

Marian Marciniak

(dr hab. Nauk fizycznych, specjalność fizyka-optyka)

Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

Ul. Szachowa 1

04-894 Warszawa

Warszawa, 9 lutego 2026

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Chorchosa  
p.t. „Modelowanie fotodiod i laserów VCSEL dla potrzeb transmisji optycznej”**

**Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Turkiewicz**

Przedstawioną do recenzji Rozprawę Doktorską rozpoczyna Streszczenie w języku polskim oraz *Abstract* w języku angielskim. Następnie podany jest użyteczny dla czytającego Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń.

**Rozdział 1 Wstęp** umiejscawia tematykę Rozprawy w dziedzinie transmisji światłowodowej krótkiego zasięgu z przepływnością rzędu 100Gbit/s, głównie dla centrów danych. Autor dokonuje przeglądu występujących obecnie ograniczeń transmisji. Poprawnie przytoczono najważniejsze międzynarodowe standardy transmisyjne w tym zakresie. Sformułowano trzy tezy Rozprawy:

Teza 1: Możliwa jest adaptacja modeli małosygnałowych 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.

Tezy tak sformułowane odnoszą się do występujących zasadniczych ograniczeń transmisji danych krótkiego zasięgu i postulują istotne polepszenie parametrów transmisyjnych nadajników i odbiorników w łączach optycznych.

Wymieniono cztery publikacje o zasięgu międzynarodowym oryginalnych wyników badań Autora, a także dwa polsko-niemieckie projekty badawcze w ramach których badania były prowadzone. Wskazano też firmę niemiecką która dostarczyła wykorzystane w badaniach elementy: lasery i fotodiody.

Omówiono strukturę Rozprawy na którą składa się sześć rozdziałów tematycznych, włącznie ze wstępem i podsumowaniem.

**Rozdział 2 Rozwój laserów VCSEL i fotodiod PIN** rozpoczyna się od przeglądu rozwiązań laserów VCSEL i podaje ich klasyfikację na jedno-aperturowe i wielo-aperturowe, podstawowe obszary zastosowań, oraz występujące ograniczenia. Podobnie, omówiono i scharakteryzowano fotodiody złożone z obszarów typu,  $p$ ,  $i$ , oraz  $n$  (PIN). Następnie przedstawiono parametry geometryczne, elektryczne i optyczne fotodiod PIN o różnej wielkości kontaktu elektrycznego wykorzystanych przez Autora w badaniach. Następnie przedstawiono podstawy działania łączy optycznych z modulacją natężenia światła i detekcją bezpośrednią (IM/DD - *Intensity Modulation / Direct Detection*) w pierwszym oknie transmisyjnym czyli na długości fali optycznej  $0,85 \mu\text{m}$ . Dokonano oceny uzyskiwanych parametrów transmisyjnych w odniesieniu do obowiązujących międzynarodowych standardów IEEE.

Następny **Rozdział 3 Charakteryzacja i modelowanie laserów VCSEL** przedstawia parametry jedno- i cztero-aperturowych laserów VCSEL wykorzystanych w pracy doktorskiej. Zastosowano własny opracowany i opublikowany przez Autora model małosygnałowy uwzględniający zależności temperaturowe. Przedstawiono wyniki analizy dla długości fali  $850 \text{ nm}$  i  $910 \text{ nm}$ , przewidzianych w standardach międzynarodowych.

Dokonano pomiarów parametrów statycznych badanych struktur: charakterystyk oświetleniowo – prądowo – napięciowych, widma promieniowania, oraz rozkładów pola bliskiego i dalekiego. Poprawnie określono warunki techniczne badań: parametry i rodzaj wykorzystanej aparatury. Wyniki przedstawiono graficznie, oraz dokonano ich szczegółowej analizy i wyciągnięto poprawne wnioski. W szczególności wykazano warunki osiągnięcia charakterystyki liniowej, pożądanej do zastosowań w modulacji światła strumieniem transmitowanych danych. Wykazano, że cztero-aperturowe lasery VCSEL mają istotną zaletę pracy jedno-modowej, w porównaniu z laserami jedno-aperturowymi, generującymi kilka modów (częstotliwości optycznych).

Następnie dokonano pomiarów parametrów rozproszenia (parametru odbiciowego  $S_{11}$  oraz parametru transmisyjnego  $S_{21}$ ) badanych struktur. Przedstawiono wyniki ekstrakcji parametrów małosygnałowych dla jedno- oraz wieloaperturowego lasera VCSEL, dokonano ich szczegółowej analizy oraz wyciągnięto wnioski. Dokonano również

poglądowej symulacji charakterystyk częstotliwościowych laserów wielordzeniowych o różnych liczbach rdzeni ( od 1 do 10). Na szczególne podkreślenie zasługuje staranny opis parametrów pomiarów i szczegółowy opis ich wyników, istotny z uwagi na ich powtarzalność i weryfikowalność. Istotną wartość ma też graficzne przedstawienie wyników analizy na licznych wykresach. Inną istotną zaletą jest porównanie wyników modelowania i eksperymentalnych oraz wykazanie ich zgodności.

Kolejny **Rozdział 4 Fotodiody PIN** przedstawia wyniki ich modelowania małosygnałowego na podstawie dokonanego pomiaru parametrów rozproszenia – charakterystyki odbiciowej S22. Dokonano analizy rozkładu prądów w obwodzie pasożytniczym fotodiody. W kolejnym kroku dokonano określenia parametrów fotodiody związanych z konwersją optyczno-elektryczną, na podstawie pomiaru charakterystyki przejściowej S12 fotodiody. Znowu na podkreślenie zasługuje przytoczenie warunków i parametrów pomiarów, a także wnikliwość analizy i wyciągniętych wniosków. Następnie dokonano modelowania fotodiod o niepełnym kontakcie elektrycznym, właściwym dla badanych elementów. W kolejnym kroku dokonano symulacji układu odbiorczego o niskiej rezystancji wejściowej i przeprowadzono dyskusję wyników analizy.

Kolejny **Rozdział 5 Transmisja danych** zawiera wyniki symulacji i badań eksperymentalnych światłowodowych łączy transmisyjnych z wykorzystaniem badanych w poprzednich rozdziałach laserów VCSEL i fotodiod PIN. Badano warunki generacji i detekcji sygnału o modulacji bez powrotu do zera (*Non-Return to Zero*, NRZ), a także o modulacjach *Duobinary* oraz PAM-4. Badano wpływ charakterystyki częstotliwościowej na jakość transmisji pseudolosowych sekwencji danych. Wyniki symulacji i eksperymentu przedstawiono poglądowo w postaci wykresów oka, a także uzyskane wartości liczbowe bitowej stopy błędu. Dokonano analizy wyników i wyciągnięto właściwe wnioski, w szczególności wykazano możliwość uzyskania poprawnej transmisji o przepływności danych 100 Gbit/s. Przeprowadzono również eksperymentalne testy możliwości transmisyjnych na zwiększonej długości światłowodu wielomodowego. Finalnie, dokonano eksperymentalnej integracji elementów i wyników omówionych wcześniej badań w pełny system transmisyjny i przebadano jego charakterystyki dla przepływności od 64 Gbit/s do 80 Gbit/s bez- oraz z wykorzystaniem korekcji błędów FFE po stronie odbiorczej. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość poprawnej transmisji przy użyciu zaproponowanego zintegrowanego systemu transmisyjnego.

Ostatni **Rozdział 6 Podsumowanie** przekonująco wykazuje udowodnienie tez Rozprawy, a także wskazuje kierunki dalszych badań.

Rozprawę zamykają:

Wykaz literatury na który składa się 127 pozycji o charakterze międzynarodowym, trafnie dobranych i właściwie cytowanych w Rozprawie, oraz wykaz 67 rysunków, schematów i diagramów.

