



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

Warszawa, 19.04.2026

Dr hab. inż. Tomasz Osuch, prof. uczelni

Politechnika Warszawska

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Instytut Systemów Elektronicznych

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Pali

pt. „Siatki dyfrakcyjne sprzęgające światło do układów optyki planarnej: projektowanie, wytwarzanie i charakterystyka”

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Pali realizowana pod kierunkiem dr. hab. inż. Tadeusza Martynkiena prof. uczelni z Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Recenzję przygotowano na podstawie zawiadomienia nr 5/11/D11/2024 z dnia 19.11.2025 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.

Tematyka pracy dotyczy analizy i optymalizacji periodycznych struktur sprzęgających promieniowanie elektromagnetyczne z warstwami falowodowymi. Rozprawa napisana jest w języku polskim, liczy 123 strony i składa się z 5 rozdziałów oraz dodatkowo bibliografii zawierającej 130 pozycje anglojęzyczne i paragrafu podsumowującego dorobek naukowy doktoranta. Cytowana w pracy literatura to w przede wszystkim artykuły naukowe, zarówno te najnowsze ukazujące ostatnie osiągnięcia jak również starsze zawierające fundamentalną wiedzę związaną z tematyką doktoratu. Ich dobór jest bardzo trafny i stanowi doskonałe źródło uzupełnienia wiedzy dla wnikliwego czytelnika. Praca częściowo finansowana ze środków programu TEAM-NET Fundacji na rzecz nauki polskiej oraz finansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach projektu badawczego nr: POIR.04.04.00-00-14D6/18 „Hybrydowe platformy czujnikowe zintegrowanych układów fotonicznych na bazie materiałów ceramicznych i polimerowych (HYPha)” oraz ze środków programu OPUS Narodowego Centrum Nauki nr UMO-2019/35/B/ST8/03736: „Wysokorozdzielcza litografia optyczna i elektronowa przy użyciu rezystów na bazie cieczy jonowych”.

Przechodząc do analizy merytorycznej rozprawy, otwiera ją rozdział wprowadzający, nakreślający tło teoretyczne oraz uzasadniający obrany kierunek badań. Autor prezentuje w nim zwięzłą syntezę zagadnień z obszaru optyki planarnej, uwzględniając różnorodność platform technologicznych oraz akcentując kluczową rolę sprzęgaczy siatkowych w układach optyki zintegrowanej. Z przedstawionego opisu



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

wyłania się spójna wizja motywacji oraz jasno zdefiniowany zakres pracy. Szczególną uwagę poświęcono przewagom sprzęgaczy wertykalnych nad rozwiązaniami horyzontalnymi w kontekście testowania układów fotoniki scalonej. Do najważniejszych atutów omawianego podejścia zaliczono:

- elastyczność projektową: możliwość wprowadzania światła do chipu w dowolnym miejscu układu, nie tylko na krawędziach chipu;
- mniejsze wymaganie dotyczące dokładności pozycjonowania światłowodu względem siatki dyfrakcyjnej w celu zapewnienia efektywnego sprzęgania promieniowania elektromagnetycznego;
- znaczną redukcję kosztów i czasu wytwarzania poprzez zastąpienie wieloetapowych procesów technologicznych tańszymi metodami alternatywnymi.

W rozdziale tym doktorant zawarł dwie tezy rozprawy o następującym brzmieniu:

Teza 1: Platforma materiałowa bazująca na ceramikach $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$ uzyskanych metodą zol-żel umożliwia wytwarzanie sprzęgaczy wertykalnych;

Teza 2: Periodyczne struktury wytwarzane na powierzchni czołowej światłowodu metodami nanoimpruntu i nanoprintu, umożliwiają sprzęganie światła do falowodów oraz jego detekcję.

Oceniając sensowność stawianych tez badawczych, należy podkreślić ich wysoki potencjał aplikacyjny. Autor słusznie zauważa, że synteza ceramiki $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$ metodą zol-żel otwiera możliwość modyfikacji współczynnika załamania w szerokim zakresie od 1,4 do 2,3. Istotnym dopełnieniem wyboru tej platformy materiałowej jest jej długofalowa stabilność fizykochemiczna otrzymanego materiału, co jest niezwykle istotne w kontekście praktycznych zastosowań. Równie uzasadnione jest oparcie technologii wytwarzania sprzęgaczy na czole światłowodu na metodach nanoimpruntu oraz nanoprintu. Autor trafnie identyfikuje je, jako efektywną i ekonomicznie uzasadnioną alternatywę dla wysokobudżetowych i czasochłonnych procesów litograficznych, co czyni proponowane rozwiązanie wysoce konkurencyjnym.

Rozdział 2 poświęcono analizie sprzęgacza siatkowego wytworzonego na falowodzie grzbietowym, co bezpośrednio odnosi się do pierwszej tezy rozprawy. W tej części pracy doktorant dokonał znaczącej optymalizacji modelu numerycznego służącego do wyznaczania efektywności sprzęgania, opartego na metodzie elementów skończonych (FEM). Zaproponowane podejście zostało poddane weryfikacji pod kątem dokładności oraz efektywności obliczeniowej w porównaniu z algorytmem oryginalnym. Optymalizując położenie światłowodu względem siatki dyfrakcyjnej (dla długości fali 1550 nm), uzyskano wysoką zgodność z modelem wyjściowym (różnica na poziomie zaledwie 3%), przy jednoczesnej spektakularnej redukcji czasu obliczeń – ze 124 godzin do niespełna 14 minut. Powyższe osiągnięcia dowodzą głębokiego zrozumienia problemu przez doktoranta oraz jego twórczego podejścia do zagadnień numerycznych. Zaproponowane innowacyjne rozwiązanie stanowi istotne usprawnienie warsztatu badawczego, pozwalając na radykalne przyspieszenie procesów projektowych.



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

Na bazie opracowanego algorytmu obliczeniowego przeprowadzono badania numeryczne zależności efektywności sprzęgania od kontrastu współczynnika załamania oraz wysokości falowodu (a zatem i wysokości stopnia fazowego siatki). Na podstawie badań efektywności sprzężenia w funkcji stałej siatki dyfrakcyjnej wykazano, że dla substratu składającego się z warstw $\text{Si}:\text{SiO}_2$ uzyskuje się dużo lepsze efektywności sprzężenia niż dla pojedynczej warstwy SiO_2 z uwagi na odbicie promieniowania na granicy warstw $\text{Si}:\text{SiO}_2$ z powrotem w kierunku sprzęgacza. Kolejne wyniki symulacji wskazują, że przy projektowaniu sprzęgaczy największą uwagę trzeba zwracać na optymalny dobór okresu siatki i grubość warstwy falowodowej, gdyż efektywność sprzężenia jest najczulsza na zmianę tych parametrów. Przeprowadzone symulacje nie tylko wyznaczają kierunki optymalizacji konstrukcji sprzęgaczy siatkowych, ale posiadają również istotne znaczenie praktyczne. Zbadano wpływ niedoskonałości technologicznych (rozumianych jako odchyłki od optymalnych parametrów geometrycznych siatki) oraz tolerancji pozycjonowania światłowodu względem struktury siatkowej na efektywność sprzęgania. O wysokiej użyteczności tej części rozprawy świadczy fakt, że zaproponowane modele numeryczne posłużyły do opracowania biblioteki komponentów dla nowej platformy materiałowej opartej na zol-żelach $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ na potrzeby projektu badawczego nr: POIR.04.04.00-00-14D6/18 „Hybrydowe platformy czujnikowe zintegrowanych układów fotonicznych na bazie materiałów ceramicznych i polimerowych (HYPha)”.

Kluczowym elementem tej części pracy była eksperymentalna weryfikacja wyników numerycznych. Mimo napotkanych trudności w części eksperymentalnej – takich jak duże straty w falowodzie utrudniające precyzyjne wyznaczenie efektywności sprzęgania – badania potwierdziły, że światło z lasera (637 nm) zostało skutecznie wprowadzone do falowodu przez wykonaną siatkę dyfrakcyjną. Należy podkreślić rzetelność naukową autora, który nie unika analizy trudnych aspektów pracy i pomimo obiektywnych przeszkód zdołał uzyskać wartościowe wyniki, potwierdzające pierwszą tezę rozprawy.

