



Recenzja Rozprawy Doktorskiej mgr inż. Edyty Środy

Symulacyjne badania falowodowych elementów fotonicznych ze strukturyzacją powierzchni wytworzonych w technologii zol-żel

Rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Środy została wykonana na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej, pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Wacława Urbańczyka jako promotora oraz dr. inż. Jacka Olszewskiego jako promotora pomocniczego. Praca dotyczy numerycznej analizy wpływu strukturyzacji powierzchni planarnych falowodowych elementów fotonicznych na poprawę ich właściwości optycznych. Doktorantka zidentyfikowała istotne problemy występujące w badanych strukturach: straty optyczne w zakrzywionych falowodach oraz ograniczoną efektywność sprzęgaczy falowodowych i konwerterów modowych wynikającą z niedopasowania fazowego. Następnie przeanalizowała metody ograniczenia lub eliminacji tych zjawisk za pomocą relatywnie prostej techniki odpowiedniej strukturyzacji powierzchni. We wszystkich przypadkach zwracała uwagę, aby proponowane modyfikacje nie powodowały nadmiernych komplikacji w procesie wytwarzania elementów. W tym kontekście uważam podjęty problem badawczy za istotny i w pełni właściwy dla rozprawy doktorskiej. Ponieważ większość proponowanych usprawnień nie była wcześniej szeroko analizowana w literaturze, należy uznać przeprowadzone badania za dostatecznie oryginalne i nowatorskie. Tym samym można uznać za udowodnioną sformułowaną bezpośrednio we wstępie tezę pracy, która brzmi: *Odpowiednia strukturyzacja powierzchni umożliwia znaczącą poprawę parametrów użytkowych planarnych elementów fotonicznych wytworzonych w technologii zol-żel, takich jak zgięte falowody, sprzęgacze i konwertery modów.*

Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w czterech artykułach naukowych:

1. E. Środa, J. Olszewski, and W. Urbańczyk, Reducing bend-induced loss and crosstalk in a two-mode ridge waveguide by steplike thickness structuring, *Applied Optics* 61, 1164 (2022),
2. M. A. Butt, A. Kaźmierczak, C. Tyszkiewicz, P. Karasiński, E. Środa, J. Olszewski, P. Pala, T. Martynkien, D. Hlushchenko, and T. Baraniecki, Hypha project: a low-cost alternative for integrated photonics, *Photonic Letters of Poland* 14, 25 (2022),
3. E. Środa, A. Gawlik, J. Olszewski, and W. Urbańczyk, Reducing phase errors in multimode interference coupler by side grooves formed on its top surface, *Applied Optics* 63, 3764 (2023),

4. E. Środa, J. Olszewski, and W. Urbańczyk, Design of a broadband integrated mode converter based on non-uniform binary long-period grating by direct multiparameter optimization, *IEEE Photonics Journal* 16, 6600709 (2024)

oraz w dwóch komunikatach konferencyjnych:

1. E. Środa, J. Olszewski, and W. Urbańczyk, Reducing loss and crosstalk in two-mode ridge waveguide bend by step-like thickness structuring, *Proceeding of SPIE 12148, Integrated Photonics Platforms II*, 121480A (2022),
2. E. Środa, A. Gawlik, J. Olszewski, and W. Urbańczyk, Correction of phase errors in multimode interference couplers using rectangular surface-relief grating, *Proceeding of SPIE 12424, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXVII*, 124241F (2023).

Dorobek ten potwierdza wysoką jakość prowadzonych badań i świadczy o bardzo dobrej umiejętności pracy naukowej. Ma on również istotne znaczenie dla oceny wartości naukowej rozprawy, ponieważ zaprezentowane wyniki zostały poddane weryfikacji przez niezależnych recenzentów czasopism naukowych. Istotne jest, że we wszystkich tych publikacjach, z wyjątkiem jednej, doktorantka jest pierwszą autorką, co należy interpretować jako przesłankę, że jej wkład w powstanie tych publikacji był dominujący.

Treść rozprawy potwierdza merytoryczną wiedzę autorki na poziomie wymaganym od kandydatów do stopnia doktora nauk fizycznych. Praca została opatrzona obszerną literaturą obejmującą równo sto pozycji, co dowodzi, że doktorantka wnikliwie zapoznała się z aktualnym stanem wiedzy i umożliwia właściwe umiejscowienie przeprowadzonych badań w szerszym kontekście. Sama rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi wstęp, w którym przedstawiono przedmiot i zakres badań oraz sformułowano tezę pracy. W mojej ocenie mógłby on zostać bardziej rozbudowany, tak aby pełniej ukazać znaczenie oraz zastosowania analizowanych konstrukcji i zjawisk. Kolejne rozdziały, do omówienia których przejdę za chwilę, prezentują wyniki przeprowadzonych obliczeń.

W pierwszej kolejności muszę jednak zauważyć, że w rozprawie brakuje rozdziału poświęconego metodologii. Co prawda została ona częściowo omówiona przy okazji analizy poszczególnych typów struktur, jednak przedstawione są jedynie specyficzne metody odnoszące się do konkretnych zagadnień. We wstępie autorka wspomina, że dokładne obliczenia wykonano metodą elementów skończonych, lecz nie podaje, jaka implementacja tej metody została użyta. Można przypuszczać, że wykorzystano oprogramowanie komercyjne, nie znajduje to jednak potwierdzenia w treści rozprawy. Nie wiadomo też, jaka była to aplikacja ani czy była dedykowana do analizy propagacji światła, czy też stanowiła narzędzie ogólnego przeznaczenia. Osobny — nawet krótki — rozdział poświęcony stosowanej metodologii wyeliminowałby tego rodzaju wątpliwości, a ponadto podniósłby wiarygodność prezentowanych wyników. Ta sama uwaga dotyczy stosowanej w rozdziale trzecim metody rozwinienia w bazie modów własnych.

Rozdziały od drugiego do czwartego stanowią szczegółowe omówienie trzech analizowanych zagadnień. W rozdziale drugim skupiono się na wpływie zakrzywienia falowodu na straty optyczne

oraz przesłuchy międzymodowe. W celu skompensowania tych niepożądanych efektów autorka proponuje zastosowanie uskoju w połowie szerokości falowodu, mającego na celu zrównoważenie zmiany efektywnego współczynnika załamania wynikającej z zakrzywienia. W odróżnieniu od rozwiązań prezentowanych w starszej literaturze, w których wysokość falowodu zmienia się w sposób ciągły, pojedynczy uskok jest znacznie łatwiejszy do wykonania technologicznie.

Doktorantka wykazała, że takie podejście prowadzi do istotnej poprawy właściwości falowodu. Nie ustrzegła się jednak kilku uchybień. Przede wszystkim brakuje szczegółowej analizy rozpraszania światła na przedniej i tylnej krawędzi uskoju, w miejscach przejścia między falowodem prostym a zakrzywionym. Można domyślać się, że zjawisko to odpowiada za przedstawione straty nadmiarowe, jednak w rozprawie zabrakło pogłębionej dyskusji fizycznej tego mechanizmu. Do drobniejszych mankamentów zaliczyć można brak uzasadnienia równań (2.14) i (2.15), choćby poprzez odpowiednie cytowanie źródeł, niewłaściwie dobraną skalę na rysunku 2.6b oraz brak zaznaczenia granic falowodu na wykresach pól.

W rozdziale trzecim autorka analizuje wielomodowe sprzęgacze interferencyjne. We wstępie do tego rozdziału przedstawia zasadę ich działania oraz wyjaśnia, w jaki sposób błędy fazy wpływają na pogorszenie ich parametrów. Następnie przeprowadza szczegółową analizę dwóch metod redukcji tych błędów fazowych: poprzez zastosowanie reliefowej poprzecznej siatki dyfrakcyjnej oraz poprzez wytrawienie podłużnych rowków na całej długości sprzęgacza. Jest to analiza bardzo wnikliwa i reprezentująca wysoki poziom naukowy. Niemniej jednak także w tym rozdziale doktorantka nie uniknęła pewnych niedociągnięć.

Po pierwsze, brakuje uzasadnienia wyboru analizowanych struktur. Nie jest dla mnie jasny sens stosowania sprzęgacza 100:0. Jediną jego potencjalną przewagą nad brakiem sprzęgacza jest selektywność modowa lub selektywność względem długości fali, jednak żaden z tych aspektów nie wydaje się istotny dla struktury opisanej w sekcji 3.3.2.1. Krótkie przedstawienie możliwych zastosowań pozwoliłoby rozwiązać te wątpliwości. Uwaga ta odnosi się zresztą do wszystkich struktur analizowanych w rozprawie: ich potencjalne zastosowania umożliwiłyby lepsze umiejscowienie prezentowanych wyników w kontekście bieżącego stanu nauki i techniki.

Spośród innych istotnych uwag wymienić należy brak jednoznacznego porównania wyników otrzymanych metodą perturbacyjną oraz metodą dokładną (FEM), a także nie w pełni spójne wnioski przedstawione w sekcji 3.4.1: najpierw autorka stwierdza, że zastosowanie rowków umożliwia bardzo dobrą kompensację niedopasowania fazowego dla struktur o wysokim kontraście, po czym wskazuje, że kompensacja ta nie jest jednak aż tak dobra. Do drobniejszych uchybień należy zaliczyć brak wyjaśnienia skrótu MMI na początku rozdziału oraz niejasny dobór skal na wykresach 3.24b i 3.24d (ogólnie czytelność wielu wykresów pozostawia sporo do życzenia, o czym piszę w dalszej części recenzji).

Ostatnią analizowaną przez doktorantkę strukturą są szerokopasmowe konwertery modów oparte na siatkach dyfrakcyjnych. Szczegółowo omówiono je w rozdziale czwartym, który rozpoczyna się przedstawieniem zasady działania tych konwerterów. W dalszej części zaprezentowano metodę macierzy przejścia stanowiącą podstawę późniejszych obliczeń. W opisie tej metody autorka

lakonicznie stwierdza, że zaniedbuje odbicia wsteczne, jednak brak uzasadnienia tego założenia stanowi, moim zdaniem, istotne niedociągnięcie.

W kolejnej sekcji rozdziału sformułowano problem optymalizacyjny oraz opisano procedurę jego rozwiązania. Procedura ta została wykorzystana do optymalizacji siatek z przesunięciem bocznym oraz ze schodkową zmianą grubości. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, analiza została przeprowadzona wnikliwie i rzetelnie, choć pozostawia kilka wątpliwości. Po pierwsze, brakuje informacji dotyczących szybkości obliczeń oraz tego, w jakim stopniu przybliżenie dwumodowe opisane w sekcji 4.4.1 wpływa na jej poprawę. Ponadto w zaprezentowanej na rys. 4.11 procedurze optymalizacyjnej nie jest dla mnie jasna rola wielkości F_{thr} . Nie rozumiem również, dlaczego jako kryterium wyznaczania zakresu spektralnego konwerterów przyjęto wartość T_{11} , a nie CE, przez co nadmiarowe straty mogą pozornie poszerzać ten zakres.

Lekturę wyników przedstawionych w tym rozdziale utrudnia konsekwentnie stosowany zakres długości fali od $1.2\ \mu\text{m}$ do $2.0\ \mu\text{m}$ na wszystkich wykresach. Zakres ten jest zbyt szeroki, co sprawia, że wykresy bywają nieczytelne i mogą wprowadzać w błąd. Ponieważ w treści rozdziału doktorantka osobno analizuje parametry konwerterów w drugim i trzecim oknie optycznym, znacznie lepszym rozwiązaniem byłoby przedstawienie wyników odpowiadających tym oknom na osobnych wykresach.

Jakość wykresów w całej rozprawie stanowi odrębny problem. Należy docenić staranność ich przygotowania pod względem typografii oraz spójnej palety kolorystycznej. Trudność polega jednak na tym, że na bardzo wielu wykresach autorka umieściła zbyt dużą liczbę informacji jednocześnie, co sprawia, że ich interpretacja wymaga żmudnej i czasochłonnej analizy. Znacznie lepszym rozwiązaniem byłoby zwiększenie liczby wykresów przy jednoczesnym uproszczeniu każdego z nich tak, aby główny przekaz był widoczny na pierwszy rzut oka.

Podobną uwagę można odnieść do treści rozprawy. Poza nielicznymi niedociągnięciami typograficznymi (np. użyciem kursywy w zapisie funkcji $\exp$) jej ogólny układ jest czytelny i estetyczny. Jednak duża liczba danych liczbowych umieszczonych bezpośrednio w tekście utrudnia płynność lektury. Preferowane byłoby rozwiązanie, w którym w treści pojawiałyby się więcej informacji jakościowych — na przykład o ile procent zmienia się istotny parametr w wyniku zastosowania danego rozwiązania. Dane liczbowe dokumentujące te stwierdzenia mogłyby zostać zestawione oddzielnie, na przykład w formie tabel. Takie podejście znacząco poprawiłoby komfort i klarowność lektury.

Z tego powodu najprzyjemniej czytało mi się podsumowanie, które w sposób przejrzysty i elegancki przedstawia najważniejsze wyniki oraz wnioski płynące z przeprowadzonych badań.

Moja ostatnia uwaga dotyczy nie tyle samej doktorantki, ile decyzji promotorów oraz rady dyscypliny w kwestii tytułu rozprawy. Obecnie brzmi on: *Symulacyjne badania falowodowych elementów fotonicznych ze strukturyzacją powierzchni wytworzonych w technologii zol-żel*. Badania przedstawione w pracy oraz wynikające z nich wnioski są jednak całkowicie niezależne od technologii wytwarzania analizowanych struktur — byłyby one identyczne również dla struktur otrzy-

manyh np. metodami epitaksjalnymi. Ponadto w rozprawie nie opisano technologii zol-żel, co — biorąc pod uwagę charakter i zakres pracy — nie stanowi, moim zdaniem, uchybienia. W związku z tym za zdecydowanie bardziej adekwatny uważałbym tytuł skrócony: *Symulacyjne badania falowodowych elementów fonicznych ze strukturyzacją powierzchni*.

Podsumowując, stwierdzam, że doktorantka wykazała zaawansowaną wiedzę w zakresie fizyki planarnych struktur fonicznych oraz ich numerycznej analizy, a także skutecznie zademonstrowała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Sama rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego wpływu strukturyzacji powierzchni na elementy optyczne oparte na falowodach planarnych. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne odnoszą się głównie do sposobu prezentacji osiągnięcia naukowego, a nie jego merytorycznej wartości. W związku z tym potwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Środy spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



dr hab. inż. Maciej Dems, prof. uczelni