

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
tel. 22 234 5689
e-mail: tomasz.wolinski@pw.edu.pl

Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Edyty Środy pt.:
“Symulacyjne badania falowodowych elementów fonicznych ze strukturyzacją
powierzchni wytworzonych w technologii zol-żel”

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Edyty Środy pod tytułem: “*Symulacyjne badania falowodowych elementów fonicznych ze strukturyzacją powierzchni wytworzonych w technologii zol-żel*” została wykonana w Katedrze Optyki i Fotoniki na Politechnice Wrocławskiej. Promotorem rozprawy był prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk, a promotorem pomocniczym dr inż. Jacek Olszewski.

Rozprawa ma charakter teoretyczny i składa się z pięciu rozdziałów: wstępu, trzech rozdziałów merytorycznych i podsumowania oraz bibliografii obejmującej 100 pozycji literaturowych. Zajmuje łącznie 133 strony i została zrealizowana w ramach zakończonego grantu FNP TEAM-NET nr POIR.04.04.00-00-14D6/18 pt. „Hybrydowe platformy czujnikowe zintegrowanych układów fonicznych na bazie materiałów ceramicznych i polimerowych”, którego liderem był Polski Ośrodek Rozwoju Technologii Sp. z o.o., a kierownikiem zespołu badawczego ze strony Politechniki Wrocławskiej był promotor pomocniczy dr inż. Jacek Olszewski.

Doktorantka w latach 2022–2024 była współautorem 4 prac z listy JCR (punktacja ministerialna od 40 do 100 punktów; łącznie 340 punktów ministerialnych) bezpośrednio związanych z tematyką rozprawy doktorskiej i opublikowanych w następujących czasopiśmie: *Applied Optics* (dwukrotnie), *IEEE Photonics Journal* oraz *Photonics Letters of Poland*, przy czym w 3 pracach pani E. Środa jest umieszczona na pierwszym miejscu.

- [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, *Photonics 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).

Wszystkie te prace - wg bazy *Web of Science* - uzyskały do dnia 14.04.2026 r. 12 cytowań, a sumaryczny ich współczynnik wpływu (*impact factor*) wynosi ponad 6,6. Nie są to porażające dane bibliometryczne, ale na tym etapie rozwoju kariery naukowej świadczą o rozpoznawalności tematyki badawczej, a w szczególności dotyczy to pracy [1] opublikowanej w *Applied Optics* w 2022 r. (5 cytowań).

Dodatkowo w latach 2022–2023 powstały dwa komunikaty konferencyjne opublikowane w *Proceedings of SPIE*, w których doktorantka jest pierwszym autorem.

Tytuł rozprawy ogranicza zakres zainteresowań doktorantki do badań symulacyjnych falowodowych elementów fonicznych ze strukturyzacją powierzchni, ale w dodatku tylko do tych wytworzonych w technologii zol-żel. Technologia zol-żel jest niskotemperaturowym procesem chemicznym otrzymywania z roztworów koloidalnych cienkich powłok o grubości od kilku do kilkunastu nanometrów. Proces ten obejmuje przejście z roztworu koloidalnego (zol) w ciało stałe (żel), co pozwala na tworzenie wysokiej czystości trwałych nanostruktur fonicznych. W przypadku technologii zol-żel znacznie łatwiej uzyskać powierzchnię o ściśle określonej fakturze i parametrach, co jest niezwykle istotne w procesie wytwarzania planarnych elementów fonicznych, a w szczególności na bazie ceramicznej platformy materiałowej wykorzystującej krzemionkę domieszkowaną dwutlenkiem tytanu.

W związku z tym nasuwa się pytanie, czy wyniki uzyskanych badań symulacyjnych falowodowych elementów fonicznych ze strukturyzacją powierzchni mogą być również zastosowane do struktur wytworzonych w innej technologii niż technologia zol-żel. Tym bardziej, że w całej rozprawie pojęcie „zol-żel” pojawia się tylko 5 razy (wliczając tytuł rozprawy oraz powtarzaną dwukrotnie jej tezę). Oczekiwałbym na wyjaśnienie ze strony doktorantki takiego szczegółowego wyboru tematu rozprawy.

