



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński
Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 5
02-093 Warszawa
e-mail: rysard.buczynski@fuw.edu.pl
Tel. + 48 22 5532023

Recenzja rozprawy doktorskiej
„Siatki dyfrakcyjne sprzęgające światło do układów optyki planarnej:
projektowanie, wytwarzanie i charakterystyka”
mgr inż. Piotra Pali

*Recenzja została przygotowana na wniosek Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej
Informatyka Stosowana i Telekomunikacja Politechniki Wrocławskiej*

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Pali jest poświęcona badaniom nad projektowaniem, wytwarzaniem oraz charakterystyką siatek dyfrakcyjnych stosowanych do sprzęgania światła ze światłowodów do układów optyki planarnej. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres badań numerycznych i eksperymentalnych dotyczących zarówno klasycznych sprzęgaczy siatkowych projektowanych dla platformy materiałowej $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, jak i nowej grupy pryzmatycznych struktur periodycznych wytwarzanych bezpośrednio na powierzchni czołowej światłowodu, które mogą pełnić funkcję sprzęgaczy do falowodów optyki zintegrowanej. Rozprawa zawiera zagadnienia badawcze dotyczące fotoniki zintegrowanej, technologii światłowodowych, modelowania numerycznego propagacji fal elektromagnetycznych oraz technologii wytwarzania struktur dyfrakcyjnych.

W rozprawie Doktorant podejmuje ważny i aktualny temat związany z jednym z podstawowych problemów współczesnej fotoniki zintegrowanej PICs (Photonic Integrated Circuits), jakim jest efektywne sprzęganie światła pomiędzy światłowodem a planarnym falowodem optycznym. We wprowadzeniu Doktorant trafnie definiuje źródło tego problemu: bardzo silne niedopasowanie modowe pomiędzy standardowym światłowodem telekomunikacyjnym a falowodem w układach fotoniki zintegrowanej. Autor wskazuje jako przykład, że standardowy światłowod SMF-28 ma średnicę rdzenia około $8,2\text{ }\mu\text{m}$, podczas



gdy typowy falowód wykonany w technologii SOI (Silicon-On-Insulator) ma przekrój $400 \text{ nm} \times 220 \text{ nm}$, co odpowiada około 900-krotnej różnicy pola modowego.

Rozprawa bardzo dobrze wpisuje się w aktualny stan badań światowych. Zagadnienie łączenia optyki światłowodowej i optyki zintegrowanej nie jest nowym problemem badawczym, natomiast nie znaleziono dotychczas pełnego rozwiązania tego problemu. Od wielu lat temu zagadnieniu poświęcane są całe sesje na największych konferencjach fotonicznych na świecie.

Doktorant prawidłowo podejmuje prace badawcze, rozważając dwa główne podejścia do rozwiązania problemu łączenia światłowodów z fonicznymi układami zintegrowanymi: sprzęgaczy krawędziowych oraz wertykalnych sprzęgaczy siatkowych. W przeglądzie literatury pokazano, że w dojrzałych platformach, takich jak SOI, sprzęgacze krawędziowe mogą osiągać sprawności rzędu 79,4%-91,2%, natomiast proste sprzęgacze siatkowe zwykle około 30-40%, a ich sprawność może rosnać do 70-80% przy użyciu siatek Bragga, metalicznych zwierciadeł, dodatkowych warstw o wyższym współczynniku załamania, siatek apodyzowanych lub anizotropowych profili siatek. Dla platformy Si_3N_4 autor przytacza typowe wartości sprawności około 40% dla prostych struktur oraz 55-70% dla rozwiązań zaawansowanych. Ten przegląd jest wartościową analizą stanu wiedzy w zakresie sprawności sprzężeń w wiodących platformach materiałowych optyki zintegrowanej i jednocześnie wskazuje na brak analogicznych opracowań dla rozważanej przez doktoranta platformy $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$.

