

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA i TECHNOLOGIE
KOSMICZNE**

zaprasza na

PUBLICZNĄ OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Mgr inż. Aleksandry Pańnikowskiej

która odbędzie się w dniu *19 grudnia 2025* roku o godzinie 12:00 (w trybie hybrydowym*)

w sali nr 116 gmachu Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych

ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa

Temat rozprawy doktorskiej:

„ Zintegrowane, wielokanałowe układy nadawczo-odbiorcze do zastosowań w sieciach dostępowych ”

Promotor: dr hab. inż. Ryszard Piramidowicz, prof. uczelni - Politechnika Warszawska

Promotor pomocniczy: dr inż. Stanisław Stopiński - Politechnika Warszawska

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Patryk Urban - Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki - Politechnika Wrocławska

dr hab. inż. Anna Szerling - Sieć Badawcza Łukasiewicz, Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

*w sprawie otrzymania linku do obrony na platformie MS Teams, proszę o kontakt z sekretarzem komisji doktorskiej dr. hab. inż. Michałem Józwikiem, prof. uczelni michal.jozwik@pw.edu.pl

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1. Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Automatyka-Elektronika-Elektrotechnika-i-Technologie-Kosmiczne/mgr-inz.-Aleksandra-Pasnikowska>

Przewodniczący Rady Naukowej
Dyscypliny Automatyka, Elektronika,
Elektrotechnika i Technologie
Kosmiczne Politechniki Warszawskiej
Prof. dr hab. inż. Paweł Szczepański

Prof. dr hab. inż. Patryk Urban

18/09/2025

.....
tytuł, stopień, imię i nazwisko recenzenta

.....
data

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie

.....
miejsce pracy

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: „Zintegrowane, wielokanałowe układy nadawczo-odbiorcze do zastosowań w sieciach dostępowych”

Autorka rozprawy: mgr inż. Aleksandra Paśnikowska

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autorkę?

Zagadnienie naukowe rozpatrzone w pracy dotyczy wielokanałowych układów nadawczo-odbiorczych wytwarzanych w generycznych technologiach fotoniki scalonej i przeznaczonych do zastosowań w elementach aktywnych sieci dostępowych tj. OLT i ONT/ONU wykorzystujących transmisję jednomodową i zwielokrotnienie w dziedzinie długości fali (WDM-PON) lub transmisję kilkumodową i zwielokrotnienie przestrzenne (SDM-PON).

Teza rozprawy postawiona przez Autorkę brzmi cyt. „Generyczne technologie fotoniki scalonej na platformie fosforku indu pozwala na wytworzenie w pełni funkcjonalnych układów scalonych do zastosowania w rzeczywistych systemach”.

Celem pracy było opracowanie zintegrowanych układów fonicznych nadawczo-odbiorczych od etapu projektu funkcjonalnego, przez przeprowadzenie symulacji oraz opracowanie topografii w celu fabrykacji fonicznych układów zintegrowanych, a skończywszy na zbadaniu próbek pod względem właściwości statycznych i dynamicznych. Fabrykacja próbek została przeprowadzona u partnerów zewnętrznych: Smart Photonics w Holandii i Fraunhofer HHI w Niemczech.

Zarówno teza oraz obrane cele zostały dostatecznie jasno sformułowane w przedmiotowej pracy.



2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W pracy przeprowadzono analizę źródeł w wystarczający sposób. Ilość odwołań do źródeł wynosi 275 i charakteryzuje je duża różnorodność: periodyki naukowe o światowej renomie (w tym m.in. z wydawnictw IEEE), źródła konferencyjne o uznanym statusie, rekomendacje, specyfikacje itd.

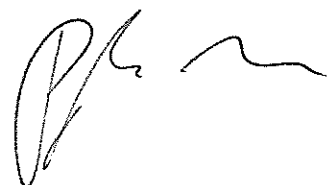
Taki dobór źródeł oraz ich adekwatne zastosowanie w rozprawie świadczy o dostatecznej wiedzy Autorki, znajomości współczesnej literatury i bardzo dobrym przygotowaniu Autorki do pracy naukowej.

3. Czy Autorka rozwiązała postawione zagadnienia, czy użyła właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Praca ma charakter głównie projektowy i doświadczalny z wykorzystaniem narzędzi projektowych, symulacyjnych oraz fizycznych z wykorzystaniem układu testowego emulującego rzeczywistą sieć dostępową.

Autorka zaprezentowała kompletne i poprawne rozwiązania naukowe do zdefiniowanych problemów. Przez kompletność w tym przypadku należy rozumieć: zdefiniowanie wymagań projektowych, projekty funkcjonalne układów, projekty topografii, projekty i realizacje systemów eksperymentalnych do badania i analizy właściwości statycznych i dynamicznych próbek potwierdzających działanie układów.

