

płk prof. dr hab. inż. Norbert Pałka
Instytut Optoelektroniki
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Łukasza Chorchosa

pt. *„Modelowanie fotodiod i laserów VCSEL dla potrzeb transmisji optycznej”*

przygotowanej pod opieką naukową promotora prof. dr hab. inż. Jarosława Turkiewicza.

1. Uwagi wstępne

Podstawą opracowanej recenzji Uchwała nr 153/2026 Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna o Telekomunikacja z dnia 13 stycznia 2026 roku zmieniająca uchwałę nr 143/2025 z 09 grudnia 2025 w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mg. Inż. Łukaszowi Chorchosowi. Rozprawa została dostarczona jako monografia w języku angielskim.

Podstawą recenzji są Ustawowe wymagania¹ stawiane rozprawie doktorskiej, która „(...) prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (...)”. „Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne”. Ponadto, „Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej”.

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

Niniejsza rozprawa koncentruje się na modelowaniu małosygnalowego i charakteryzacji komponentów optoelektronicznych, tj. jedno i wieloaperturowych laserów VCSEL oraz fotodiod PIN, dla potrzeb światłowodowej transmisji krótkodystansowej. W eksperymentach

¹ Art. 187, Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami.

transmisyjnych z wykorzystaniem ww. komponentów wykazano przepływności powyżej 100 Gbit/s.

We wprowadzeniu Doktorant przedstawił 3 tezy swojej Rozprawy, a mianowicie:

Teza 1: *Możliwa jest adaptacja modeli małosygnalowych standardowych laserów VCSEL na potrzeby modelowania laserów VCSEL o wielu aperturach.*

Teza 2: *Zwiększenie powierzchni efektywnej fotodiody poprzez ograniczenie powierzchni kontaktu elektrycznego może prowadzić do ograniczenia pasma modulacji tak zaprojektowanych struktur.*

Teza 3: *Możliwa jest realizacja łączy optycznych krótkiego zasięgu o przepływnościach do 100 Gbit/s z wykorzystaniem standardowych i wieloaperturowych laserów VCSEL z zastosowaniem formatów modulacji takich jak NRZ, Duobinary i PAM-4.*

Szczegółowa analiza rozprawy mgr. inż. Łukasza Chorchosa upoważnia do stwierdzenia, że powyższe **tezy zostały sformułowane poprawnie i jasno** określają kierunki badań oraz zakres pracy.

3. Czy w Rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.

Bibliografia zawiera 127 odniesienia w większości do anglojęzycznych artykułów, książek, doniesień konferencyjnych i stron internetowych, w tym 1 pozycji ze współautorskim udziałem Doktoranta. Ponadto w rozdz. 1, Doktorant wprowadza cztery artykuły [A1-A4], na których rozprawa doktorska bazuje i których wyniki prac badawczych rozszerza.

Stwierdzam, iż **w Rozprawie w sposób właściwy przedstawiono analizę źródeł**, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle, tj. systemach transmisyjnych pracujących w pierwszym oknie transmisyjnym.

Mój niedosyt budzi opis laserów wieloaperturowych - tylko jedna referencja [46]. Ponadto, w pkt. 2.3, Doktorant pisze, że „Obecnie prace nad zwiększeniem pasma elektrycznego tego typu fotodetektorów skupiają się na dwóch głównych kierunkach”, tj. „fotodiody bazującej na GaAs/AlGaAs” i „struktury PIN, które wykorzystuje wyłącznie „szybsze nośniki”, czyli elektrony (UTC - uni-traveling-carrier)”. Z analizy nie jest jasne, dlaczego do badań wybrano „zoptymalizowane do pracy na długości fali 850 nm fotodiody PIN bazujące na InGaAs/InP o czułości prądowej 0,5 A/W”.

4. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione.

Autor prowadził swoją pracę przy zastosowaniu metod teoretyczno-pomiarowych, modelowania i badań eksperymentalnych. W mojej ocenie **Doktorant poprawnie udowodnił tezy** Rozprawy.

Małosygnalowe modelowanie laserów VCSEL i fotodiod, które bazuje na rozwiązaniu hybrydowym, tj. charakteryzacji LIV, pomiarze parametrów rozproszenia, schemacie zastępczym, symulacjach i ekstrakcji parametrów, pozwoliło na uzyskanie wysokiej zgodności parametrów zmierzonych i obliczonych (np. rys. 17, 22, 36, 38, 39, 41, 45). Przedstawione zbieżne wyniki symulacji i wyniki eksperymentów transmisyjnych z wykorzystaniem laserów VCSEL oraz fotodiod PIN (rys. 52, 53) oraz uzyskanie przepływności rzędu 100 Gbit/s również wskazują na poprawność przyjętej metody i założeń.

