

# Streszczenie

## *“Badanie właściwości optycznych i wytwarzanie nanostrukturyzowanych gradientowych wirów optycznych”*

Rozprawa doktorska dotyczy nanostrukturyzowanych światłowodowych mikrokomponentów optycznych typu GRIN (nGRIN) - nanostrukturyzowanych masek wirowych. Gaussowska wiązka laserowa po przejściu przez taki element fazowy zamieniana jest na wiązkę wirową. Mikrokomponenty nGRIN są płaskie, a ta unikalna właściwość maski wirowej otwiera nowe możliwości zastosowań takich elementów fazowych w różnych dziedzinach fotoniki. Maski zaprojektowane z wykorzystaniem teorii ośrodka efektywnego oraz Metoda symulowanego wyżarzania. Maski zostały wykonane metodą mozaikową, która pozwala na ekonomiczne wykonanie takich elementów w produkcji masowej. W przeciwieństwie do klasycznych spiralnych masek wirowych (SPP), zasada działania masek nVPM bazuje na gradientie współczynnika załamania światła szkła z którego jest ona wykonana. Z tego powodu nie ma potrzeby wykonywania precyzyjnego reliefu na powierzchni szkła. Maski nVPM ma dzięki temu ważną zaletę, zmiana ośrodka w jakim zostanie ona zanurzona nie wpływa na jakość generowanego wiru optycznego. Raz zaprojektowana maska w powietrzu jak i np. w wodzie lub etanolu wygeneruje taką samą wiązkę wirową o dokładnie tej samej wartości ładunku topologicznego.

Na bazie maski, w ramach niniejszej pracy zaprojektowano i wykonano światłowodową mikrosondę do generacji wirów optycznych. Sonda ta została w pełni wykonana w technice światłowodowej. Światłowodowe mikro sondy generujące wiązki wirowe mają wysoki potencjał aplikacyjny w pólapkowaniu optycznym, optycznej manipulacji cząsteczkami a także w laserowej mikroobróbce powierzchni. Płaskość powierzchni masek to także duże ułatwienie w tworzeniu bardziej zaawansowanych systemów światłowodowych do generacji wirów optycznych, np. maska nVPM może być stosowana wewnątrz wnęki laserów włóknowych.

W ramach niniejszej pracy dokonano analizy możliwości wykonania achromatycznej maski wirowej do generacji tzw. białych wirów optycznych. Maski fazowa umożliwiająca generację białych wirów optycznych jest bardzo pożądanym elementem optycznym gdyż dotychczas istnieją nieliczne metody generacji takich wirów. Maski do generacji białych wirów mogłyby znaleźć zastosowanie przy źródłach super-continuum i laserach generujących ultrakrótkie impulsy światła.

Pierwsza część pracy poświęcona jest badaniom nad optymalizacją gradientu maski w celu poprawy jednorodności profilu wiązki wirowej. Badania te umotywowane są pewną niedoskonałością masek nVPM. W gradientowej masce wirowej jest zlokalizowany obszar w postaci linii o najwyższym współczynniku załamania światła i graniczy on bezpośrednio z analogicznym o najniższym współczynniku załamania światła, w związku z tym światło jest prowadzone w obszarze o wyższym współczynniku. Skutkuje to nierównomiernym rozkładem intensywności wiązki wirowej. W związku z tym, przedstawiono dwa kierunki poprawy jakości wiązek uzyskiwanych za pomocą masek do generacji wirów optycznych: wykonanie możliwie najcieńszych masek z zastosowaniem szkieł o dużej różnicy współczynnika załamania światła oraz stosując azymutalny nieliniowy profil zmiany współczynnika załamania światła w masce.

W pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych, które pokazują wpływ różnicy współczynników załamania światła szkieł maski oraz jej grubości na jednorodność

intensywności wiązki wirowej oraz rozkład jej fazy. Do symulacji wykorzystano metodę propagacji wiązki (ang. Beam Propagation Method) z wykorzystaniem transformacji Fouriera. Na tej podstawie ustalono, że najlepiej jest wybrać szkła o jak największej różnicy współczynników załamania światła, która umożliwi realizację najcieńszej maski fazowej, co zminimalizuje efekt lokalnego prowadzenia światła. Ponadto na podstawie wyników symulacji, pokazano że jednorodność intensywności wiązki wirowej można poprawić stosując gradient współczynnika załamania światła w masce opisany funkcją potęgową. Wyniki symulacji pokazały także, że w przypadku masek nVPM możliwe jest uzyskanie wirowych wiązek optycznych o stonkowo wysokich ładunkach topologicznych.

Druga część rozprawy skupia się na metodach eksperymentalnych przeprowadzonych w celu weryfikacji jakości generowanych wirów optycznych za pomocą masek nVPM. Zbadane próbki stanowią maski wykonane z jednego rodzaju włókna nastrukuryzowanego, ale maski nVPM przygotowano o różnych grubościach. Maski te zbadano w trzech różnych ośrodkach - powietrzu, wodzie oraz w etanolu. Eksperymenty przeprowadzono w celu zweryfikowanie głównej cechy wyróżniającej maski gradientowych na tle klasycznych płytek spiralnych.

Do zbadania charakterystyki wiązek wirowych wykorzystano dwie metody eksperymentalne: transformację astygmatyczną oraz interferencję w konfiguracji Macha-Zehndera. Wynikami eksperymentów towarzyszą wyniki symulacji metodą BPM przeprowadzone dla warunków analogicznych tym w eksperymencie. W ten sposób przedstawiono faktyczne możliwości generacji wiązek wirowych za pomocą masek GRIN o wartości ładunku topologicznego jeden i dwa. Ostatecznie eksperymentalnie i teoretycznie, pokazano brak wpływu zmiany współczynnika załamania światła zewnętrznego ośrodka wokół maski na jakość generowanych wiązek.

Następnie opisano konstrukcję i wykonanie innowacyjnej mikrosondy optycznej bazującej na masce fazowej nVPM umieszczonej na końcu światłowodu. Do konstrukcji mikrosondy wykorzystano klasyczny światłowód jednodomowy. Ponadto, niezbędne było zastosowanie dodatkowego elementu między końcem światłowodu a maską – mikro pręta szklanego, który ma na celu rozszerzyć wiązkę, tak aby całkowicie wypełnić wiązką aperturę maski. Także na przykładzie sondy pokazano, że po jej zanurzeniu w jednorodnej przejrzystej cieczy nie zmienia się jakość generowanej wiązki wirowej. Obecnie istniejące tego typu mikrosondy światłowodowe bazują na reliefie SPP i nie posiadają takiej ciekawej własności. Wykonana sonda potwierdza kompatybilność masek gradientowych z technologią światłowodową i stanowi dużą wartość aplikacyjną. Poza wcześniej wymienionymi aplikacjami warto dodać że rozwiązanie światłowodowe zwiększa potencjał aplikacyjny masek wirowych w telekomunikacji optycznej. Ponadto, mikrosonda jest wykonana wyłącznie z elementów szklanych czyniąc ją odporną na duże moce promieniowania laserowego i z tego powodu może ona znaleźć zastosowanie w mikroobróbce laserowej.

Ostatnia część pracy dotyczy własności achromatycznych masek nVPM. Jest to niezbędna cecha potrzebna do stworzenia maski do generacji białego wiru optycznego. Własności achromatyczne można poprawić dzięki precyzyjnemu doborowi pary szkieł w procesie tworzenia maski. Pomysł ten jest konsekwencją tego, że nasz zespół posiada doświadczenie w tworzeniu achromatycznych mikrosoczewek GRIN. Poza wymogiem co do krzywych dyspersji współczynnika załamania szkieł, muszą one spełnić inne pozostałe wymogi technologiczne. W ramach pracy wykonano i zweryfikowano projekt achromatycznej maski nVPM.