Dorobek naukowy Doktoranta związany z rozprawą obejmuje cztery publikacje bezpośrednio powiązane z tematyką pracy, z czego w trzech mgr inż. Piotr Pała jest pierwszym autorem, . Są to następujące prace:

- „Ceramic surface relief gratings imprinted on an optical fiber tip” opublikowana w Applied Optics w 2022 r., dotycząca wytwarzania ceramicznych siatek reliefowych na powierzchni czołowej światłowodu. Praca uzyskała 1 autocytywanie.
- „Optical fiber grating-prism fabrication by imprint patterning of ionic-liquid-based resist” opublikowana w International Journal of Molecular Sciences w 2023 r., poświęcony technologii wykonywania struktur siatka-pryzmat na czole światłowodu z wykorzystaniem rezystu na bazie cieczy jonowych. Praca uzyskała 4 cytowania, w tym 2 obce.
- „Grism fabricated on the end-face of an optical fiber” opublikowana w Optics Express w 2023 r., dotycząca projektowania, wykonania i charakterystyki grismu na czole światłowodu. Praca uzyskała 2 cytowania, w tym jedno obce.
- „Design and fabrication of a grism placed at the end face of an optical fiber for coupling light into a waveguide” opublikowana w Applied Optics w 2025 r., opisująca projekt i demonstrację zastosowania takiej struktury do sprzęgania światła do falowodu optycznego. Praca uzyskała jedno cytowanie obce.

Ponadto Doktorant jest współautorem czterech innych publikacji częściowo związanych z tematyką rozprawy, dotyczących światłowodów mikrostrukturalnych, pomiarów OFDR.



Przedstawione wyniki bibliometryczne wskazują, że wyniki przedstawione w rozprawie zostały już zweryfikowane pod kątem oryginalności i wkładu w rozwój dziedziny poprzez system niezależnych recenzji w uznanych czasopismach naukowych o międzynarodowym zasięgu oraz zostały zauważone przez środowisko poprzez pierwsze cytowania tych prac.

Rozprawa opiera się na dwóch sformułowanych tezach: po pierwsze, że platforma materiałowa oparta na ceramikach $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ uzyskiwanych metodą zol-żel umożliwia wytwarzanie sprzęgaczy wertykalnych, a po drugie, że periodyczne struktury wytwarzane metodami nanoimpruntu i nanoprintu na powierzchni czołowej światłowodu umożliwiają sprzęganie światła do falowodów oraz jego detekcję. Tezy są sformułowane w sposób umożliwiający ich weryfikację, choć obie mają charakter bardzo ogólny. W mojej ocenie obie tezy zostały w pracy zweryfikowane pozytywnie, natomiast należy zwrócić uwagę, że ze względu na ich ogólne sformułowanie, zweryfikowane tezy nie zawierają informacji o praktycznych aspektach zastosowanych rozwiązań związanych z ilościowymi wartościami przedstawianymi jako osiągnięcie. Ponadto w tezie drugiej są wymieniane dwa procesy nanoimpruntu i nanoprintu. W samym tekście doktoratu nie znajdują ich ścisłych definicji ani różnic, które uzasadniałyby rozróżnianie ich w tezie rozprawy doktorskiej.

Rozprawa składa się z pięciu zasadniczych rozdziałów. Rozdział pierwszy zawiera bardzo dobre, zwarte i jednocześnie dostatecznie dogłębne wprowadzenie do optyki zintegrowanej oraz analizę metod sprzęgania światła ze światłowodów do falowodów. Rozdział ten ma wysoki walor dydaktyczny i pokazuje bardzo dobrą orientację Doktoranta w problematyce platform materiałowych PIC, różnic wynikających z kontrastu współczynnika załamania. Szczególnie cenne jest wskazanie różnic pomiędzy efektywnością sprzęgania oraz tolerancjami parametrów dla poszczególnych platform charakteryzujących się różnymi kontrastami współczynnika załamania. W rozdziale jednak zabrakło opisu motywacji podjęcia prac nad platformą $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ oraz kompleksowego porównania głównych cech platform PICs w formie np. tabeli, zawierającej opis możliwości i dojrzałości tych platform. Na tym tle byłoby łatwiej czytelnikowi rozprawy zrozumieć motywację podjęcia pracy z wybraną platformą.