W rozdziale wstępnym, przedstawiającym wprowadzenie do aktualnej tematyki zintegrowanych układów fonicznych (PIC – *photonics integrated circuits*), doktorantka przedstawia znane platformy materiałowe bazujące na krzemie na izolatorze (SOI – *silicon on insulator*), fosforu indu, azotku krzemu oraz niobianie litu, omawiając zarówno ich zalety, jak i ograniczenia.

Doktorantka uzasadnia, że warto podjąć trud symulacji numerycznych w stosunku do materiałów o średnim kontraście współczynnika załamania ($\text{TiO}_2\text{:SiO}_2/\text{SiO}_2$), z których wykonane zostaną foniczne struktury falowodowe, a odpowiednia strukturyzacja ich powierzchni poprawi ich parametry. W konsekwencji tych rozważań formułuje następującą tezę pracy:

“Odpowiednia strukturyzacja powierzchni umożliwi znaczącą poprawę parametrów użytkowych planarnych elementów fonicznych wytworzonych w technologii zol-żel, takich jak zgięte falowody, sprzęgacze i konwertery modów”

Zasadnicza część rozprawy została zaprezentowana w trzech rozdziałach merytorycznych (drugim, trzecim oraz czwartym) dotyczących analizy trzech rodzajów fonicznych elementów falowodowych, tj. grzbietowych falowodów zgiętych kołowo, wielomodowych sprzęgaczy interferencyjnych oraz konwerterów modów TE_{00} i TE_{01} wykorzystujących binarne siatki długookresowe.

Rozdział drugi opisuje zgięty falowód grzbietowy, w którym straty zgięciowe – szczególnie dla niewielkich promieni zgięcia – są wynikiem sprzęgania się modów prowadzonych z wysoko stratnymi modami płaszczowymi. Doktorantka zaproponowała pomysł zmniejszenia strat falowodu zgiętego poprzez schodkową zmianę jego grubości w części zgiętej. Porównanie parametrów falowodu bez uskoku oraz z ok. 20% uskokiem przedstawione w Tab. 2.4 dowodzi znaczącej redukcji strat nadmiarowych i przesłuchów międzymodowych na połączeniu sekcji prostej i zgiętej falowodu, przy jednoczesnej znacznej redukcji strat zgięciowych dla najniższych prowadzonych modów TE_{00} i TE_{01} falowodu. Jest to niewątpliwie duże osiągnięcie doktorantki, opisane w najlepiej cytowanej z jej prac i opublikowane w 2022 w *Applied Optics* [1].

Kolejny trzeci rozdział, którego najważniejsze wyniki zostały opublikowane w 2023 r. W obszernej publikacji z 2023 r. w *Applied Optics* [3] i dotyczy wielomodowych sprzęgaczy interferencyjnych ze strukturyzowaną powierzchnią. Oryginalnym sposobem redukcji błędów fazy było wytworzenie na powierzchni sprzęgacza prostokątnej siatki reliefowej, która umożliwiła modulację rozkładu efektywnego współczynnika załamania.

W rozdziale tym doktorantka przedstawiła dwie oryginalne metody kompensacji błędów fazy w wielomodowych sprzęgaczach interferencyjnych poprzez strukturyzację ich powierzchni. Pierwsza metoda polegała na wytworzeniu na powierzchni sprzęgacza reliefowej siatki prostokątnej o okresie dopasowanym do periodyczności modu najwyższego rzędu, dla którego błąd fazy ma być jeszcze kompensowany. Poprzez odpowiedni dobór okresu siatki oraz głębokości reliefu doktorantka wykazała możliwość efektywnego skompensowania błędu fazy modów biorących udział w odwzorowaniu o stosunkowo wysokich rzędach w przypadku platform materiałowych o średnim kontraście współczynnika załamania, które bazują na $TiO_2:SiO_2/SiO_2$.

Drugą, bardziej uniwersalną metodą kompensacji błędów fazy zaproponowaną przez doktorantkę było wytworzenie bocznych rowków o odpowiedniej geometrii na górnej powierzchni sprzęgacza, co prowadzi do redukcji błędów fazy w wielomodowych sprzęgaczach interferencyjnych niezależnie od kontrastu współczynnika załamania. Po przeprowadzeniu analizy perturbacyjnej doktorantka wykazała, że zmiany stałych propagacji modów spowodowane bocznymi rowkami są proporcjonalne do czwartej potęgi numeru modu, podobnie jak błędy fazowe. Okazało się, że w odróżnieniu od metody siatkowej boczne rowki o zoptymalizowanej geometrii kompensują skutecznie błędy fazy również dla wielomodowych sprzęgaczy interferencyjnych wykonanych z materiałów o dużym kontraście współczynnika załamania.

W rozdziale 4. doktorantka dokonała optymalizacji konwerterów modowych TE_{00} i TE_{01} bazujących na siatkach długookresowych. Najistotniejsze wyniki badawcze z tego rozdziału zostały opublikowane w 2024 r. w pracy [4] w *IEEE Photonics Journal*.

Symulacje numeryczne przeprowadzone przez doktorantkę wykazały, że niejednorodne binarne siatki długookresowe o silnym sprzężeniu pomiędzy modami propagującymi się w poszczególnych segmentach mogą być stosowane jako szerokopasmowe konwertery modów. Ponieważ silne sprzężenia wykluczają możliwość użycia teorii modów sprzężonych do symulacji takich struktur, doktorantka opracowała zmodyfikowaną metodę macierzy przejścia,

umożliwiająca obliczenie parametrów transmisyjnych aperiodycznych binarnych siatek falowodowych dla każdego z pobudzonych na wejściu modów przestrzennych, uwzględniając zarówno propagację kilkumodową, jak i straty spowodowane odcięciem modów wyższych rzędów. W szczególności skuteczność zaproponowanej metody została potwierdzona poprzez optymalizację dwóch szerokopasmowych konwerterów modowych TE_{00} i TE_{01} w zakresie długości fal 1,3 μm oraz 1,55 μm ,

W rozdziale piątym znajdujemy obszernie podsumowanie rozprawy oraz końcowe wnioski. Uzyskane przez doktorantkę oryginalne wyniki badawcze dowodzą jednoznacznie prawdziwości tezy postawionej na wstępie rozprawy.

W konkluzji recenzji stwierdzam, że wcześniejsze uwagi, w szczególności dotyczące tytułu rozprawy oraz dostrzeżone nieliczne niedociągnięcia edytorskie (np. str. 47 – Rys. 3.18), nie wpływają na moją pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy. Doktorantka bardzo starannie opisuje zastosowane metody numeryczne oraz wnikliwie analizuje uzyskane wyniki badań symulacyjnych, formułując logiczne wnioski. Świadczy to o poprawności i rzetelności warsztatu badawczego, a jednocześnie o sumienności i skrupulatności prowadzonych zaplanowanych badań symulacyjnych. Należy podkreślić, że zawartość merytoryczna rozprawy została opublikowana w postaci trzech obszernych artykułów zamieszczonych w prestiżowych międzynarodowych czasopismach optycznych i fotonicznych, tj. *Applied Optics* oraz *IEEE Photonics Journal*.

W podsumowaniu stwierdzam, iż zgodnie z obowiązującą ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ustaw z dn. 20.01.2020 r. poz. 85) recenzowana rozprawa doktorska pt. *“Symulacyjne badania falowodowych elementów fotonicznych ze strukturyzacją powierzchni wytworzonych w technologii zol-żel”* **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, a przez to może stanowić podstawę uzyskania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. **W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Edyty Środy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



Warszawa, dnia 17.04.2026 r.

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński