jakich efektywna praca dotyczy jedynie wybranych długości fal, jak na przykład znany z patentu US 6959135, w którym efektywna powierzchnia optyczna rdzenia jest mniejsza niż 30 mikrometrów, a najefektywniejsza długość fali przy jakiej pracuje światłowód wynosi 1550 nm.

Z kolei z opisu patentowego EP 1148360 znane jest włókno światłowodowe, za pomocą którego możliwa jest kontrola dyspersji. W światłowodzie według tego wynalazku, dedykowanego do zastosowań telekomunikacyjnych, parametr nieliniowości jest ograniczany, ponieważ jego wysoka wartość uniemożliwiałaby zastosowanie światłowodu w telekomunikacji. We włóknie według tego ujawnienia nie zachodzą zjawiska nieliniowe, dopóki dopóty nie są stosowane ekstremalne wartości mocy. Układ przestrzeni o obniżonym względem płaszcz współczynnikiem załamania światła wokół rdzenia charakteryzuje się jednakowymi wymiarami tych przestrzeni. Ponadto występują w nim co najwyżej dwa pierścienie przestrzeni o obniżonym względem płaszcz współczynnikiem załamania światła, co często nie jest wystarczające do osiągnięcia zadowalająco niskiego poziomu strat transmisyjnych, a parametr wypełnienia dla tego światłowodu nie pozwala na osiągnięcie jednomodowego trybu prowadzenia sygnału. Ponadto, w celu kompensacji dyspersji w światłowodzie według tego wynalazku konieczne jest zastosowanie dwóch odcinków włókna, w których jeden będzie miał dyspersję normalną, a drugi anormalną.

Z opisu patentowego EP 2533081 znane jest nieliniowe włókno światłowodowe do generacji efektów nieliniowych, w którym wokół centralnego obszaru światłowodu (rdzenia) występują przestrzenie o podwyższonym współczynnikiem załamania światła względem płaszcz. Taka struktura światłowodu warunkuje prowadzenie sygnału w wyniku współzawodnictwa dwóch mechanizmów propagacji: prowadzenia w wyniku tzw. index-guiding (brak rozpowszechnionego polskiego odpowiednika) oraz w wyniku występowania fotonicznej przerwy wzbronionej (ang. photonic band-gap). W związku z tym, w strukturze takiego światłowodu bardzo często występuje więcej niż jeden mod i nie jest możliwe uzyskanie jednomodowego trybu prowadzenia sygnału dla szerszego spectrum. Włókno według tego wynalazku przeznaczone jest do generacji efektów nieliniowych dla pojedynczych/dyskretnych długości fali, w wyniku których np. następuje generacja nowych częstotliwości światła/długości fali, m.in: generacja trzeciej harmonicznej (ang. frequency tripling) i inne. W wyniku wystąpienia zjawisk tego typu pojawiają się w widmie nowe długości fali, ale niemożliwe jest uzyskanie ciągłego widma, tak jak przy generacji supercontinuum. Ponadto, struktura światłowodu według wynalazku, oprócz obszarów o zwiększonym współczynnikiem załamania światła względem współczynnika przypisanego do rdzenia, uniemożliwiających prowadzenie szerszego zakresu długości fali w rdzeniu, wykazuje równość wymiarów przestrzeni o podwyższonym oraz nie podwyższonym współczynnikiem załamania światła.

Znany jest także światłowód według opisu patentowego EP 1205788, w którym występuje powiększenie przestrzeni o obniżonym względem płaszcz współczynnikiem załamania światła w pierwszym pierścieniu wokół rdzenia, a powiększenie wymiarów przestrzeni o obniżonym względem płaszcz współczynnikiem załamania światła dotyczy wszystkich przestrzeni w pierwszym pierścieniu. Wokół mikrostruktury, w której prowadzone jest światło, zamiast stosowanej w większości znanych światłowodów tego typu matrycy szklanej, występują przestrzenie o obniżonym względem płaszcz współczynnikiem załamania światła (nazywane kapilarami), o średnicy zbliżonej do wymiaru mikrostruktury, którą prowadzone jest światło. Światłowód według wynalazku dotyczy rozwiązania problemu quasidepasowania fazowego stosowanego do generacji pojedynczych efektów nieliniowych dla dyskretnych wybranych długości fali. Przykłady światłowodu według tego wynalazku obejmują światłowody, w których zrealizowane jest jednomodowe prowadzenie wiązki, ale zmiany charakterystyki dyspersji chromatycznej opisywanej struktury są osiągnane w zupełnie inny sposób i znacznie bardziej skomplikowany i trudny do technicznej realizacji w stosunku naszego wynalazku. Dodatkowo, zero dyspersji w przedstawionej w EP 1205788 strukturze może przyjmować wartości tylko z zakresu podczerwieni.

Podobnie jak w opisie patentu EP 2533081, struktura według opisu patentowego EP 1205788 umożliwia generację efektów nieliniowych, ale jedynie takich, w których wyniku nie otrzymujemy cią-

głego, szerokiego widma (generacja supercontinuum). Jest ona zatem optymalizowana pod kątem efektów zwiększających liczbę długości fali w widmie (np. generacja trzeciej harmonicznej) i stąd potrzeba quasi-dopasowania fazowego, a nie pod kątem uzyskiwania szerokiego, ciągłego widma (generacja supercontinuum). Ponadto, sposób produkcji światłowodu według tego wynalazku jest skomplikowany, wymaga zastosowania w strukturze światłowodu kłopotliwych i drogich elementów m.in. elektrod, jakie to elementy nie mogą być zastosowane w standardowych liniach technologicznych do wytwarzania światłowodów.

Wszystkie niedogodności znane ze stanu techniki, mianowicie: jednoczesne osiągnięcie jednomodowego prowadzenia wiązki, możliwość stosunkowo łatwej manipulacji charakterystyką dyspersji chromatycznej, w tym położeniem zera dyspersji światłowodu, nachyleniem krzywej dyspersji i przebiegiem wyższych rzędów dyspersji, a także ograniczenie minimalizacji wymiarów rdzenia światłowodu czyli zwiększenie nieliniowości przy rezygnacji z materiałów trudno dostępnych i kosztownych, osiągnięcie wysokiej tolerancji wymiarów geometrycznych oraz osiągnięcia zwiększonej czułości na naprężenia zostały przewyżnione dzięki mikrostrukturalnemu światłowodowi z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym współczynniku załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń według wynalazku.

Mikrostrukturalny światłowod z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń wykonany jest ze szkła, korzystnie szkła krzemionkowego lub polimeru i zawiera co najmniej jeden rdzeń otoczony płaszczem, w którym wokół rdzenia zlokalizowane są jednorodnie o kształcie zbliżonym do okręgu w przekroju poprzecznym przestrzenie o obniżonym w stosunku do rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła, wypełnione korzystnie gazem, korzystnie powietrzem lub cieczą lub polimerem. Przez rdzeń rozumieć należy obszar o podwyższonym współczynniku załamania światła w stosunku do otaczających przestrzeni (np. otworów powietrznych). Korzystnie, gdy w przypadku zastosowania światłowodu do pomiaru naprężeń krzemionkowy rdzeń domieszkowany jest germanem, korzystnie w ilości co najmniej 12% mol GeO_2 . Przestrzenie o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła, wypełnione korzystnie gazem, korzystnie powietrzem lub cieczą lub polimerem (dalej jako przestrzenie o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania) rozmieszczone są pierścieniowo wokół rdzenia, korzystnie w węzłach heksagonalnej siatki o odległościach pomiędzy węzłami siatki równej stałej sieci. Wokół rdzenia umieszczone są co najmniej dwa, korzystnie co najmniej trzy pierścienie, korzystnie heksagonalne pierścienie przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła. W co najmniej jednym heksagonalnym pierścieniu średnice przestrzeni o obniżonym względem płaszcza i rdzenia współczynniku załamania światła są selektywnie powiększone, korzystnie gdy średnica D co drugiej przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła jest powiększona i mniejsza od dwukrotności stałej sieci Λ . Rdzeń oraz otaczające go pierścieniowe przestrzenie zlokalizowany jest korzystnie wzdłuż środka geometrycznego światłowodu.