Rozdział drugi zawiera pierwszą część oryginalnych wyników badawczych Doktoranta, które dotyczą projektowania i optymalizacji parametrów sprzęgaczy siatkowych dla platformy materiałowej $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ uwzględniające różne rodzaje i parametry podłoża. Doktorant opracował własne narzędzia symulacyjne oparte na metodzie elementów skończonych zaimplementowane w środowisku COMSOL z wykorzystaniem interfejsu środowiska Matlab. W pierwszym kroku zbudował pełny model 2D sprzęgacza światłowod-falowod oraz go zoptymalizował poprzez zastosowanie przybliżenia obwiedni pola dla propagacji w przestrzeni swobodnej. Następnie w celu przyspieszenia obliczeń Doktorant rozłożył proces symulacji na dwa moduły: jeden do wyznaczania rozkładu pola wychodzącego z siatki i kierunkowości, oraz drugi do wyznaczania pola wychodzącego ze światłowodu. Dzięki temu czas pojedynczej symulacji został zredukowany wielokrotnie z poziomu kilkunastu minut dla podstawowego pierwszego modelu, do 19 s w modelu docelowym. Jednocześnie wykazał



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

równoważność obu zbudowanych modeli. Modele mają charakter uniwersalny, choć w ramach pracy były stosowane do platformy materiałowej $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ dla różnych podłoży.

Opracowane narzędzie numeryczne zostało zastosowane przez Doktoranta do optymalizacji parametrów siatek sprzęgania oraz położenia światłowodu względem siatki, a także określenia wpływu tolerancji poszczególnych parametrów na ich działanie. Dla optymalnej konstrukcji sprzęgacza zaprojektowanej dla 1550 nm maksymalna efektywność sprzęgania wyniosła 30% dla falowodu o wysokości 0,6 μm , siatki o stałej sieci 1,162 μm , głębokości 0,318 μm , współczynnika wypełnienia 0,48 na podłożu SiO_2 o grubości 3 μm na płycie krzemowej. Doktorant wykazał, że proponowane rozwiązanie ma znaczenie praktyczne ze względu na możliwe do zrealizowania dokładności poszczególnych parametrów siatki i justowania układu. Podobne symulacje zostały przeprowadzone dla innych długości fal oraz podłoży. W innych przypadkach efektywność sprzęgania dla zoptymalizowanych parametrów siatki była mniejsza i wynosiła od 10 do 26%.

Rozdział 2 zawiera także wyniki prac eksperymentalnych doktoranta weryfikujące praktyczne możliwości sprzęgania światła w omawianej konfiguracji do falowodów $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$. Doktorant przeprowadził pomiary dla siatek wykonanych na Politechnice Śląskiej. Uzyskane eksperymentalne efektywności sprzęgania wyniosły jedynie około 1,5%, podczas gdy obliczenia wskazywały na możliwości osiągnięcia ponad 30%. Należy jednak zwrócić uwagę, że deklarowane parametry zrealizowanych siatek odbiegają znacząco od parametrów zaprojektowanych jako optymalne przez Doktoranta. Ponadto parametry zadeklarowane nie zostały zweryfikowane przez pomiar ich rzeczywistych parametrów. Reasumując, wyniki eksperymentalne walidują pierwszą tezę rozprawy, ale nie stanowią walidacji eksperymentalnej opracowanego przez Doktoranta modelu optymalizacji parametrów siatek. Ponadto wykonane pomiary mocy na wyjściu falowodu są na poziomie 5-20 μW . Przy opisie pomiarów Doktorant pominął podanie poziomu tła, co w tym przypadku może być istotne dla określenia dokładności pomiarów i określenia tolerancji dla zmierzonej efektywności sprzężenia.

Rozdział trzeci zawiera oryginalne wyniki uzyskane przez doktoranta i w mojej ocenie stanowi główne osiągnięcie ocenianej rozprawy. Doktorant opracował metodę wytwarzania pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych na powierzchni czołowej światłowodu przy użyciu metod nanostemplowania. Przetestował trzy klasy materiałów: zol-żele SiO_2 , zol-żele ZrO_2 oraz ciecze jonowe. Wnioski wskazują na ciecze jonowe jako najbardziej odpowiednie materiały do wytwarzania struktur dyfrakcyjnych. Zostały one oparte na rzetelnych i wszechstronnych badaniach eksperymentalnych oraz analizie ograniczeń technologicznych, jakości odwzorowania struktury oraz powtarzalności procesu. Szczególnie ważne jest, że dzięki cieczom jonowym możliwe było wytworzenie pryzmatów o dużych kątach, dochodzących do 40°. To jest wynik istotny, ponieważ duży kąt pryzmatu jest trudny do osiągnięcia innymi metodami i pozwala projektować struktury o bardziej użytecznych właściwościach przestrzennych.



W rozdziale 3 doktorant opisał szczegółowo swoje prace dotyczące wytwarzania siatek dyfrakcyjnych w układach pryzmatycznych oraz budowy stanowiska do pomiaru rozkładów dyfrakcyjnych w polu dalekim, które umożliwiło analizę właściwości wytworzonych elementów. W tym celu Doktorant opracował model do analizy pola dalekiego pozwalający na porównywanie wyników eksperymentalnych z modelem i ocenianie jakości wykonanych siatek dyfrakcyjnych bez konieczności bezpośredniego pomiaru profilu siatki metodami profilometrycznymi (np. AFM). Ostatnia część rozdziału zawiera opis interesującej nowej koncepcji włókna światłowodowego ze zintegrowaną siatką w układzie pryzmatycznym, umożliwiającą propagację pierwszego rzędu dyfrakcyjnego wzdłuż osi włókna. To osiągnięcie może znaleźć zastosowanie przy wytwarzaniu filtrów spektralnych lub opracowaniu kompaktowych spektrometrów, które nie wymagają stosowania elementów optycznych wymagających dodatkowego justowania.

Rozważana przez Doktoranta architektura odbiega od powszechnie rozwijanego podejścia w sprzęganiu światłowodu z chipem PIC, gdzie siatka dyfrakcyjna odpowiadająca za pobudzenie modów falowodowych jest zintegrowana z samym falowodem. W tym przypadku rozważane jest podejście alternatywne, w którym siatka jest zintegrowana z włóknem światłowodowym, tworząc sondę światłowodową do pobudzania falowodów. Z praktycznego punktu widzenia w skali masowej znacznie korzystniejsze i tańsze jest zintegrowanie siatki w układach PICs, natomiast rozwijane w rozprawie podejście może być wykorzystane z powodzeniem jako narzędzie metrologiczne do testowania układów optyki zintegrowanej w fazie prototypowania i charakteryzacji nowych platform materiałowych, gdzie przygotowanie pełnego zestawu sprzęgaczy siatkowych na chipie byłoby kosztowne i mało elastyczne. Sonda światłowodowa umożliwia wprowadzanie światła w dowolnym miejscu falowodu oraz możliwość przesuwania punktu sprzęgania wzdłuż światłowodu co pozwala zarówno na testowanie układów jak i m.in. na pomiary tłumienności falowodów.

Mimo mojej wysokiej oceny rozdziału 3 należy zwrócić uwagę na nieodpowiedni tytuł rozdziału. Jego zawartość nie opisuje technologii wytwarzania pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych, a co najwyżej przedstawia opis metody ich wytwarzania. Rozprawa nie zawiera także informacji, aby taki opis technologii został przygotowany przez Doktoranta poza rozprawą. Opracowanie technologii wiąże się z przygotowaniem szczegółowego opisu materiałów i procedur umożliwiającego specjalistom w dziedzinie pełne odtworzenie czynności potrzebnych do osiągnięcia opisywanych wyników. Opis, który został zawarty w rozdziale 3.4 nie spełnia tych wymogów. Natomiast należy dodać, że nikt nie oczekuje w pracy doktorskiej opisu technologii, a celem pracy nie było opracowanie technologii.

Rozdział czwarty przedstawia model numeryczny i wyniki eksperymentalne wykorzystania pryzmatycznych siatek wytworzonych na czole światłowodu do sprzęgania światła do falowodów optyki planarnej. Struktura tego rozdziału jest odmienna od wcześniejszych części rozprawy i sprawia wrażenie zaadaptowanej z jednej publikacji w czasopiśmie, zawiera dużo powtórzeń z poprzednich rozdziałów podanych w innej formie, m.in. ponowne definiowanie zmiennych (str. 85), ponowny skrócony opis modelu do symulacji numerycznych,



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

przedstawianie informacji z poprzednich rozdziałów, ale w zmienionej formie stylistycznej bez referowania do poprzednich rozdziałów.