Doktorant wykazał się zarówno gruntowną znajomością podstaw teoretycznych, jak i wysokim poziomem kompetencji inżynierskich w zakresie projektowania i realizacji badań eksperymentalnych, co znalazło odzwierciedlenie w skutecznej implementacji zaproponowanych metod i przyjęciu uzasadnionych założeń.

5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do wiedzy i poziomu reprezentowanego przez literaturę światową?

Oryginalność rozprawy w odniesieniu do pierwszej tezy polega na udowodnieniu, że znany z literatury model małosygnałowy standardowego lasera VCSEL po niezbędnych adaptacjach może być także zastosowany do modelowania laserów o kilku aperturach. Przy czym oba typy laserów były wyprodukowane w tym samym cyklu. Autor przedstawił własne pomiary i symulacje, które dowiodły poprawności tej tezy. Dla obu typów laserów otrzymano pasmo rzędu 30 GHz, a głównym jego ograniczeniem są efekty pojemnościowe związane z układem pasożytniczym. Niektóre wyniki tej części pracy zostały opublikowane jako pozycja A1 w *Journal of Lightwave Technology* (IF=4,8; 2025), co jednoznacznie wskazuje na aktualność wyników.

Oryginalność rozprawy w odniesieniu do drugiej tezy polega na udowodnieniu, że pomimo zwiększonej efektywnej powierzchni obszaru aktywnego dla fotodiod z niepełnym kontaktem elektrycznym ich pasmo przenoszenia wyraźnie spada i takie podejście nie wykazuje przewagi nad fotodiodami z pełnym kontaktem elektrycznym. Ta teza wymagała opracowania zgodnego z danymi eksperymentalnymi modelu małosygnałowego dla fotodiod PIN o różnej średnicy obszaru aktywnego, w tym diod z niepełnym kontaktem elektrycznym, ich analizy częstotliwościowej oraz analizy wpływu układu pasożytniczego i konwersji optyczno-elektrycznej na charakterystykę przenoszenia tych struktur

Oryginalność rozprawy w odniesieniu do trzeciej tezy polega na udowodnieniu, że zarówno standardowe lasery VCSEL, jak lasery wieloaperturowe mogą osiągać przepływności rzędu 100 Gbit/s przy zastosowaniu formatów modulacji Duobinary i PAM-4. W tej części prac Autor dokonał pomiarów i symulacji dla kilku wybranych konfiguracji zawierających lasery VCSEL i fotodiody PIN i pracujące w I oknie transmisyjnym. Niektóre wyniki tej części pracy zostały opublikowane jako pozycja A4 w *Journal of Lightwave Technology* (IF=4,8; 2020) oraz w dwóch międzynarodowych doniesieniach konferencyjnych (A2 z 2021 i A3 z 2023), z co jednoznacznie wskazuje na aktualność wyników.

Samodzielny i oryginalny dorobek Doktoranta stanowią także liczne wyniki pomiarów dotyczące charakteryzacji laserów VCSEL, fotodiod PIN, jak i łączy telekomunikacyjnych wykorzystujących te elementy. Podsumowując, opisane wyniki są oryginalne i znaczące w skali światowej.

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

Zawarte w dysertacji omówienie badań przeprowadzonych przez Doktoranta jest moim zadaniem wystarczająco wyczerpujące, w tym sensie, że pozwala na ich ocenę przez recenzenta. Struktura pracy w postaci jeden rozdział poświęcony dowiedzeniu jednej tezy jest

poprawna i zgodna z założeniami pracy. Wyniki pomiarów są przedstawione w przekonujący sposób na w większości czytelnych wykresach.

Jednakże, moim zdaniem praca jest za bardzo syntetyczna, brakuje mi wielu potrzebnych danych a dodatkowe rysunki na pewno polepszyłyby odbiór czytelnika. Autor przeprowadził wiele pomiarów, które mogłyby być udokumentowane fotografiami i dodatkowymi schematami, co polepszyłyby zrozumienie tematu. Na schematach mogłyby być zamieszczone pełne opisy, nie skróty nazw elementów oraz ich podstawowe parametry, co zdecydowanie ułatwiłoby analizę. Mam także wrażenie, że opisy rysunkowe w artykułach A1-A4 są pełniejsze.

