

prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz
członek korespondent PAN
Instytut Fizyki Technicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
jarosz@wat.edu.pl

4 marca, 2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Piotra Pali
pt.: "Siatki dyfrakcyjne sprzęgające światło do układów optyki planarnej: projektowanie, wytwarzanie i charakterystyka"

Przedmiotem recenzji jest w/wym. rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Pali, którego Promotorem jest dr hab. inż. Tadeusz Martynkien. Recenzję przygotowano na podstawie zawiadomienia nr 6/11/D11/2025 z dnia 19.11.2025 r. (data wpływu 3.12.2025 r.) Prorektora ds. Badań i Innowacji Politechniki Wrocławskiej o wyznaczeniu mnie na recenzenta w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne nr 207/15/RDND11/2024-2028 z dnia 18.11.2025 r.

Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami, ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.), rolą recenzenta jest stwierdzenie czy osoba ubiegająca się o stopień naukowy doktora posiada wymagany dorobek naukowy (wymóg art. 186), oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie jak i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (wymóg art. 187 ust. 1) a przede wszystkim czy przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (wymóg art. 187 ust. 2).

Po przestudiowaniu rozprawy nie mam żadnych wątpliwości co do poniższych faktów:

1. Rozprawa dla przewodu wszczętego w dyscyplinie nauki fizyczne w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych mieści się w całości w dyscyplinie nauki fizyczne.
2. Rozprawa ma charakter analityczno-eksperymentalny z niezbędnymi elementami technologicznymi, zaś podane na stronie 9 dwie tezy rozprawy są jasno sformułowane i możliwe do weryfikacji na bazie przedłożonej rozprawy.
3. Wsparcie rozprawy o publikacje, dotyczące tematu rozprawy, znajdujące się w bazie JCR, w której Doktorant jest współautorem, stanowi podstawę do stwierdzenia spełnienia wymogu ustawowego art. 186 co do posiadania przez Doktoranta dorobku naukowego, jak i wymogu art. 187 ust. 2 odnośnie zawarcia w pracy oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Przystępując do szczegółowej recenzji rozprawy, stwierdzam, że rozprawa ma wystarczająco obszerny rozmiar – 123 strony, zawierający: 5 rozdziałów, 130-pozycyjną bibliografię oraz wykaz prac własnych Doktoranta – 6 prac z bazy JCR w tym 3 przywołane w treści rozprawy, 2 inne recenzowane publikacje anglojęzyczne, 6 wystąpień konferencyjnych, w tym 4 jako referaty.

Tezy pracy zostały sformułowane na stronie 9 jako cyt.: „*Platforma materiałowa bazująca na ceramikach $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$ uzyskanych metodą zol-żel umożliwia wytworzenie sprzęgaczy wertykalnych*” oraz „*Periodyczne struktury wytwarzane na powierzchni czołowej światłowodu metodami nanoimpruntu i nanoprintu umożliwiają sprzęganie światła do falowodów oraz jego detekcję.*” Stwierdzam, że tezy te są w pełni zgodne z tematem rozprawy.

Formalnie część teoretyczna rozprawy jest prezentowana we wprowadzeniu (rozdział 1) oraz na wstępie do rozdziałów 2–4 zawierających badania własne Doktoranta. Nie jest to klasyczna forma, w której na bazie studium literaturowego formułuje się tezę lub cel rozprawy. Tutaj dwie tezy zostały podane na koniec wprowadzenia, po bardzo ogólnikowym, ale jasnym przedstawieniu istniejących rozwiązań technicznych. Podejście takie (część literaturowa przypisana do każdego z rozdziałów prac własnych Doktoranta) utrudnia, częściowo, selekcję wkładu własnego doktoranta, tym bardziej, iż doktorant we wstępie do tych rozdziałów powiela częściowo tę samą informację, tworząc tym samym pewnego rodzaju chaos interpretacyjny.

Recenzent nie wnosi większych uwag do Rozdziału 1, znajdując wyłącznie dwa błędy redakcyjne: interferometr Macha-Zehndera (powinien być pisany z myślnikiem pomiędzy nazwiskami str. 2) oraz definicja kontrastu współczynnika załamania (str. 3) powinna być określona w tym miejscu, a nie dopiero na str. 27.

Wartość dysertacyjną niosą kolejne trzy rozdziały pracy.