Niemniej wyniki przedstawione w tym rozdziale są bardzo wartościowe, istotne z punktu widzenia rozprawy i domykają jej ciąg logiczny oraz weryfikują drugą tezę rozprawy. Doktorant przedstawił opis opracowanego uproszczonego modelu numerycznego do szybkiego badania sprzęgania wiązki wygenerowanej przez światłowod zintegrowany z pryzmatyczną siatką dyfrakcyjną do modów falowodowych. Model pozwala obliczyć refleksję i transmitancję oraz efektywność sprzęgania dla wybranych parametrów geometrycznych i materiałowych siatki oraz kąta pryzmatu. Jest to bardzo wartościowe narzędzie numeryczne do optymalizacji parametrów rozważanych sprzęgaczy oraz innych konfiguracji układów do pobudzania modów falowodowych za pomocą siatek dyfrakcyjnych.

Najważniejsze z punktu widzenia rozprawy są jednak wyniki eksperymentalne. Ze względu na trudności w wykonaniu wysokiej jakości falowodów na platformie $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$, Doktorant wykorzystał w eksperymencie falowody samodzielnie wykonane ze standardowego fotorezystu o znanych i dobrych właściwościach optycznych SU-8. Dla wiązki o długości fali 1550 nm otrzymał w badanym układzie sprzężenie do falowodu z efektywnością sprzęgania równą 4,45% po uwzględnieniu obliczonych strat falowodowych na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Otrzymany wynik był zgodny z symulacjami numerycznymi dla zadanych parametrów układu. Jednak należy zauważyć, że wartości zmierzonej mocy na detektorze na wyjściu falowodu były na poziomie nW. Brak analizy w pracy strat tła nie pozwala na obiektywne oszacowanie błędu pomiarowego efektywności sprzęgania.

Rozdział piąty pod dość niefortunnym tytułem *Uwagi końcowe* zawiera syntetyczne podsumowanie wyników i odniesienie do tezy rozprawy. Doktorant trafnie stwierdził, że dla platformy $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ potwierdził możliwość projektowania i wykonania działających sprzęgaczy siatkowych, choć walidacja eksperymentalna nie odnosiła się bezpośrednio do zaprojektowanych struktur przy pomocy samodzielnie opracowanego oprogramowania, a uzyskane sprawności były bardzo niskie w porównaniu z przewidywanymi numerycznie wartościami. W drugiej części krótko podsumował prace związane z opracowaniem i pomiarami pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych i weryfikacją eksperymentalną ich działania. Przytoczone wyniki weryfikują pozytywnie drugą tezę pracy.

Niestety, ten rozdział jest najsłabszy w całej pracy i pozostawia duży niedosyt. Zabrakło analizy wpływu osiągniętych wyników na rozwój dziedziny i odniesienia się do stanu wiedzy. Rozdział nie zawiera także propozycji prac badawczych, które powinny stanowić kontynuację przedstawionych wyników i analizy możliwości praktycznego zastosowania wyników.

W podsumowaniu rozprawę doktorską mgr inż. Piotra Pali oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym. Rozprawa łączy w sobie wysokiej jakości prace numeryczne związane z opracowaniem modeli sprzęgania wiązki ze światłowodu do falowodu z wykorzystaniem pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych w różnych konfiguracjach, prace



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

technologiczne związane z otrzymywaniem pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych metodą zol-żel z różnymi platformami materiałowymi oraz cieczami jonowymi, oraz prace pomiarowe weryfikujące eksperymentalnie działanie zbudowanych układów sprzęgających. Zakres przedstawionych prac świadczy o tym, że Doktorant łączy różnorodne kompetencje, które rzadko występują u jednego młodego badacza. Na uznanie zasługuje to, że modelowanie nie zostało potraktowane jako dodatek do prac technologicznych i eksperymentalnych, ale jako równoprawne zagadnienie badawcze, które stanowi użyteczne narzędzie projektowe dla dalszych prac badawczych w dziedzinie integracji światłowodów z układami optyki zintegrowanej. Jeszcze wyżej oceniam prace technologiczne związane z wytwarzaniem i analizą właściwości różnych struktur pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych zintegrowanych ze światłowodami. Liczba różnego rodzaju wykonanych i przebadanych struktur znacząco przekracza oczekiwania wobec tego typu prac eksperymentalnych w ramach rozprawy doktorskiej i świadczy o głębokim zaangażowaniu doktoranta w proces badawczy.

Jak każda rozprawa doktorska, oceniana praca również zawiera słabsze aspekty. Większość uwag uwzględniłem przy omawianiu poszczególnych rozdziałów. Za najslabszą stronę uznaję brak porównania otrzymanych wyników ze stanem wiedzy, którego oczekiwałem w rozdziale 5. Brak takiego porównania nie pozwala w pełni docenić znaczących wyników doktoranta zawartych w niniejszej rozprawie. Ponadto wyrażam niedosyt, że wyniki prac numerycznych nad optymalizacją parametrów siatek nie zostały wykorzystane do wytworzenia siatki do sprzęgania światła w falowodach na platformie materiałowej $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ i zweryfikowane eksperymentalnie w pracy. Otrzymane efektywności sprzęgania na poziomie 1,5% znacząco odbiegają od możliwych do osiągnięcia ponad 30%. Jednocześnie jestem świadom, że prace technologiczne związane z zapisem siatek nie były wykonywane przez Doktoranta i nie miał on wpływu na implementację obliczonych parametrów siatek.

Doceniam także umiejętność krytycznej analizy otrzymanych wyników przez Doktoranta, który jasno precyzuje w rozprawie, które wyniki są sukcesem, a które ujawniają ograniczenia zarówno badanej technologii, jak i procesu badawczego. Świadczy to o dojrzałości badawczej doktoranta i podkreśla wiarygodność analiz przedstawionych w rozprawie.

Praca jest również bardzo dobra pod względem formalnym i redakcyjnym. Jest napisana przejrzysto, logicznie i poprawnym językiem przyjętym w opracowaniach naukowych. Doktorant prawidłowo odnosi się do cytowanych materiałów, stosuje przejrzyste ilustracje, wszystkie wykresy osi w wykresach są prawidłowo opisane. Nie znalazłem poważniejszych błędów edycyjnych w pracy, jedynie na str. 32 w opisie Tab. 3.2 brakuje na końcu wyrazu 'Si'. W mojej subiektywnej ocenie wykresy, których praca zawiera bardzo dużo, powinny być większe, aby ułatwić czytelnikowi ich analizę, a kolorystyka użyta do zaznaczania niektórych cech charakterystycznych (linie przerywane, opisy) powinna być lepiej dobrana i bardziej kontrastowa względem tła (np. rys. 2.6, 2.7a, 2.9a). Pod względem stylu opisu i pod względem stylistycznym rozdział 4 odróżnia się od pozostałej części rozprawy i jest napisany w sposób stanowiący odrębną całość m.in. powtarzając definicje zmiennych podane w



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

rozdziale 2. Nie wpływa to korzystnie na spójność rozprawy jako jednego, spójnego dzieła naukowego.

Wszystkie powyższe krytyczne uwagi nie wpływają na moją wysoką ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Pali. Praca zawiera wartościowe i oryginalne wyniki dotyczące dwóch ważnych zagadnień: sprzęgaczy siatkowych dla nowej platformy $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ oraz pryzmatycznych struktur periodycznych wytwarzanych na powierzchni czołowej światłowodu do sprzęgania światła z układami optyki zintegrowanej. Przedstawione wyniki stanowią istotne osiągnięcia badawcze, które mogą przyczynić się do powstania nowych przyrządów fonicznych i mieć istotny wpływ na rozwój metod sprzęgania układów optyki zintegrowanej ze światłowodami.

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i może stanowić podstawę do nadania stopnia doktora nauk w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne. Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Warszawa, 21.04.2026

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński