

Rozprawa doktorska

Siatki dyfrakcyjne sprzęgające światło do układów optyki planarnej: projektowanie, wytwarzanie i charakterystyka

Piotr Pala

Streszczenie:

Efektywne i kontrolowane wprowadzanie światła ze źródła laserowego do struktur falowodowych za pomocą światłowodu jest jednym z kluczowych zagadnień w rozwoju technologii optyki planarnej oraz wdrażaniu nowych platform materiałowych. Obecnie istnieją dwa podstawowe sposoby sprzęgania, różniące się orientacją światłowodu względem falowodu: sprzęganie horyzontalne, oparte na efekcie konwersji modu oraz sprzęganie wertykalne, polegające na wzbudzaniu modów propagujących się w falowodzie za pomocą struktury periodycznej. Sprzęgacze wertykalne, określane również mianem sprzęgaczy siatkowych, znajdują obecnie szersze zastosowanie, gdyż umożliwiają wprowadzanie światła w dowolnym miejscu na powierzchni nawet złożonego układu optyki zintegrowanej. Niniejsza rozprawa objęła zagadnienia związane z projektowaniem, wytwarzaniem oraz charakterystyką eksperymentalną periodycznych struktur służących do sprzęgania światła do falowodów optyki planarnej, ze szczególnym uwzględnieniem pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych wytwarzanych na powierzchni czołowej światłowodu jednomodowego.

W pierwszej części rozprawy omówiono dotychczasowe rozwiązania stosowane w dojrzałych platformach technologicznych, takich jak SOI czy Si_3N_4 , oraz przedstawiono metody zwiększania efektywności sprzęgania. Na podstawie modelowania numerycznego opracowano procedurę szybkiej optymalizacji geometrii sprzęgacza i jego położenia względem światłowodu, wykorzystującą metodę elementów skończonych. Opracowane procedury obliczeniowe zastosowano do projektowania sprzęgaczy siatkowych dla falowodów opartych na ceramice $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$ ($n = 1,8$). Maksymalne teoretyczne efektywności sprzęgania dla prostych struktur osiągały 25%. Należy jednak podkreślić, że wytworzone sprzęgacze charakteryzowały się niższą efektywnością, co wynikało z ograniczeń technologicznych (defektów oraz niejednorodności) oraz niewielkiej wysokości falowodów (zjawisko to potwierdzono również numerycznie). Mimo to wykazano możliwość skutecznego sprzęgania światła do falowodów wykonanych z ceramiki $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$ przy użyciu sprzęgaczy siatkowych.

Druga część rozprawy koncentruje się na opracowaniu technologii wytwarzania sprzęgaczy siatkowych na powierzchni czołowej światłowodu jednomodowego. Rozwiązanie to posiada dwie

zasadnicze zalety: umożliwia sprzęganie dowolnej długości fali poprzez zaprojektowanie i wykonanie dedykowanego sprzęgacza oraz pozwala na wprowadzanie światła w dowolnym miejscu prostego odcinka falowodu. Do fabrykacji struktur zastosowano metodę nanoimprintu oraz przetestowano różne materiały. Najlepsze rezultaty uzyskano dla cieczy jonowych, które umożliwiały formowanie pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych o kątach do 45° i stałych sieci od $1\ \mu\text{m}$ do $4\ \mu\text{m}$. Wytworzone struktury charakteryzowały się dużą powtarzalnością i wysoką jakością, a ich parametry oceniano za pomocą mikroskopii sił atomowych oraz analizy rozkładów natężenia światła w polu dalekim. W ramach badań eksperymentalnych wytworzono także sprzęgacz do falowodów wykonanych z fotorezystu SU-8. Zmierzone efektywności sprzęgania osiągnęły wartość 4,5%, co dobrze koreluje z wynikami numerycznymi ($ES \approx 5\%$). Ponadto zademonstrowano możliwość wykorzystania wytworzonego sprzęgacza do oszacowania strat transmisyjnych badanych falowodów, a dodatkowa analiza numeryczna strat transmisyjnych falowodów SU-8, przeprowadzana metodą elementów skończonych potwierdziła poprawność uzyskanych wyników eksperymentalnych.

Podsumowując, rozprawa dowodzi, że periodyczne struktury wytwarzane na powierzchni czołowej światłowodu metodami nanoimprintu mogą być z powodzeniem stosowane do sprzęgania światła do falowodów. Wyniki badań poszerzają wiedzę w zakresie technologii fotonicznych i mogą stanowić podstawę do dalszego rozwoju miniaturowych urządzeń fotonicznych. Wyniki uzyskane w ramach rozprawy zostały opublikowane w czterech artykułach oraz przedstawione na pięciu krajowych i międzynarodowych konferencjach.