Rozdział 2 – poświęcono numerycznej optymalizacji sprzęgaczy siatkowych zaprojektowanych dla platformy materiałowej bazującej na ceramikach $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$. Wyjściową formułą jest tu analityczna postać warunku Bragga opisanego zależnością (2.7). Szkoda tylko, że doktorant nie podał tu źródeł tego równania. Niemniej, opracowana metoda numeryczna pozwoliła Mu na optymalizację parametrów geometrycznych struktury sprzęgacza, jak również na wykazanie wpływu błędów technologicznych i braku precyzji pozycjonowania światłowodu wprowadzającego na efektywność sprzęgania. Według uzyskanych wyników możliwe jest osiągnięcie nawet 30% efektywności sprzęgania. Jako istotne uważam dwa elementy:

- po pierwsze, opracowanie autorskiej metody obliczeniowej na bazie metody elementów skończonych (MES) w oprogramowaniu *Comsol Multiphysics*, polegającej na 'rozbiciu' ciągłego procesu obliczeniowego na dwie symulacje: wyznaczenia kierunkowości siatki i rozkładu pola z niej wychodzącego oraz rozkładu pola wychodzącego ze światłowodu pobudzającego. Elementem 'zszycia' obu elementów obliczeniowych jest tu określenie całki przykrycia tych pól, która na bazie uwzględnienia kierunkowości siatki pozwala na określenie efektywności sprzęgania. Szkoda tylko, iż to jasne wyjaśnienie znajduje się dopiero w podsumowaniu tego rozdziału. Podejście to pozwoliło Doktorantowi na rewelacyjne skrócenie czasu przeprowadzania symulacji numerycznych;
- po drugie, przebadanie licznej grupy parametrów geometrycznych charakteryzujących zarówno warunki pobudzenia, jak i konstrukcję siatki oraz wykazanie, iż:

a) najistotniejszym parametrem dla tej struktury mającym wpływ na efektywność sprzęgania jest stała siatki (Λ) oraz grubość warstwy SiO_2 ,

b) określenie , dla użytecznej długości fali 1550 nm, parametrów struktury dla platformy $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$.

Jako najistotniejsze uwagi dotyczące tego rozdziału dysertacji wnoszę:

- mało czytelne rysunki 2.4 – 2.5 zwłaszcza co do zastosowanej kolorystyki,
- słaby merytorycznie opis zależności zaprezentowanych zwłaszcza na rys.2.5,
- błędną adjustację podpisu pod rys. 2.6,
- brak komentarza dla odmiennej charakterystyki efektywności sprzęgania w funkcji wysokości falowodu dla SOI z rys. 2.7 b),
- brak konsekwencji w nazewnictwie parametru L. W rozprawie pojawia się on jako stała siatki (str. 12), okres warstwy (str. 29), stała sieci (str. 33),

- bardzo słaby opis wyników eksperymentalnych zawarty w podrozdziale 2.4. Zdaniem recenzenta opisano tu pobudzenie falowodu grzbietowego a nie ma żadnej informacji o sprzęgaczu siatkowym omawianym w tym rozdziale.

Rozdział 3 – zawiera wyniki dotyczące zarówno samej technologii, jak i numerycznej symulacji oraz eksperymentalnej charakterystyki struktur periodycznych wytworzonych na powierzchni czołowej światłowodu. Technologia była zastosowana dla grupy trzech materiałów: materiałów polimerowych utwardzanych UV (ciecze jonowe), ceramik SiO_2 oraz ZrO_2 . Niestety, w przypadku ostatniego materiału zastosowana technologia nie dała wystarczająco dobrych rezultatów. Uważam, że oryginalny dorobek Doktoranta w tym rozdziale skupia się na strukturze bazującej na cieczach jonowych, gdyż zastosowana technologia dla materiałów ceramicznych jest mało efektywna i nie przyniosła spodziewanych rezultatów. Jako dodatkowy element nowości uważam zaproponowanie niemieszczącej metody charakteryzacji uzyskanych struktur poprzez analizę rozkładów światła w polu dalekim, dla której opracowano numeryczny model oparty na MES (niewątpliwe doświadczenie Doktoranta z Rozdziału 2) umożliwiający symulację stosownych wzorów dyfrakcyjnych.

Jako najistotniejsze uwagi do tego rozdziału wnoszę:

- poprawność zapisu równ (3.3), pod całką znajduje się wyrażenie zespolone (e^{ikr}), zaś przed całką w mianowniku liczba urojona (i), zatem amplituda fali w punkcie P nie jest wartością rzeczywistą,
- brak analizy rozbieżności wyników eksperymentalnych i numerycznych dla pozycji kątowych w zakresie $\pm 25^\circ - 50^\circ$ dla fali 1550, 1600 i 1630 nm z rys. 3.13,
- zbyt optymistyczną analizę wpływu kąta objęcia czoła włókna β w stosunku do możliwości technologicznych. Doktorant używał obcinarki Fujikura CT-101/102, która umożliwia zmianę kąta jedynie w zakresie $0^\circ - 15^\circ$,
- brak poprawnego komentarza dla wyników z rys. 3.16 f) dla fal od 1300 nm w górę – praktycznie uzyskana intensywność pików dyfrakcyjnych jest prawie zerowa,
- mylnie podana numeracja równania na stronie 72 - recenzent nie znajduje równania 1 rozwiązywanego analitycznie. Także równanie (1.5) podane na str. 73 nie występuje w dysertacji,
- konieczne jest określenie kto wytworzył struktury pokazane na rys. 3.21,
- ponieważ w rozdziale tym technologia bazuje na włóknie SMF-28, które to ma długość fali odcięcia działania jedno modowego rzędu 1290 nm, wyniki uzyskane dla pobudzenia falami o długości 516, 660 oraz 832 nm wymagają komentarza odnośnie eliminacji modów wyższego rzędu.