Do tej części rozprawy mam następujące pytania:

W pracy znajduje się stwierdzenie *„Ze względu na ograniczenia technologiczne wysokości linii siatki nie były optymalizowane i wynosiły połowę wysokości falowodu”*, które wymaga głębszego wyjaśnienia:

- Jakie ograniczenia doktorant miał na myśli?
- Czy brak optymalizacji ma wpływ na ogólne wnioski płynące z analizy numerycznej?
- Dlaczego zdecydowano się na związanie wysokości stopnia fazowego z wysokością falowodu?
- Dlaczego w symulacjach przyjęto wysokość stopnia fazowego równą dokładnie połowie wysokości falowodu?

W rozdziale 3 przedstawiono wyniki badań nad opracowaniem technologii wytwarzania pryzmatycznych siatek dyfrakcyjnych na powierzchni czołowej światłowodu. W tym celu wykorzystano technologię nanoimpruntu z użyciem miękkich stempli wykonanych z PDMS. Doktorant prowadził prace technologiczne z wykorzystaniem różnych materiałów: zol-żeli (SiO_2 i ZrO_2) oraz cieczy jonowych.



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

Wybór tych materiałów został przekonująco uzasadniony w osobnym podrozdziale, w którym autor odwołał się do ich właściwości optycznych i mechanicznych na podstawie studiów literaturowych. Ostatecznie, ze względu na pękanie grubszych warstw zol-żeli ZrO_2 , co uniemożliwiło realizację pryzmatów na czołach światłowodów, badania skoncentrowano na pozostałych dwóch materiałach.

Doktorant dokonał krytycznej oceny wyników charakteryzacji i sformułował trafne wnioski. Wskazał na istotne różnice między właściwościami cieczy jonowych, a zol-żelami, takie jak lepkość, tendencja do skurczu podczas zestalania oraz dynamika i sposób utwardzania materiału (samoistne lub wspomagane promieniowaniem UV). W toku eksperymentów wykazano, że z technologicznego punktu widzenia lepszym materiałem są ciecze jonowe. Dzięki doskonaleniu procesu udało się uzyskać sprzęgacze siatkowe o kącie pryzmatu osiągającym 45° przy dokładności na poziomie $1,5^\circ$. Dla porównania, w przypadku zol-żeli SiO_2 , mimo znacznie mniejszego możliwego do uzyskania kąta (maks. 10°), rozrzut między założoną, a uzyskaną wartością był około dwukrotnie większy.

Na uznanie zasługuje różnorodność metod badawczych stosowanych do oceny jakości struktur, takich jak mikroskopia sił atomowych (AFM), pomiary rozkładów dyfrakcyjnych w polu dalekim oraz testy odporności na duże moce optyczne. Dobór metod jest przemyślany i właściwie uzasadniony. Analiza pola dalekiego została wsparta symulacjami numerycznymi z wykorzystaniem autorskiego modelu opartego na metodzie elementów skończonych (FEM).

Uzyskanie wysokiej zgodności pomiarów rozkładów dyfrakcyjnych z symulacjami oraz obrazowaniem AFM potwierdziło poprawność modelu numerycznego i skuteczność opracowanej technologii. Prezentowane wyniki mają dużą użyteczność praktyczną. Autor wskazał, które parametry w projektowaniu i wytwarzaniu sprzęgaczy siatkowych w największym stopniu wpływają ich na właściwości, a które można traktować mniej rygorystycznie.

W dalszej części rozdziału przedstawiono szczególne rozwiązanie dyspersyjnej siatki pryzmatycznej na czole światłowodu, umożliwiającej osiowe wyprowadzenie promieniowania rzędu $m=1$, które dodatkowo ulega silnemu rozszczepieniu przestrzennemu. Choć element ten nie służy do sprzęgania światła do falowodów, posiada duży potencjał aplikacyjny w filtracji oraz analizie spektralnej promieniowania. Doktorant przeprowadził szczegółową analizę tego rozwiązania, uzyskując dużą zgodność wyników teoretycznych z eksperymentalnymi. Sformułowane wytyczne projektowe są niezwykle użyteczne i nakreślają istotne ograniczenia technologiczne.

Do tej części pracy nasuwają się następujące pytania:

- Jakie mogą być przyczyny tego, że w wynikach numerycznych dla struktury typu I (SiO_2) unormowane intensywności w rzędach -1 i $+1$ dla długości fali 1300 nm nieco się różnią, a kąty ugięcia dla długości fal 1300 nm i 1630 nm nie są identyczne (tabela 3.1)? Pytanie to dotyczy również kątów ugięcia dla cieczy jonowej, w szczególności dla długości fal 1300 i 1550 nm (tabela 3.2).



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

- Co jest powodem, że w analizie struktur typu I i II z cieczy jonowych oraz typu II z SiO_2 znormalizowana intensywność promieniowania w rzędach $m=\pm 1$ maleje wraz ze wzrostem długości fali?
- Dlaczego suma znormalizowanych wydajności dyfrakcyjnych rzędów $m=0, 1$ i 2 dla niektórych okresów siatki przekracza 1 (rys. 3.22g-i)? W jaki sposób przeprowadzono unormowanie? Jeśli wyniki normowano względem największej intensywności, dlaczego żadna z charakterystyk na rysunkach 3.22h i 3.22i nie osiąga wartości jednostkowej?

Kluczowym elementem niniejszej rozprawy doktorskiej są wyniki badań przedstawione w rozdziale 4, które dotyczą analizy numerycznej oraz eksperymentów związanych z wprowadzaniem promieniowania elektromagnetycznego do warstwy falowodowej za pomocą sprzęgacza siatkowego wykonanego na czole światłowodu.

Na potrzeby analizy doktorant opracował dwa modele obliczeniowe:

- model uproszczony – wykorzystujący periodyczne warunki brzegowe, służący do poszukiwania optymalnych warunków rezonansu modów prowadzonych w układzie falowodu i siatki dyfrakcyjnej. Pozwala on na wyznaczenie punktu rezonansu poprzez modyfikację parametrów geometrycznych siatki oraz obserwację charakterystyk transmisyjnych i odbiciowych komórki periodycznej;
- model pełny – przeznaczony do wyznaczania efektywności sprzęgania w funkcji parametrów geometrycznych sprzęgacza siatkowego na powierzchni czołowej światłowodu.

Doktorant wykazał pełną zgodność obu modeli w zakresie poszukiwania optymalnych warunków rezonansu, wskazując jednocześnie na znaczący zysk czasowy przy zastosowaniu modelu uproszczonego.

W przeprowadzonych badaniach numerycznych efektywności sprzęgania promieniowania optycznego w układzie światłowód ze sprzęgaczem siatkowym – warstwa falowodowa przeanalizowano kilka istotnych i interesujących aspektów:

- optymalizacja parametrów sprzęgacza dla różnych platform materiałowych: opartej na zol-żelach $\text{SiO}_2:\text{TiO}_2$ oraz platformy o średnim kontraście współczynnika załamania na bazie azotku krzemu (Si_3N_4);
- wpływ rodzaju podłoża (samo SiO_2 oraz układ SiO_2 na Si) na występowanie rezonansów w charakterystyce efektywności sprzęgania w zależności od kąta pryzmatu;
- analiza błędów technologicznych, takich jak rozrzut okresu siatki i kąta pryzmatu, oraz ich wpływ na spadek efektywności sprzęgania;
- zwiększenie efektywności poprzez nałożenie na siatkę dyfrakcyjną cienkiej warstwy ZrO_2 o podwyższonym współczynniku załamania.

W celu udowodnienia drugiej tezy rozprawy wytworzono falowody z fotorezystu SU-8 na podłożu SiO_2/Si , co poprzedzono optymalizacją numeryczną. Zbudowano również specjalistyczny układ do eksperymentalnej weryfikacji efektywności sprzęgania. Straty w falowodzie oszacowano, opierając się na wynikach doświadczalnych oraz modelu numerycznym opracowanym w środowisku *Comsol Multiphysics* (moduł analizy modów własnych). Po uwzględnieniu tych strat uzyskano



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

wysoką zgodność wyników w efektywności sprzęgania, tj. 5,07 % (analiza numeryczna) oraz 4,45% (eksperyment). Tak bliskie wartości pozwoliły w sposób przekonujący dowieść słuszności drugiej tezy rozprawy.

W rozdziale 5. Autor w sposób zwięzły i przejrzysty podsumowuje osiągnięcia uzyskane w toku prowadzonych badań. Odczuwam jednak pewien niedosyt wynikający z braku wskazania potencjalnych kierunków dalszych prac oraz perspektyw rozwoju prezentowanej tematyki. Liczę, że doktorant rozwinie tę kwestię w trakcie publicznej obrony rozprawy.

Wyniki uzyskane w ramach niniejszej rozprawy opublikowano w czterech artykułach naukowych oraz zaprezentowano na pięciu krajowych i międzynarodowych konferencjach. Artykuły ukazały się w prestiżowych czasopismach z obszaru fotoniki, przy czym w trzech z nich doktorant pełnił wiodącą rolę jako pierwszy autor. Publikacje te potwierdzają wysoką jakość prezentowanych badań, wspartą pozytywnymi opiniami recenzentów w procesie wydawniczym.

Mam również kilka uwag natury ogólnej i redakcyjnej do recenzowanej rozprawy.

Uwagi ogólne:

- brak jednolitości w precyzji prezentowanych wyników w tabelach;
- niespójność opisów osi na wykresach (zamienne stosowanie symboli i pełnych nazw);
- niekonsekwencja w stosowaniu separatora dziesiętnego – w większości tabel i wykresów użyto kropki, podczas gdy w tekście poprawnie stosowany jest przecinek (wyjątek: tab. 2.1);
- brak ujednolicenia jednostek intensywności znormalizowanej. Stosowane są zamiennie oznaczenia: [a.u.], [j.a.] oraz [-];
- występują rozbieżności w symbolice, np. współczynnika załamania pryzmatu (oznaczenie n_{prism} na str. 72 oraz n_{grizm} na str. 86), efektywności sprzężenia (CE w rys. 4.5a, str. 90, EF w pozostałych rysunkach i opisach rysunków).

Uwagi redakcyjne:

Str. 1: Jest „gratting”, powinno być „grating”.

Str. 1. Jest „multipleksacja/demultipleksacja sygnału” powinno być „sygnałów”. Z definicji terminy te dotyczą zagadnień przesyłania wielu sygnałów.

Str. 2. Modulator M-Z jest pokazany na rys. 1.1d a nie na rys. 1.1c.

Str. 2. Jest „Macha Zehndera” powinno być „Mach-Zehnder’a”.

Str. 14. zamiast „stała sieci” powinno być „stała siatki”.

Str. 14. We wzorze (2.7) przy kącie θ pojawia się indeks dolny „fib”, chyba zbędnie.

Str. 15. jest „twierdzenie wzajemności”, powinno być „twierdzenie o wzajemności”.

Str. 18. Jest „Innym, interesującym rozwiązaniem wytworzenie”, powinno być „Innym, interesującym rozwiązaniem jest wytworzenie”.

Str. 19. Jest „Gaussowski” oraz „Gausowskki”, powinno być „gaussowski”.

Str. 24. Część podpisu rys. 2.6 ze strony 24 znalazła się na stronie 25.

Str. 26. We wzorze wiążącym wysokość stopnia fazowego z wysokością falowodu „fl” powinno być dolnym indeksem.



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

- Str. 32. W opisie tabeli 2.3 zabrakło „Si” na końcu zadania.
- Str. 34. W tekście przy długości fali „1561” zabrakło jednostki.
- Str. 34. Jest „politechnice Śląskiej” powinno być „Politechnice Śląskiej”.
- Str. 40. Jest „dwoma metodami” powinno być „dwoma metodami”.
- Str. 41. Jest „Technologia „laboratorium w światłowodzie ... jest nową klasą urządzeń optycznych...”. Jeśli technologia, to raczej wytwarzania nowej klasy urządzeń optycznych, lub termin określający nową klasę urządzeń optycznych wytworzonych w/na światłowodach.
- Str. 41. Jest „światłowodem optycznym”. Raczej nie stosuje się takiego połączenia, podajemy albo „światłowód” albo „włókno optyczne”.
- Str. 42. Jest „Są to jedno- oraz dwuwymiarowe siatki dyfrakcyjne jak i metamateriały”. To są różne kategorie. Może chodziło o siatki metamateriałowe?
- Str. 48. Jest „ferrulami FC/PC”, powinno być „złączami FC/PC”.
- Str. 48. Część podpisu rys. 3.4 ze strony 48 znalazła się na stronie 49.
- Str. 50. Jest „Dłuższe podstawy trapezu (b_s oraz b_f)”. W przytoczonych wymiarów wynika, że są to krótsze podstawy.
- Str. 54. Jest „wysokość pików dyfrakcyjnych”, a chodzi raczej o „moc w rzędach ugięcia”?
- Str. 64. W opisie wzoru (3.4) występuje wyjaśnienie symbolu n_1 , który w samym wzorze nie występuje.
- Str. 61 i 62. Podawana intensywność unormowana w tabelach 3.1 oraz 3.2 powinna być zdefiniowana formułą.
- Str. 67, 68 i 70, rys. 3.16f, rys. 3.17d, rys. 3.18d. Błędne wartości na osiach rzędnych.
- Str. 71. Jest „Za wyjściem światłowodu włókna”, powinno być „za światłowodem”.
- Str. 73. Jest „Na rys. 3.21(b) przedstawiono rozwiązanie rów. (1.5) ...”. Równanie o tym numerze w pracy nie występuje.
- Str. 86. Jest „we oprogramowaniu” powinno być „w oprogramowaniu”.
- Str. 91. Zamienione numery rysunków (rys. 4.6b z rys. 4.6c) w opisie wykresów.
- Str. 92. W opisie do rys. 4.6 prawdopodobnie podana jest nieprawidłowa wysokość stopnia fazowego $h_s=25$ nm.
- Str. 103. Brakuje wyjaśnienia symbolu P_{wg} występującego we wzorze (4.3).
- Str. 104. Brak wyjaśnienia symboli P_{in} , P_{out} , α_{GC} występujących we wzorze (4.4).
- Str. 103, rys. 4.18. Niefortunny skrót myślowy w opisie osi rzędnych „Moc wyjściowa falowodu”.

Podsumowanie:

Podjęta przez autora tematyka badawcza jest nie tylko aktualna, ale przede wszystkim istotna z punktu widzenia współczesnej nauki. Rozprawa skupia się na zagadnieniach oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z optycznymi strukturami periodycznymi, co stanowi cenny wkład w dyscyplinę nauk fizycznych. Szczególną wartość użytkową pracy dostrzegam w kontekście testowania i charakteryzacji układów fotoniki scalonej, przeżywającej obecnie intensywny rozwój. Wyniki przedłożonych badań mogą stanowić ważne źródło wiedzy dla specjalistów zajmujących się projektowaniem oraz technologią wytwarzania nowoczesnych elementów fotonicznych.



Instytut Systemów Elektronicznych

Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

Politechnika Warszawska

Należy podkreślić, że praca wymagała od doktoranta szeregu umiejętności: teoretycznych (z zakresu modelowania i projektowania struktur fotonicznych), praktycznych (związanych z opracowaniem technologii wytwarzania sprzęgaczy, weryfikacji eksperymentalnej, oraz budowy układów pomiarowych), oraz analitycznych (odnoszących się do analizy i interpretacji wyników badawczych). Powyższe umiejętności wraz z faktem, że praca oparta została na szerokiej współpracy naukowej doktoranta z innymi ośrodkami, świadczą o jego dojrzałości naukowej i potwierdzają jego zaradność i samodzielność w prowadzeniu badań naukowych.

*Podsumowując, będąca przedmiotem niniejszej recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Pali stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauki fizyczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W związku z powyższym stwierdzam, że przedłożona **rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami** i stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o **dopuszczenie do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.***