7. Bibliometria

Wg bazy danych Scopus, Doktorant posiada bardzo wysokie wskaźniki bibliometryczne: 69 publikacji od 2015, w tym 18 artykułów z JCR i 40 doniesień konferencyjnych, 765 cytowań, indeks Hirscha = 15. Te dane wskazują na Jego dojrzałość naukową. Wiele tych publikacji jest związanych z tematyką Rozprawy i dotyczy laserów VCSEL oraz łączności światłowodowej.

8. Uwagi krytyczne

Doktorant stwierdza, że „Poniższa rozprawa doktorska bazuje i rozszerza wyniki prac badawczych przedstawionych w następujących publikacjach”. W moim odczuciu lepiej by było, żeby Praca stanowiła zamkniętą całość bez odwoływania się do prac A1-A4. Zwłaszcza, że nie jest ona zbyt długa, gdyż liczy 80 stron od Wstępu do Podsumowania.

Praca jest za bardzo syntetyczna, brakuje mi wielu potrzebnych danych a dodatkowe rysunki na pewno polepszyłyby odbiór czytelnika.

Poproszę Doktoranta o ustosunkowanie się do poniższych uwag 1-8 w formie slajdów przedstawionych w czasie obrony:

1. Proszę o przedstawienie szerszego opisu laserów VCSEL zastosowanych do pomiarów. Rys. 2 – brak opisów i wymiarów. Na stronie firmy <https://v-i-systems.com> te opis są szersze. Czy to był chip na jakimś podłożu? Jak był podgrzewany do temp. 85C?
2. Proszę o przedstawienie, jak wyglądały symulacje wykonane w Ansys Electronics (str. 28).
3. Proszę o przedstawienie opisu użytych fotodiod. Nie do końca wiadomo, jak one są zbudowane i ile ich zostało użytych w czasie badań. Jakich wymiarów mają fotodiody? W tekście jest opis „Wymiary odpowiadają wymiarom rzeczywistym” - nie znalazłem tych wymiarów. Rys. 4 – brak opisów i wymiarów.
4. Doktorant pisze, że „Obecnie prace nad zwiększeniem pasma elektrycznego tego typu fotodetektorów skupiają się na dwóch głównych kierunkach”, tj. „fotodiody bazujące na GaAs/AlGaAs” i „struktury PIN, które wykorzystuje wyłącznie „szybsze nośniki”, czyli elektrony (UTC - uni-traveling-carrier)”. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego do badań wybrano „zoptymalizowane do pracy na długości fali 850 nm fotodiody PIN bazujące na InGaAs/InP o czułości prądowej 0,5 A/W”.
5. Proszę o przedstawienie szczegółów dot. „Symulacji tych dokonano w środowisku Ansys Electronics” – brakuje parametrów i wyjaśnienia, jak to zasymulowano.
6. Poproszę odnieść się do twierdzenia Shannona-Hartleya w kontekście wyznaczania przepustowości na podstawie pasma modulacji.

7. Proszę o wyjaśnienie, dlaczego z wykresów oczkowych nie wyznaczano parametrów liczbowych, które się łatwo porównuje? Autor stosuje tylko jakościowe określenia. Na wykresach oczkowych brak skali na osiach x i y.
8. Proszę o podanie szczegółów dot. symulacji wykresów oczkowych zawartych w rozdz. 5. Jest tylko ogólny opis „Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano oprogramowania Matlab i dokonano ich w dziedzinie czasu z częstotliwością próbkowania wynoszącą 800 GHz”. Kwestia dot. rys. 48, 49, 52, 53.

Inne uwagi:

1. Rys. 8 – brakuje mi słupków niepewności pomiarów.
2. Autor nie podał, skąd wiadomo, że „Kąt rozbieżności wiązki laserowej określony dla punktu mocy na poziomie $1/e^2$ wyniósł w przypadku standardowego lasera VCSEL 32° , natomiast w przypadku struktury wieloaperturowej 24° ”.
3. Autor nie podał, skąd wiadomo, że „Efektywność takiej metody sprzęgania światła lasera ze światłowodem wynosiła $>75\%$ ”.
4. Rys. 25 – nie wiadomo co przedstawia, brakuje opisów.
5. Rys. 29, 36, 45 są mało czytelne. Dane zlewają się ze sobą lub nachodzą na siebie.

9. Konkluzja końcowa

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Chorchosa pt. „*Modelowanie fotodiod i laserów VCSEL dla potrzeb transmisji optycznej*” spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim w stopniu dobrym, a mianowicie (i) prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, (ii) prezentuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, (iii) stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz (iv) ma właściwą formę monografii naukowej.

W związku z powyższym zaliczam Rozprawę do kategorii „spełniająca wymagania” i wnioskuję o dopuszczenie pana Łukasza Chorchosa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Nabest Patka