Rozdział 4 – przedstawia wyniki symulacji oraz eksperymentalnej charakteryzacji efektywności sprzęgania światła do falowodów optyki planarnej na bazie pryzmatycznej siatki dyfrakcyjnej utworzonej na czołowej powierzchni światłowodu. Zastosowano tu najlepsze wyniki z poprzednich rozdziałów, w tym projekt struktury sprzęgającej wykonanej z cieczy jonowych (Rozdział 3) oraz platformy materiałowej opartej na $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ (Rozdział 2) a także Si_3N_4 . Uzyskane efektywności dla zoptymalizowanych struktur 24,2% dla długości fali 633 nm i platformy $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ (możliwość poprawy o ok. 9% dla fali 1500 nm poprzez dołożenie cienkiej warstwy ZrO_2) oraz 20,5% dla fali o długości 1550 nm i platformy Si_3N_4 należy uznać za dobry wynik. Także jako pozytywny wynik przyjmuję numeryczne oszacowanie wpływów błędów technologicznych na efektywność sprzęgania (stałej siatki Λ oraz kąta pryzmatu θ). Niestety, eksperymentalne sprawdzenie tego podejścia przy dużej zgodności obliczeń numerycznych – estymacja efektywności sprzęgania ok. 5% przy zmierzonej 4,45% pokazuje brak technologicznej możliwości wytworzenia optymalnej struktury w podebranych przez doktoranta warunkach laboratoryjnych.

Uwagi recenzenta do tego rozdziału dotyczą:

- złego opisu na rys. 4.5 a) oraz 4.16 b) - zamiast CE powinno być ES (w podpisie rys. 4.5 ES zamiast EF),
- braku schematu zestawionego stanowiska do testowania sprzęgacza (powinien wystąpić jako rys. 4.17 a),
- konieczność określenia użyteczności zaproponowanej struktury dla fali długości 633 nm, skoro włókno doprowadzające jest klasycznym światłowodem SMF-28 (jednomodowym dla I i III okna transmisyjnego).

Rozdział 5 – w zasadzie nie stanowi uwag końcowych co do osiągniętych rezultatów, a jedynie reasumpcję tego, co zawarto w poszczególnych rozdziałach, o czym powiedziano na końcu Rozdziału 1. Jako istotny wniosek z tego rozdziału należy przytoczyć zdanie cyt.: *„Wyniki potwierdzają, że za pomocą pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych wytworzonych w niespecjalistycznym laboratorium optycznym metodami nanoimprintu, umożliwiają (recenzent - powinno być – możliwe jest) wprowadzenie światła do falowodów optyki zintegrowanej.”* Rzeczywiście, jak wykazał Doktorant, uzyskanie zadowalających wyników z punktu widzenia zastosowań aplikacyjnych wymaga posiadania specjalistycznego laboratorium optycznego.

Rozdział 6 – to bibliografia wykorzystana w rozprawie, która jest prawidłowo podana i zacytowana w treści dysertacji. Jednakże ze zdziwieniem stwierdzam, iż w wykazie tym brak jest pozycji 1, 2, 3 prac wymienionych w Rozdziale 7 jako artykułów naukowych związanych z rozprawą oraz pozycji 1 z Rozdziału 7 jako artykułu naukowego częściowo związanego z rozprawą. Spodziewam się stosownego komentarza Doktoranta do tej kwestii podczas publicznej obrony.

Rozprawa stanowi udokumentowanie posiadania pogłębionej wiedzy z zakresu nauk fizycznych przez Doktoranta dotyczącej projektowania, charakteryzacji, a także częściowego wytwarzania siatek dyfrakcyjnych jako elementów sprzęgających dla optyki planarnej o zadanych parametrach z punktu widzenia uzyskania stosownych właściwości optycznych. Z dużą przyjemnością studiuje się zaprezentowaną w rozprawie metodykę przeprowadzania procesu badawczego, zwłaszcza opisu i wyników zawartych w Rozdziale 5, będących swoistym zwieńczeniem prac nad projektowaniem, symulacją numeryczną, wytworzeniem i pomiarem właściwości struktury — to prawidłowy i godny naśladowania tok pracy naukowej. Tym samym z satysfakcją stwierdzam, że Doktorant wykazał się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami, co kwalifikuje go do uzyskania tytułu doktorskiego.

Jako podsumowanie niniejszym stwierdzam, iż przedłożona rozprawa spełnia wymogi zawarte w art. 186 i 187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.), zarówno co do wymaganego dorobku naukowego, zaprezentowania przez Doktoranta ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie nauki fizyczne jak i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przede wszystkim jako oryginalnego rozwiązania problemu naukowego oraz stawiam wniosek o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.