Zasadność założeń dotyczących funkcjonalności wykorzystanych elementów w projektowanych układach oraz funkcjonalności tychże układów jako podzespołów w systemach ONT i OLT nie budzi większych zastrzeżeń. Jednakże wybór rekomendacji sieci dostępowej GPON G.984 jako punktu odniesienia dla projektowanych układów (strona 29, Tabela 3 przedmiotowej pracy) powinien zostać bardziej szczegółowo uzasadniony i później przedyskutowany w odniesieniu do konkretnych parametrów technicznych np. długość fali, klasa optyki, pasmo modulacji itd. dotyczących zaprojektowanych, wykonanych i przebadanych próbek. Warto byłoby uzasadnić dokonany wybór rekomendacji GPON w porównaniu do niewymienionej w Tabeli 2 str 25 rekomendacji G.9802. GPON nie wspiera zwielokrotnienia w dziedzinie długości fali (WDM) ani modulacji 10Gbps na kanał falowy. Rekomendacja GPON dedykuje jedynie pojedynczy kanał falowy na dany kierunek transmisji (nie w pasmach, na których badane były próbki) przy maksymalnej modulacji 2.5Gbps. Symetryczna modulacja 10Gbps w systemach opartych o dzielnik mocy jest przewidziana w rekomendacji uznawanej za pochodną GPON tzn. XGS-PON (G.9807). Natomiast transmisja WDM w sieci dostępowej jest przewidziana w innej generacji sieci PON (G.9802), gdzie każdy kanał ma wspierać transmisję 10-25Gbps. Rekomendacja ta przewiduje wykorzystanie różnych architektur w sekcji dystrybucyjnej sieci PON (AWG i/lub dzielnik mocy), co częściowo może mogłoby uprościć kwestię filtrowania kanałów falowych w projektowanych układach nadawczo-odbiorczych. Kolejną – równie istotną – rekomendacją jest NGPON2 (G.989), który można uznać za „stacked-XGS-PON” wykorzystujący 4-8 kanałów falowych do implementacji transmisji paru systemów w oparciu o TDM (na wzór XGS-PON) na jednej infrastrukturze światłowodowej z dzielnikiem mocy.



Powyższe należy uznać za brak wystarczającego uszczegółowienia w zakresie dot. założeń projektowych. Należy jednak zaznaczyć, że nie rzutuje to na wartość naukową przedmiotowej pracy.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autorki, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność i wartość naukowa rozprawy opierają się na opracowaniu innowacyjnych modułów nadawczo-odbiorczych do wielokanałowych światłowodowych sieci dostępowych, które wykorzystują włókna jednomodowe oraz, jako wątek dodatkowy w rozprawie, włókna kilkumodowe. Autorka udowodniła działanie zaprojektowanych obwodów fotonicznych w systemie testowym PON z wykorzystaniem modułów wykonanych na wybranej platformie materiałowej u partnerów zewnętrznych. Praca zawiera oryginalne osiągnięcia Autorki, które na tle zaprezentowanego stanu wiedzy stanowią wyraźny krok w rozwoju techniki.

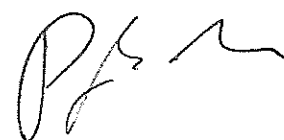
Oryginalność wyników, ich adekwatność oraz wartość naukowa została udowodniona publikacjami recenzowanymi. Przegląd najważniejszych osiągnięć został podsumowany w Rozdziale 8. przedmiotowej pracy. Zamieszczony tamże zestaw całkowitego dorobku Autorki zawiera wyraźnie zaznaczone oryginalne pozycje związane z tematyką rozprawy. Na wyróżnienie zasługuje duża aktywność Autorki w zakresie propagowania osiągnięć na istotnych wydarzeniach naukowych. W wielu publikacjach kandydatka jest wymieniona jako pierwsza Autorka, co świadczy o tym że była pomysłodawcą rozwiązań lub przynajmniej pełniła wiodącą rolę w powstaniu publikacji. Na szczególne wyróżnienie zasługuje współautorstwo licznych topografii układów scalonych, które uzyskały ochronę własności intelektualnej, co jest raczej rzadko spotykane na tym etapie kariery naukowej.

5. Czy Autorka wykazała umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Praca składa się z 9 numerowanych sekcji w tym „Podsumowanie” i „Bibliografia”. Na wyróżnienie zasługuje umieszczenie bardzo zrozumiałej, czytelnej sekcji wprowadzającej temat projektowania fotonicznych układów zintegrowanych. Dodanie sekcji z wykazem użytych w pracy skrótów byłoby bardzo przydatne dla odbiorcy.

Autorka wykazała się umiejętnością przekonującego, jasnego, zwięzłego, merytorycznego i stylistycznego przedstawienia przez siebie wyników. Należy podkreślić, że praca została bardzo dobrze osadzona w kontekście sieci FTTx i konkretnych wyzwań technicznych związanych z zastosowaniem proponowanych rozwiązań.

Przedstawione wyniki wskazują na bardzo dobrą jakość sygnału (brak tzw. „error floor” na wykresach BER nawet na poziomach niższych niż $\log(\text{BER}) = -9$), która pod względem potencjalnych zastosowań opracowanych układów jest warunkiem krytycznym. Czytelnik pozostaje jednak z lekkim niedosytem w zakresie analizy sygnału – np. na str. 140 stwierdzenie „(...) wartość współczynnika ekstynkcji maleje wraz ze wzrostem szybkości transmisji” nie daje odpowiedzi na pytanie o przyczynę takiego zachowania: czy jest to efekt działania układu nadawczego, ograniczenie pasma po stronie elektrycznego systemu testowego itd. Nie jest też jednoznacznie stwierdzone skąd wynika różnica w wartościach współczynnika ekstynkcji między Tabelami nr 18, 19 i 20 sięgająca wielu dB. W Tabeli nr 23



zniekształcenie diagramu oka dla CH16 na poziomie sygnału wysokiego (logiczne „1”) pokazuje pewną nieliniowość tj. dłuższy czas narastania wraz ze zbliżaniem się do poziomu maksymalnego. Narzędziem przydatnym w analizie diagramu oka jest tzw. maska diagramu oka, która posiada określone parametry, pomagające ustalić zgodność sygnału z rekomendacjami. Np. dla systemu XGS-PON (10Gbps/10Gbps) maska diagramu oka zdefiniowana jest w G.9807.1. Bardziej szczegółowa analiza wyników dałaby podstawy do nakreślenia dalszej drogi optymalizacji i rozwoju układu.

Ponadto z treści rozprawy nie wynika dlaczego zastosowano jedynie 5km włókna w systemie testowym, podczas gdy przywoływane rekomendacje przewidują dystanse przekraczające nawet 20km, a dla systemów PON typu long-reach lub extended-reach sięgają nawet 40-60km. Należy dodać, że w praktyce dystanse sieci PON najczęściej zawierają się w przedziale 10-20km.

W pracy widoczne są nieliczne błędy strony redakcyjnej, jednak nie wpływają one znacząco na czytelność pracy ani tym bardziej na jej wartość naukową. Do takich uchybień należy zaliczyć: nieczytelność niektórych grafik np. rys. 20, rys. 75c, rys. 81 (brak jednostki na osi X), gramatyka w pierwszych akapitach sekcji 4.2.2. i 4.4.2., czy zapożyczenia z języka angielskiego mające już swoje odpowiedniki w języku polskim (np. str. 31 „warstwa korowa” to „warstwa szkieletowa”).

6. Jaka jest przydatność rozprawy z punktu widzenia nauk technicznych?

Praca odnosi się do rzeczywistej i bieżącej problematyki technicznej w rozwoju sieci PON, nad którymi pracują wiodące akademickie ośrodki naukowe i przemysłowe jednostki badawczo-rozwojowe na świecie. W szczególności dotyczy to właśnie wydajnych wspierających szerokie pasmo modulacji fotonicznych zintegrowanych modułów nadawczo-odbiorczych do zastosowań w sieciach najnowszych generacji ze zwielokrotnieniem w dziedzinie długości fali. Wkład przedmiotowej pracy w rozwój nauk technicznych w skali globalnej jest widoczny i znaczny natomiast w skali krajowej ze względu na brak przemysłowych ośrodków R&D zajmujących się rozwojem warstwy fizycznej światłowodowych sieci dostępowych obecnie przydatność ogranicza się głównie do świata naukowego akademickiego.

7. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rozprawa nie zawiera istotnych wad wpływających na przekaz lub wartość naukową. Wymienione wcześniej niedociągnięcia szczególnie w zakresie analizy założeń technicznych (kwestia wyboru rekomendacji ITU jako punktu odniesienia dla projektowanych układów) stanowią znikome uchybienia. Do innych nieznaczących uchybień należy zaliczyć:

- a. Brak precyzyjnej definicji sieci PON. Kwestią otwartą w branży sieci dostępowych pozostaje definicja pasywnych sieci optycznych, gdzie „pasywność” najczęściej rozumiana jest jako brak elementów wymagających zasilania w sekcji dystrybucyjnej sieci PON – co zgodne jest z definicją zawartą w rozprawie na str. 23. Warto jednak zaznaczyć, że rekomendacje ITU przewidują zastosowanie w sekcji dystrybucyjnej sieci PON wzmacniaczy (ang. reach extenders) np. G.984.6 dla GPON lub G.9807.2 dla XGS-PON, które ze swojej natury wymagają zasilania. W związku z tym w/w definicję sieci PON coraz częściej uszczegóławia się poprzez wyraźne zaznaczenie, że w



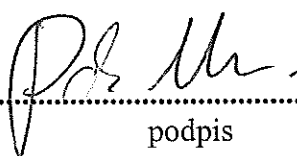
odróżnieniu od ang. *Active Optical Network (AON)* obszar dystrybucyjny sieci *Passive Optical Network (PON)* nie wymaga aktywnego węzła (np. router'a).

- b. Niepoprawna definicja FSAN. Na str. 24 przedmiotowej pracy FSAN określono jako grupę, w której opracowywane są standardy sieci dostępowych. Należy jednak wyjaśnić, że pokutuje tu powszechne postrzeganie tej organizacji, które od lat echem odbija się w różnych publikacjach. W praktyce i od strony formalnej organizacja ta jest jedynie zrzeszeniem grupy operatorów telekomunikacyjnych i producentów sprzętu telekomunikacyjnego, którzy cyklicznie debatuje na temat technicznych aspektów sieci PON kolejnych generacji. Efektem tychże debat są niewiążące dokumenty techniczne, które przekazywane są do prac nad wiążącymi rekomendacjami np. w ITU. Dopiero zatwierdzone rekomendacje (np. ITU) są powszechnie dostępnymi dokumentami stanowiącymi wytyczne dla sektora telekomunikacyjnego.
- c. Brak wytyczenia następnych potencjalnych kroków w rozwoju koncepcji w kierunku np. zwiększenia zasięgu zaproponowanych układów nadawczo-odbiorczych, wykorzystania zaawansowanych technik modulacji, zastosowania gęstszej siatki WDM itd.

8. Czy rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy?

Praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem pracy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego udokumentowane publikacjami naukowymi. Praca została napisana w języku polskim i zawiera streszczenie w języku angielskim.

Przedmiotowa praca spełnia z nadmiarem wymagania – ze względu na uzyskaną ochronę własności intelektualnej dot. wielu topografii układów scalonych – stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z art. 187 Dz.U.2023.742 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.


.....
podpis

Wrocław, 21.07.2025

Prof. dr hab. inż. Sławomir Sujecki
Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki
Politechnika Wrocławska

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Pańnikowskiej

Analiza właściwości nieliniowego przyciągania polaryzacji jako narzędzia do kontroli polaryzacji sygnału w światłowodowych systemach transmisyjnych

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

W pracy sformułowano następującą tezę:

Generyczna technologia fotoniki scalonej na platformie fosforku indu pozwala na wytworzenie układów o kompaktowych rozmiarach i zoptymalizowanych kosztach wytwarzania, o cechach funkcjonalnych pozwalających na łatwe skalowanie pojemności informacyjnej łączy w systemach dostępowych i radykalne zwiększenie niezawodności.

Natomiast cel pracy jest sformułowany następująco:

Głównym celem pracy było zaprojektowanie, wytworzenie w technologiach generycznych i zbadanie serii fotonicznych układów scalonych przeznaczonych do zastosowań w układach nadawczo-odbiorczych sieci dostępowych ze zwielokrotnieniem w dziedzinie długości fali (WDM-PON – ang. wavelength division multiplexing passive optical network).

Cele i teza rozprawy zostały sformułowane jasno.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

Spis literatury zawiera 275 pozycji, przy czym około 100 odnosi się do wiodących czasopism naukowych z zakresu fotoniki i telekomunikacji optycznej, t.j. Journal of Lightwave Technology, IEEE Photonics Technology Letters, Optics Express, Nature Photonics, Electronics Letters, Optics Letters, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, itd. Ponadto spis literatury zawiera odnośniki do wiodących konferencji naukowych z zakresu telekomunikacji światłowodowej, t.j. ECIO, ECOC, OFC, książek, dokumentów normalizacyjnych ITU-T oraz wielu stron internetowych, które zawierają wiele dodatkowych informacji. Stwierdzam zatem, że w mojej opinii analiza źródeł została przeprowadzona w sposób właściwy i stanowi wiernie odwzorowanie obecnego stanu wiedzy w zakresie rozważanej tematyki. Ponadto należy podkreślić, że zawarty spis literatury jest obszerny jak na pracę doktorską i świadczy o starannym zapoznaniu się z literaturą światową. Dla czytelnika zaś stanowi ono cenne źródło wiedzy. Mam jedną uwagę dotyczącą korzystania z literatury, a mianowicie: na stronie 74 brakuje odnośnika do spisu

literatury po zdaniu 'W tej pracy wykorzystano projekt multipleksera AWG opracowany przez zespół z Technische Universiteit Eindhoven w Holandii w zestawie PDK SMART Photonics.'