Korzystnie gdy średnice wszystkich powiększonych przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła o średnicy D są jednakowe, korzystnie także gdy średnice nie powiększonych przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła d mają jednakową i mniejszą od stałej sieci średnicę. Przy czym stosunek średnicy d nie powiększonej przestrzeni do stałej sieci Λ jest korzystnie mniejszy od 0,45, co gwarantuje jednomodowość struktury. Stosunek średnicy d nie powiększonej przestrzeni do stałej sieci Λ jest korzystnie zawarty jest w przedziale od 0,3 do 0,45 (dodatkowo dla obniżenia strat), korzystnie od 0,35 do 0,45 (dla znacznego obniżenia strat).

W przykładzie wykonania światłowodu według wynalazku do zastosowań przy generacji efektów nieliniowych korzystnie jest gdy stała sieci Λ światłowodu według wynalazku wynosi od 2,15 μm do 2,65 μm , średnica powiększonej przestrzeni D wypełnionej powietrzem wynosi od 2,7 μm do 3,3 μm , średnica nie powiększonej przestrzeni d wynosi od 0,9 μm do 1,1 μm , średnica E płaszcza wynosi od 105 μm do 145 μm , a liczba pierścieni o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła wynosi co najmniej cztery. W takiej konfiguracji możliwe jest uzyskanie zera dyspersji przypadającego na zakres VIS-IR.

W przykładzie wykonania światłowodu według wynalazku do zastosowań przy pomiarze naprężeń korzystnie jest gdy stała sieci Λ wynosi od 5,5 μm do 6,5 μm , średnica powiększonej przestrzeni D o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła wynosi od 6,5 μm do 7,5 μm , średnica nie powiększonej przestrzeni d o obniżonym względem rdzenia i płaszcza współczynniku załamania światła wynosi od 1,75 μm do 2,25 μm , średnica rdzenia wynosi od 2,75 μm do

3,25 μm , średnica E płaszczka wynosi od 105 μm do 145 μm , a liczba pierścieni z przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszczka współczynnika załamania światła wynosi co najmniej dwa, korzystnie co najmniej trzy.

W wypadku zastosowania światłowodu według wynalazku do generacji efektów nieliniowych średnice d są korzystnie równe dla poszczególnych pierścieni, nie są natomiast większe od średnic D . Zwiększanie średnic niepowiększonych przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszczka współczynnika załamania światła d prowadzi do przesunięcia charakterystyki dyspersyjnej w stronę krótszych długości fal. Jednocześnie, zwiększanie średnic powiększonych przestrzeni o obniżonym względem rdzenia i płaszczka współczynnika załamania światła D prowadzi do zakrzywienia charakterystyki w stronę dłuższych długości fal co prowadzi do możliwości uzyskania drugiego zera dyspersji w obszarze podczerwieni w przypadku znacznego powiększenia średnic D . Proces zakrzywiania charakterystyki dyspersyjnej w stronę fal dłuższych wspomaga również możliwość zwiększania średnic d , w szczególności w pierwszym pierścieniu. Efekt przesunięcia zera dyspersji w kierunku krótszych długości fal i zakrzywienia charakterystyki w stronę dłuższych długości fal może być również osiągnięty w przypadku zmniejszania stałej sieci Λ . Zmiany średnic d w dalszych pierścieniach umożliwiają zmiany w nachyleniu charakterystyki dyspersji, aż do uzyskania względnie płaskiej charakterystyki w stronę dłuższych długości fal niż pierwsze zero dyspersji (pierwsze znaczy to, które przypada dla krótszej długości fali). Zwiększanie liczby pierścieni n pozwala ograniczyć straty w światłowodzie, korzystnie jest gdy liczba pierścieni to co najmniej cztery. Jednomodowość struktury jest osiągnięta przy spełnieniu warunku zawierania się parametru wypełnienia w przedziale od 0,3 do 0,45, przy czym korzystnie od 0,35 do 0,45. Dla obliczenia parametru wypełnienia w przypadku światłowodu według wynalazku oblicza się stosunek średnicy niepowiększonego otworu d , w szczególności z pierwszego pierścienia, do stałej sieci.

W wypadku zastosowania światłowodu do generacji efektów nieliniowych znaczące jednoczesne powiększanie wymiarów stałej sieci Λ i średnic przestrzeni D oraz d utrudnia generację zjawisk nieliniowych, ze względu na zmniejszanie koncentracji pola modu i niekorzystne przesunięcie charakterystyki dyspersyjnej a w szczególności zera dyspersji, ponadto taka struktura wymaga stosowania laserów dużej mocy, które są kosztowne i w ogólności trudno dostępne, niebezpieczne i rzadko stosowane w rozwiązaniach aplikacyjnych. Światłowód według wynalazku w przypadku proponowanych wymiarów dla generacji efektów nieliniowych stanowi alternatywę dla znanych rozwiązań, ponieważ minimalizacja wymiarów w przypadku światłowodu według wynalazku jest znacznie mniejsza niż w przypadku znanych rozwiązań, zatem możliwe jest stosowanie dostępnych źródeł światła o stosunkowo niewielkiej mocy przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów produkcji, które rosną wraz z minimalizacją wymiarów.

Mikrostrukturalny światłowód z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym współczynnikiem załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru rozciągania przedstawiono na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schematycznie przekrój światłowodu według wynalazku, fig. 2a prezentuje szczegółowy widok układu przestrzeni powietrznych w przypadku generowania efektów nieliniowych, fig. 2b prezentuje szczegółowy widok układu przestrzeni powietrznych w przypadku zastosowania do pomiarów naprężeń.

Przykład I

Mikrostrukturalny światłowód z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym współczynnikiem załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń według wynalazku wykonany jest ze szkła krzemionkowego i zawiera rdzeń 1 otoczony płaszczem 4, w którym wokół rdzenia 1 zlokalizowane są jednorodne, o kształcie zbliżonym do okręgu w przekroju poprzecznym przestrzenie 2 i 3 wypełnione powietrzem. Przez rdzeń rozumieć należy obszar o podwyższonym współczynnikiem załamania światła w stosunku do otoczenia. Przestrzenie wypełnione powietrzem 2 i 3 rozmieszczone są pierścieniowo wokół rdzenia 1 w węzłach heksagonalnej siatki o odległościach pomiędzy węzłami siatki równej stałej sieci Λ . Wokół rdzenia 1 umieszczone są cztery heksagonalne pierścienie przestrzeni 2 i 3 wypełnionych powietrzem. Średnica D co drugiej przestrzeni wypełnionej powietrzem jest powiększona. Rdzeń 1 oraz otaczające go pierścieniowe 5 przestrzenie 2 i 3 zlokalizowany jest wzdłuż środka geometrycznego światłowodu.

Średnice D wszystkich powiększonych przestrzeni 2 wypełnionych powietrzem są jednakowe, a średnice d nie powiększonych przestrzeni 3 wypełnionych powietrzem mają jednakową i mniejszą od stałej sieci Λ średnicę.

Stała sieci Λ światłowodu według wynalazku wynosi 2,4 μm , średnica D powiększonej przestrzeni wypełnionej powietrzem wynosi 3 μm , średnica d nie powiększonej przestrzeni wypełnionej

powietrzem wynosi 1 μm , średnica płaszczka E wynosi 125 μm , a liczba pierścieni zawierających przestrzenie powietrzne wynosi minimum cztery.

Przykład II

Mikrostrukturalny światłowod z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym względem rdzenia i płaszczka współczynnika załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń według wynalazku wykonany jest ze szkła krzemionkowego i zawiera rdzeń 1 otoczony płaszczem 4, w którym wokół rdzenia 1 zlokalizowane są jednorodne o kształcie zbliżonym do okręgu w przekroju poprzecznym przestrzenie 2 i 3 wypełnione powietrzem. Przez rdzeń 1 rozumieć należy obszar o podwyższonym współczynniku załamania światła w stosunku do otoczenia. Krzemionkowy rdzeń 1 domieszkowany jest germanem w ilości 12% mol GeO_2 . Przestrzenie 2 i 3 wypełnione powietrzem rozmieszczone są pierścieniowo wokół rdzenia 1 w węzłach heksagonalnej siatki o odległościach pomiędzy węzłami siatki równej stałej sieci Λ . Wokół rdzenia 1 umieszczone są cztery heksagonalne pierścienie przestrzeni 2 i 3 wypełnionych powietrzem. W jednym heksagonalnym pierścieniu średnicy D co drugiej przestrzeni 2 wypełnionej powietrzem jest powiększona. Rdzeń 1 oraz otaczające go pierścieniowe przestrzenie 2 i 3 zlokalizowany jest wzdłuż środka geometrycznego światłowodu.

Średnice D wszystkich powiększonych przestrzeni 2 wypełnionych powietrzem są jednakowe, a średnice d nie powiększonych przestrzeni 3 wypełnionych powietrzem mają jednakową i mniejszą od stałej sieci Λ średnicę.

Stała sieci Λ światłowodu według wynalazku wynosi 6 μm , średnica D powiększonej przestrzeni 2 wypełnionej powietrzem wynosi 7 μm , średnica d nie powiększonej przestrzeni 3 wypełnionej powietrzem wynosi 2 μm , średnica rdzenia 1 wynosi 3 μm , średnica płaszczka wynosi 125 μm , a liczba pierścieni powietrznych wynosi minimum trzy.

Zastrzeżenia patentowe

1. Mikrostrukturalny światłowod z selektywnie powiększonymi przestrzeniami o zmniejszonym współczynniku załamania światła zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń z umieszczonymi pierścieniowo wokół otoczonego płaszczem rdzenia przestrzeniami o zbliżonym do okręgu przekroju poprzecznym i o zmniejszonym współczynniku załamania światła względem rdzenia (1) i płaszczka (4), zwłaszcza do generacji efektów nieliniowych i pomiaru naprężeń wykonany ze szkła, korzystnie szkła krzemionkowego lub polimeru, w którym przestrzenie umieszczone pierścieniowo wokół rdzenia (1) wypełnione są korzystnie gazem, korzystnie powietrzem lub cieczą lub polimerem i umieszczone są w węzłach heksagonalnej siatki o odległości pomiędzy węzłami siatki równej stałej sieci Λ , **znamienny tym**, że wokół jednomodowego rdzenia (1) umieszczone są co najmniej trzy pierścienie zawierające przestrzenie (2) i (3) o zmniejszonym w stosunku do współczynnika załamania rdzenia (1) i płaszczka (4) wypełnione gazem albo cieczą albo polimerem, w których średnica co drugiej przestrzeni (2) o zmniejszonym w stosunku do współczynnika załamania rdzenia (1) i płaszczka (4) w co najmniej jednym pierścieniu jest powiększona tak, że jest mniejsza od dwukrotności stałej sieci (Λ), a średnice wszystkich powiększonych przestrzeni (2) o obniżonym w stosunku do współczynnika rdzenia współczynnika załamania światła o średnicy D są jednakowe, średnice nie powiększonych przestrzeni (3) o obniżonym w stosunku do rdzenia (1) i płaszczka (4) współczynnika załamania światła d mają zbliżoną i mniejszą od stałej sieci (Λ) średnicę, a stosunek średnicy d nie powiększonej przestrzeni (3) do stałej sieci (Λ) zawarty jest w przedziale od 0,30 do 0,45.
2. Światłowod według zastrz. 1, **znamienny tym**, że krzemionkowy rdzeń jest domieszkowany.
3. Światłowod według zastrz. 2, **znamienny tym**, że rdzeń (1) domieszkowany jest germanem w ilości co najmniej 12% mol GeO_2 .
4. Światłowod według zastrz. 1, **znamienny tym**, że przy generacji efektów nieliniowych stała sieci Λ światłowodu według wynalazku wynosi od 2,15 μm do 2,65 μm , średnica powiększonej przestrzeni (2) D o obniżonym względem rdzenia (1) i płaszczka (4) współczynnika załamania światła wynosi od 2,7 μm do 3,3 μm , średnica nie powiększonej przestrzeni (3) d wypełnionej powietrzem wynosi od 0,9 μm do 1,1 μm , średnica E płaszczka wynosi od 105 μm do 145 μm , a liczba pierścieni o obniżonym względem rdzenia (1) i płaszczka (4) współczynnika załamania światła wynosi co najmniej cztery.

5. Światłowód według zastrz. 1 albo 2 albo 3, **znamienny tym**, że przy pomiarze naprężeń stała sieci Λ wynosi od $5,5 \mu\text{m}$ do $6,5 \mu\text{m}$, średnica powiększonej przestrzeni (2) D o obniżonym względem rdzenia (1) i płaszczu (4) współczynniku załamania światła wynosi od $6,5 \mu\text{m}$ do $7,5 \mu\text{m}$, średnica nie powiększonej przestrzeni (3) d o obniżonym względem rdzenia (1) i płaszczu (4) współczynniku załamania światła wynosi od $1,75 \mu\text{m}$ do $2,25 \mu\text{m}$, średnica rdzenia (1) wynosi od $2,75$ do $3,25 \mu\text{m}$, średnica E płaszczu (4) wynosi od $105 \mu\text{m}$ do $145 \mu\text{m}$, a liczba pierścieni z przestrzeniami (2) o obniżonym względem rdzenia (1) i płaszczu (4) współczynniku załamania światła wynosi co najmniej trzy.

Rysunki

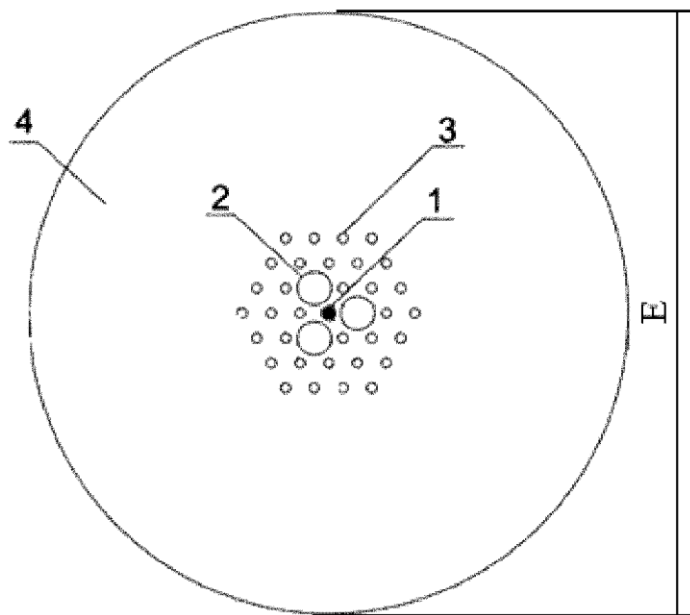


fig. 1

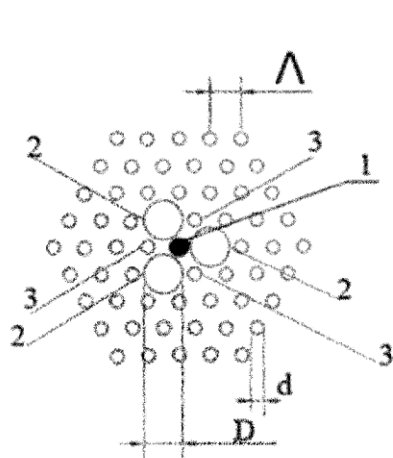


fig. 2a

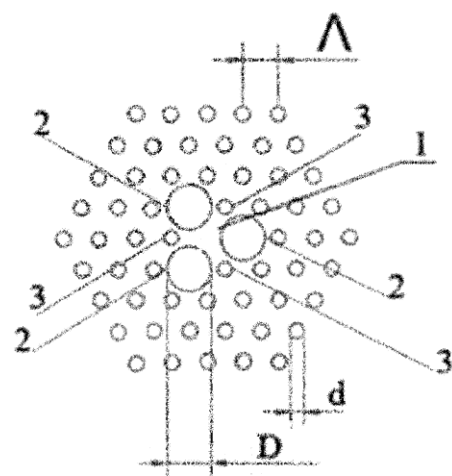


fig. 2b

