

Streszczenie

Rozprawa doktorska poświęcona została przedstawieniu wyników badań z zakresu optyki światłowodowej dotyczących swobodnego modyfikowania rozkładu współczynnika załamania w światłowodach optycznych na podstawie koncepcji nanostrukturyzacji. Nanostrukturyzacja opiera się na projektowaniu rozkładu współczynnika załamania w światłowodzie optycznym i opatentowanej procedurze technologicznej wytwarzania takich światłowodów, w której wykorzystywane są właściwości efektywne materiału złożonego z przynajmniej dwóch dopasowanych termicznie rodzajów szkielek. Zastosowanie powyższej metody umożliwia wytwarzanie wysokiej jakości całoszlanych światłowodów optycznych o projektowanych, określonych właściwościach. Jest ona również konkurencyjna w stosunku do innych technologii wytwarzania włókien optycznych ze względu na możliwość dużej dowolności w kształtowaniu rozkładu współczynnika załamania, w tym zerwania z symetrią kołową struktury rdzenia i płaszczka. Takie rozwiązanie pozwala na dodatkową swobodę w kształtowaniu właściwości optycznych materiału efektywnego światłowodów, dlatego metoda ta może przysłużyć się rozszerzeniu potencjału aplikacyjnego m.in. w sektorach telekomunikacyjnych, laserowych, pomiarowych i biomedycznych. Kompleksowe podejście do zagadnienia światłowodów nanostrukturyzowanych prowadzone jest w projekcie TEAM TECH/2016-1/1 „Nanostructured microoptical components – towards new functionalities and applications”, w ramach którego zrealizowana została niniejsza praca.

Głównym celem rozprawy jest rozszerzenie potencjału aplikacyjnego (głównie w sektorze telekomunikacyjnym) światłowodów optycznych bazujących na koncepcji nanostrukturyzacji, dającej możliwość swobodnego modyfikowania rozkładu współczynnika załamania. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę zalet i wad obecnie stosowanych rozwiązań, w tym analizę ograniczeń technologicznych, które mogą być zniwelowane lub udoskonalone poprzez wykorzystanie metody nanostrukturyzacji. Na podstawie wyników analizy obecnego stanu badań i możliwości dotychczas stosowanych metod zaproponowano w pracy cztery typy włókien światłowodowych o swobodnie kształtowanym rozkładzie współczynnika załamania. Wszystkie struktury bazują na elementach z czystego szkła krzemionkowego z odpowiednią domieszką dwutlenku germanu i ewentualnie fluoru. W ten sposób można podwyższyć (GeO_2) lub obniżyć (F) współczynnik załamania szkła krzemionkowego, co umożliwia modyfikowanie optycznych parametrów włókna. Wykorzystanie tego typu szkielek pozwala na zachowanie pozytywnych aspektów niskiej tłumienności i termicznego dopasowania podczas procesu technologicznego. Wszystkie przedstawione włókna zostały zoptymalizowane i przebadane numerycznie. Dwa z zaproponowanych włókien zostały wytworzone przy zastosowaniu zmodyfikowanej technologii układania i ciągnięcia (ang. *stack-and-draw*) oraz zbadane eksperymentalnie.

Pierwszym zaproponowanym włóknem swobodnie kształtowanym jest światłowod hybrydowy. Struktura tego światłowodu bazuje na zastosowaniu inkluzji o rozmiarze rzędu $1\text{ }\mu\text{m}$ i wysokim współczynniku załamania, rozmieszczonych dookoła rdzenia o średnicy $2,8\text{ }\mu\text{m}$. W ten sposób pole modu podstawowego wnika do płaszczka oddziałując z umieszczonymi tam inkluzjami, modyfikując dyspersję chromatyczną. Co więcej, okazuje się, że odległość inkluzji od rdzenia wpływa na poszczególne fragmenty spektrum, dlatego

odpowiednie ułożenie inkluzji w pierścieniach o różnym promieniu daje możliwość kształtowania dyspersji chromatycznej w szerokim zakresie długości fal. Na podstawie powyższych faktów i procesu optymalizacji otrzymano płaską charakterystykę dyspersji chromatycznej ($-37 \pm 2,5$ ps/nm/km) w przedziale 1,3–2,15 μm . Omawiany światłowód został wyprodukowany z zastosowaniem mniejszej domieszki dwutlenku germanu (ze względu na ograniczenia w dostępności wysoko domieszkowanej krzemionki) niż w zoptymalizowanym projekcie, a następnie został przebadany eksperymentalnie, tj. wykonano analizę geometryczną i materiałową na skaningowym mikroskopie elektronowym oraz zmierzono optyczne właściwości liniowe, m.in. dyspersję oraz efektywne pole modu.

Kolejnym przedstawionym w pracy doktorskiej światłowodem jest włókno utrzymujące polaryzację z rdzeniem o sztucznej anizotropii wymuszonej odpowiednią nanostrukturyzacją. Jest to światłowód, który w porównaniu z tradycyjnie stosowanymi światłowodami dwójłomnymi posiada paskową strukturę w kołowym rdzeniu, co wprowadza sztuczną anizotropię materiału. A zatem dwójłomność nie jest indukowana naprężeniowo (jak w światłowodach typu PANDA czy *bow-tie*) ani geometrycznie (jak np. we włóknach z eliptycznym rdzeniem), ale jest uzyskana poprzez wprowadzenie materiału anizotropowego. Ponadto zaproponowana w niniejszej pracy modyfikacja pozwoliła na otrzymanie znacznie większego zakresu pracy jednomodowej przy zachowaniu kompatybilności z szeroko wykorzystywanymi obecnie światłowodami telekomunikacyjnymi. Zaprojektowane włókno osiągnęło teoretycznie dwójłomność fazową $1,42 \times 10^{-4}$ dla domieszki dwutlenku germanu na poziomie 15 mol% oraz zbliżone wartości efektywnego pola modowego i apertury numerycznej do światłowodu typu SMF-28. Podobnie jak poprzednio, ze względu na ograniczenia w dostępności materiałów domieszkowanych, światłowód udało się wyprodukować, stosując niższą domieszkę dwutlenku germanu, niż wynikało z analizy numerycznej. Włókno scharakteryzowano, a wyniki eksperymentalne potwierdziły zdolność do utrzymywania polaryzacji w zakresie podczerwieni i łatwość sprzęgania z systemami telekomunikacyjnymi.

Rozwinięciem idei poprzedniej struktury jest włókno za sztucznie anizotropowym rdzeniem utrzymujące polaryzację, które ma dodatkowo duże pole modowe i należy do grupy włókien typu *large mode area*. Praca nad tego typu światłowodem została podyktowana zwiększonym zapotrzebowaniem na włókna o dużym polu modowym, w celu uzyskania wiązek spolaryzowanych na wyjściu lasera dużej mocy oraz minimalizacji niekorzystnych efektów nieliniowych. W ramach pracy przeprowadzono optymalizację numeryczną światłowodów o średnicach rdzeni w zakresie 10–40 μm bazujących na różnych konfiguracjach domieszek GeO_2 i F, aby zaproponować szereg rozwiązań o dwójłomności fazowej powyżej 1×10^{-4} . Istotną przewagą opracowanych światłowodów jest jednomodowość dla długości fali 1,55 μm , która nie występuje w komercyjnych światłowodach utrzymujących polaryzację o tak dużym rdzeniu. Zaproponowana struktura gwarantuje pełną kompatybilność ze stosowanymi standardami oraz pozwala ograniczyć grubość średnicy płaszcza przy zachowaniu wysokiej jakości wiązki.

Ostatnim zaprezentowanym w niniejszej pracy światłowodem nanostrukturyzowanym jest światłowód kilkumodowy, dzięki któremu możliwa jest transmisja długodystansowa opierająca się na multipleksacji przestrzennej. W tym przypadku dokonano optymalizacji

włókna przy użyciu autorskiego skryptu, w ramach którego poprzez modyfikację liczby nanopór domieszkowanych GeO_2 w rdzeniu zmaksymalizowano różnicę pomiędzy stałymi propagacji dla pierwszych czterech liniowo spolaryzowanych modów (oznaczanych: LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02}). Zastosowany algorytm redukcji modów wyższych rzędów umożliwił osiągnięcie minimalnej wartości różnicy efektywnych współczynników załamania pomiędzy sąsiadującymi modami na poziomie $1,9 \times 10^{-3}$, która jest wystarczająca do przeciwdziałania efektowi oddziaływania międzymodowego wzdłuż światłowodu. Metoda projektowania światłowodu ma duży potencjał aplikacyjny do wykorzystania w multipleksacji przestrzennej, uważanej za kolejny etap zwiększenia liczby kanałów transmisji danych w telekomunikacji i przyszłych sieciach kwantowych.