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W pracy zaprojektowano węzeł OLT (ang. optical line termination) i jednostkę ONU (ang. optical network unit) dostępowej pasywnej sieci optycznej PON (ang. passive optical network). W projekcie wykorzystano technologię optyki scalonej na platformie fosforku indu. Projekty zrealizowano dzięki współpracy z dwoma instytucjami, a mianowicie SMART Photonics i Fraunhofer Heinrich Hertz Institute. Do prac projektowych wykorzystano program OptoDesigner dostarczony przez firmę Synopsys. Przygotowano trzy generacje projektów OLT i ONU. Dwie pierwsze generacje wykonano we współpracy z firmą SMART Photonics zaś ostatnią generację we współpracy z SMART Photonics i Fraunhofer Heinrich Hertz Institute. W ostatniej generacji uwzględniono wytyczne dotyczące procesu packagingu podane przez firmę Cordon Electronics. Wytworzone układy optyki scalonej poddano kompleksowym testom laboratoryjnym. W ramach przeprowadzonych prac badawczych zmierzono charakterystyki spektralne oraz zależność mocy od prądu zasilającego laserów, charakterystyki przejściowe modulatora Macha Zehndera, charakterystykę transmisji modulatora elektroabsorbcyjnego, charakterystyki spektralne multipleksersów AWG, diagramy oka oraz elementową stopę błędu BER (ang. bit error rate).

Ponadto zaprojektowano i przetestowano nadajnik wielokanałowy dla światłowodów kilku-modowych. Nadajnik ten został zrealizowany w technologii optyki scalonej przez SMART Photonics.

W podsumowaniu według mojej opinii postawione zagadnienia zostały rozwiązane przy użyciu właściwych metod zaś przyjęte założenia są uzasadnione.

Ponadto mam kilka pytań odnośnie samego projektu, które w kontekście zrealizowanych zadań wydają mi się warte rozważenia:

1. Czy opracowane układy scalone można umieścić wewnątrz wkładki SFP lub innej stosowanej standardowo w telekomunikacji?
 2. Czy rozważono możliwość sterowania zrealizowanych układów optyki scalonej za pomocą układów FPGA?
 3. Czy rozważono zastąpienie modulatora zewnętrznego przez bezpośrednią modulację diody laserowej?
 4. Czy rozważono detekcję koherentną?
4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy polega na opracowaniu węzła OLT i jednostki ONU

dostępowej pasywnej sieci optycznej PON, a także wielokanałowego kilkumodowego nadajnika w technologii optyki scalonej. Samodzielny i oryginalny dorobek autora stanowi zaprojektowanie układów optyki scalonej oraz kompleksowa weryfikacja eksperymentalna poprawności działania zaprojektowanych i zrealizowanych układów optyki scalonej.

Według mojej opinii uzyskane wyniki nie odbiegają od wyników i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

W mojej opinii wyniki są przedstawione w sposób poprawny i przekonujący. Liczne rysunki ułatwiają zrozumienie prezentowanych zagadnień. W sposób poprawny wykorzystano tabele i różne rodzaje wykresów w celu poparcia wniosków. Jednakże w kilku miejscach trudno jest przeczytać tekst umieszczony na rysunkach gdyż użyta czcionka jest zbyt mała. Na przykład, na stronie 58 na rysunku 23 czcionka jest tak mała, iż trudno jest przeczytać tekst bez szkła powiększającego. Podobny problem występuje na stronie 80, rys.38, 93, rys. 49, 105, rys. 59, 110, rys. 64, 122, rys.75. Ponadto na stronie 141, rysunek 92 kolory kropek są tak dobrane, że nie można rozróżnić wyników otrzymanych dla przypadku 10 Gbit/s: B2B i 5 km.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

W ramach przeprowadzonych badań opracowano węzeł OLT i jednostkę ONU dostępowej pasywnej sieci optycznej PON oraz wielokanałowy nadajnik kilkumodowy w technologii optyki scalonej. Według mojej wiedzy żadna firma w Polsce nie ma opracowanej jakiegokolwiek technologii wytwarzania węzłów OLT lub jednostek ONU ani też jakiegokolwiek technologii wytwarzania jakichkolwiek nadajników lub odbiorników optycznych w technologii PON, Ethernet lub WDM. Uważam zatem, że przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych jest bardzo duża.

Biorąc pod uwagę przedstawioną rozprawę doktorską stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego wnoszę o przyjęcie niniejszej rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Aleksandry Pańnikowskiej do publicznej obrony.

Stanisław Szpile

dr hab. inż. Anna Szerling
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut
Mikroelektroniki i Fotoniki
Al. Lotników 32/46
02 - 668 Warszawa

Warszawa, 16/11/2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandry Pańnikowskiej
p.t. „Zintegrowane, wielokanałowe układy nadawczo – odbiorcze do zastosowań w sieciach
dostępowych”**

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Pańnikowskiej została wykonana pod kierunkiem Promotora dra hab. inż. Ryszarda Piramidowicza, prof. uczelni; Promotora pomocniczego dra inż. Stanisława Stopińskiego, gdzie celem pracy było zaprojektowanie i wytworzenie fotonicznych układów scalonych do zastosowań w układach nadawczo – odbiorczych sieci dostępowych.

Doktorantka w recenzowanej rozprawie zaprojektowała i wytworzyła serię fotonicznych układów scalonych. Obecnie fotonika scalona jest jedną z najważniejszych dziedzin rozwoju w zakresie nowoczesnych systemów opartych na wysokich technologiach, umożliwia wytwarzanie zminiaturyzowanych, wysokowydajnych i niskoenergetycznych systemów do szerokiego spektrum aplikacji. Nadal pozostaje na wczesnym etapie rozwoju i konieczne jest jej rozwijanie.

Recenzowana rozprawa obejmuje rozważania teoretyczne, prace technologiczne oraz pomiarowe. Autorka w recenzowanej rozprawie:

- 1) przedstawiła projekty fotonicznych układów scalonych dla III generacji wielokanałowych układów nadawczo - odbiorczych;
- 2) zademonstrowała wytworzone fotoniczne układy scalone;
- 3) przedstawiła optymalną konstrukcję układu;
- 4) scharakteryzowała i przeprowadziła analizę pomiarów wykonanych układów.

Wyniki opisane w rozprawie zostały opublikowane w artykule w czasopiśmie Journal of Lighthwave Technology i w kilku materiałach pokonferencyjnych, w których Doktorantka była pierwszym Autorem, co dowodzi Jej kluczowej roli w realizowanych badaniach.

Praca składa się z ośmiu rozdziałów. Część pierwsza, obejmująca rozdziały 1–3, poświęcona jest wprowadzeniu w temat rozprawy, opisowi systemów dostępowych oraz obszernemu przedstawieniu

fotonicznych układów scalonych, metod projektowania, a także możliwości technologicznych i eksperymentalnych. Opis jest szczegółowy i w dużej mierze prawidłowo przygotowany.

Warto jednak doprecyzować kilka kwestii. W opisie technologii generycznej rysunek 13 może wprowadzać w błąd bez dokładniejszego wyjaśnienia sposobu tworzenia poszczególnych elementów, szczególnie w odniesieniu do studni kwantowych i ich położenia w strukturze. Doktorantka wskazuje również, że czteroskładnikowe związki półprzewodnikowe opisuje się m.in. długością fali absorpcji— w tym miejscu przydałoby się pełniejsze wyjaśnienie, co Autorka chciała podkreślić (str. 48). Kolejna kwestia dotyczy przedstawienia współczynnika załamania dla falowodu z fosorku indu bez dodatkowego omówienia, skąd wynika różnica we współczynnikach załamania rdzenia i płaszcza wykonanego z tego samego materiału (str. 49). W tej części brakuje również jednoznacznego przedstawienia, z jakich powodów w danych rozwiązaniach wybierane są lasery DBR, a w innych DFB, choć oczywiste jest, że oba typy mają swoje zalety, w rozprawie nie wyjaśniono jasno kryteriów decydujących o wyborze konkretnych konstrukcji.

W rozdziale 4 Autorka przedstawia zasady projektowania układów fotoniki scalonej ASPIC, omawiając zarówno podstawowe elementy funkcjonalne stosowane w tego typu strukturach, jak i uwarunkowania technologiczne związane z ich implementacją. Na uwagę zasługuje klarowne opisanie dwóch kluczowych, europejskich producentów, Smart Photonics oraz Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, którzy realizują projekty ASPIC na podstawie dostarczonych projektów. Autorka trafnie podkreśla, że projektowanie finalnego układu musi uwzględniać dostępne w tych foundry bibliotekowe bloki i moduły, co narzuca określone ograniczenia projektowe i wymaga dopasowania architektury układu do możliwości technologicznych obu platform. Rozdział stanowi więc przemyślane i poprawne wprowadzenie do praktycznych aspektów projektowania układów fotoniki scalonej. Autorka nie uniknęła w tej części pewnych braków. W części dotyczącej falowodów pasywnych brakuje głębszej analizy, z czego wynika lepsza lokalizacja modu w strukturach głęboko trawionych. Dodatkowy opis w sekcji wyjaśniającej drogę dudnień, zwłaszcza uwzględniający parametr liczby obrazów, ułatwiłby odbiór tej części pracy. W części poświęconej zwierciadłom Braggowskim warto byłoby również szerzej omówić zjawisko zmiany efektywnego współczynnika załamania oraz jego wpływ na przestrajanie lasera. Niejasny jest również rysunek nr 42, brakuje odniesienia gdzie dokładnie znajdują się porty optyczne. Niemniej jednak wskazane niejasności nie umniejszają wartości całej rozprawy ani znaczenia uzyskanych przez Doktorantkę wyników.

W kolejnych częściach rozprawy (rozdziały 5–7) Autorka przedstawia analizę wykonanych przez siebie projektów oraz prac eksperymentalnych.

Rozdział 5 poświęcony jest prezentacji projektów topografii trzech generacji układów nadawczo-odbiorczych przeznaczonych do zastosowań w systemach WDM-PON. Dla każdej z generacji Autorka przedstawiła projekt funkcjonalny, projekty topografii oraz wyniki badań. Wyniki te obejmowały

najważniejsze parametry zaprojektowanych układów optycznych, a także analizę wpływu warunków pracy układów na ich parametry funkcjonalne. Istotnym elementem tej części pracy jest iteracyjny charakter procesu projektowego, który umożliwił uzyskanie konstrukcji optymalnej poprzez uwzględnianie rezultatów z poprzednich iteracji. Podczas lektury tej części nasuwają się pytania, czy nie lepszym rozwiązaniem byłyby lasery DFB. Równie interesujące byłoby odniesienie się do aktualnego trendu w fotonice, jakim jest stosowanie podfalowych siatek w przyrządach fotonicznych. Zdaję sobie sprawę, że Autorka przy projektowaniu przede wszystkim brała pod uwagę dostępne elementy w bibliotekach producentów, u których następnie zamawiała wykonane systemy. Niemniej jednak, czysto badawczo ciekawa byłaby część wyjaśniająca lub pokazująca od strony projektowej te zagadnienia. Nie było również jednoznacznej informacji, czy przy projektowaniu układów uwzględniono wpływ warunków zasilania na działanie elementów optycznych. Dodatkowo warto wyjaśnić, dlaczego na rys. 50 nie uwzględniono wszystkich znajdujących się tam elementów, a omawianych potem w tekście. Brakuje również jasności, czy wszystkie porównywane lasery DBR miały tylne siatki umieszczone w tej samej odległości. W tej części pracy przydałaby się również głębsza analiza zjawisk zachodzących w laserach o różnych długościach wzmacniacza oraz wpływu długości wzmacniacza na przestrajalność laserów. Wątpliwości budzą także wartości stałych siatek podanych w tab. 15 (str. 108), nie jest jasne, w jaki sposób zostały one wyznaczone, czy są średnią z pomiarów różnych siatek oraz czy możliwe jest uzyskanie tak dokładnych wartości (do drugiego miejsca po przecinku w nanometrach). Brak również głębszej analizy jakie są różnice w przypadku zjawiska związanego z mode hopping w stosunku do zjawiska określanego jako roll over, w części dotyczącej laserów DBR. Brakuje również jednoznacznej informacji jak były zasilane tylne siatki braggowskie i skąd pewność, że obserwowane zmiany nie wynikają np. z ucieczki nośników, czy też z efektów termicznych związanych z zasilaniem lasera. Autorka mogłaby dodatkowo omówić wpływ niedoskonałości produkcyjnych zwierciadeł DBR na tak istotne zmiany parametrów, co pozwoliłoby lepiej zrozumieć przyczyny obserwowanych efektów (str. 124). Rozwinięcie zagadnienia dotyczącego dyskretnych zmian długości fali lasera (str. 128) byłoby pomocne dla czytelnika. Niemniej jednak wskazane niejasności nie umniejszają wartości całej rozprawy ani znaczenia uzyskanych przez Doktorantkę wyników.

W rozdziale 6 Autorka przedstawiła wynik dotyczące badania transmisji ostatecznej generacji optycznych układów scalonych. Jest to bardzo ważny element prowadzonych badań, gdyż dzięki temu możliwe jest sprawdzenie funkcjonalności układu. Rozdział zawiera bardzo ważne i interesujące wyniki.

W rozdziale 7 Doktorantka przedstawiła wyniki badań nad zastosowaniem zaprojektowanych i wykonanych w ramach doktoratu optycznych układów scalonych w systemach nadawczych sieci ze zwielokrotnieniem przestrzennym, obejmowały one zaprojektowanie całości i zbadanie właściwości nadajnika. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają, że optyczne układy foniczne posiadają

ogromny potencjał i możliwe jest ich stosowanie nie tylko w nadajnikach w sieciach ze zwielokrotnieniem w dziedzinie długości fali ale można je też stosować w nowych metodach zwielokrotniania sygnałów optycznych. Rozprawa ma dużą wartość naukową, wynikającą ze starannie przeprowadzonych badań oraz ich praktycznej implementacji i weryfikacji. Wyniki uzyskane przez Autorkę są solidne i sprawdzone w rzeczywistych zastosowaniach, co dodatkowo podnosi znaczenie pracy. Dla pełniejszego osadzenia tych osiągnięć w kontekście międzynarodowym mogłoby być pomocne syntetyczne zestawienie aktualnych trendów i wyników osiąganych na świecie, np. w formie tabeli, co jeszcze wyraźniej uwidoczniłoby pozycję przedstawionych badań.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie.

W rozprawie Doktorantka jasno i jednoznacznie sformułowała cel pracy, którym było zaprojektowanie oraz wytworzenie fotonicznych układów scalonych przeznaczonych do zastosowań w nadawczo-odbiorczych systemach sieci dostępowych. Kolejne rozdziały w sposób przejrzysty pokazują realizację przyjętego celu, prowadząc czytelnika przez spójny tok prac projektowych i eksperymentalnych. Postawione zadania badawcze zostały rozwiązane w sposób przekonujący, z zastosowaniem właściwych metod projektowych, symulacyjnych i eksperymentalnych. Przyjęte założenia są uzasadnione i konsekwentnie realizowane. Całość badań została przeprowadzona na wysokim poziomie merytorycznym. Oryginalność rozprawy polega przede wszystkim na opracowaniu, zaprojektowaniu i wytworzeniu nowych fotonicznych układów scalonych, które następnie zostały zaimplementowane i przetestowane w rzeczywistych systemach nadawczo-odbiorczych. Przedstawione rozwiązania mają również potencjalne zastosowania w innych konfiguracjach systemów optycznych, co podkreśla ich uniwersalność oraz realną wartość dodaną do rozwoju fotoniki scalonej. Praca wpisuje się w aktualny światowy poziom badań i stanowi zauważalny wkład w rozwój tej dynamicznie rozwijającej się dziedziny. W swojej rozprawie Doktorantka przeprowadziła bardzo obszerną i poprawną analizę literatury światowej oraz istniejącego stanu wiedzy, uwzględniając zarówno aspekty techniczne, jak i technologiczne związane z fotoniką scaloną. Cytowania są właściwie dobrane, aktualne i dobrze odzwierciedlają zarówno dominujące kierunki badań, jak i rozwiązania stosowane w praktyce przemysłowej.

Doktorantka wykazała umiejętność klarownego, spójnego i przekonującego przedstawienia wyników swoich badań. Rozprawa jest przygotowana bardzo starannie pod względem redakcyjnym, a sposób prezentacji danych jest czytelny i logiczny.

Wyniki przedstawione w pracy mają wysoką przydatność dla nauk inżyniersko-technicznych. Fotonika scalona jest obecnie jednym z kluczowych kierunków rozwoju technologii, a przedstawione rozwiązania i osiągnięcia wpisują się w globalne trendy badawcze, stanowiąc jednocześnie realny wkład w rozwój nowoczesnych układów optycznych. Dodatkowo należy podkreślić, że wyniki przedstawione w rozprawie świadczą o dużym potencjale wdrożeniowym.

Podsumowując, recenzowana rozprawa świadczy o dużej wiedzy w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, a w szczególności w dziedzinie projektowania i charakteryzacji fotonicznych układów scalonych. Dowodzi ona także biegłości w zakresie metod eksperymentalnych, wiedzy z zakresu projektowania fotonicznych układów scalonych, elementów optoelektronicznych, analizy danych. Przedstawiona rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandry Paśnikowskiej zawiera oryginalne i istotne wyniki badań. Recenzowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z obowiązującą Ustawą wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Anna Szerling