W pracy zauważono stosunkowo niewielką liczbę drobnych pomyłek językowych i nieścisłości, które bynajmniej nie umniejszają wysokiej oceny poziomu naukowego, technicznego i edytorskiego Rozprawy. Należą do nich:

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

„OFDM – *orthogonal frequency-division multiplexing*, zwielokrotnianie z ortogonalnym zwielokrotnieniem częstotliwości” [sugerowane: zwielokrotnianie z ortogonalnym podziałem częstotliwości].

1. Wstęp

Strona 8:

„łącza krótkiego zasięgu bazujące na miedzi” [sugerowane: łącza krótkiego zasięgu oparte na kablach miedzianych]

strona 14:

Rys. 3 (Struktura fotodiody PIN) nie określa wielkości E na osi pionowej.

„Wyższe pasmo elektryczne fotodiody PIN wiąże się z mniejszym rozmiarem obszaru pochłaniającego światło” [sugerowane: Szersze pasmo elektryczne fotodiody PIN wynika z mniejszego rozmiaru obszaru pochłaniającego światło]

strona 15:

„wykorzystuje wyłącznie „szybsze” nośniki, czyli elektrony” [warto tutaj wyjaśnić też jakie są „wolniejsze” nośniki – dziury? Można oprzeć się na parametrze ‘ruchliwość nośników’]

strona 32:

„otrzymane pasmo wynosi 36,0 GHz i jest o 9,2 GHz wyższe” [sugerowane: otrzymane pasmo wynosi 36,0 GHz i jest o 9,2 GHz szersze]

strona 33 i następne:

brakuje określenia (opisu) parametru D. Odwołanie do pozycji literaturowej jest niewystarczające dla spójności i samowystarczalności Rozprawy.

strona 56:

„fotodiod z niepełnym kontaktem elektryczny” [sugerowane: fotodiod z niepełnym kontaktem elektrycznym]

strona 57:

Rys. 41 „część rzeczywista”, „część zespolona” [sugerowane: część rzeczywista, część urojona]. Brakuje opisu osi pionowej.

strona 60:

„obliczono, wykorzystując” [sugerowane: obliczono wykorzystując]

strona 66 i następne:

Rys. 48, 49, 51, 52, 53 – w opisach brakuje zaznaczenia że są to wykresy dla modulacji NRZ.

Strona 79:

Rys. 62 „wieloaperturowy lasear” [sugerowane: wieloaperturowy laser]

„włókna światłowodowe OM4 o długości 1 m, 100 m i 400m m” [sugerowane: włókna światłowodowe OM4 o długości 1 m, 100 m i 400 m]

Strona 80:

Rys. 63 [sugerowane objaśnienie oznaczeń MM, MA].

W toku przygotowania Rozprawy Autor wykazał się głęboką wiedzą w zakresie jej tematyki, a także wysokimi umiejętnościami eksperymentalnymi i symulacyjnymi. Autor przekonująco udowodnił przyjęte tezy Rozprawy. Rozprawa wyróżnia się rozbudowanym aparatem eksperymentalnym i symulacyjnym, a także walorami użytkowymi i praktycznymi. Autor podjął istotne wyzwania stojące przed systemami transmisji danych i pomyślnie je rozwiązał.

Rozprawa cechuje się poprawnie wybraną metodyką badawczą integrującą pomiary eksperymentalne i symulacje numeryczne. wysokim poziomem oryginalności. Do oryginalnych osiągnięć Autora należą:

1. Opracowanie i zastosowanie modelu małosygnałowego laserów VCSEL o wielu aperturach i wykazanie jego dobrej zgodności z przeprowadzonymi pomiarami charakterystyki odbiciowej laserów.

2. Zastosowanie modelu małosygnałowego do modelowania charakterystyk fotodiod PIN, oraz jego adaptacja do fotodiod z niepełnym kontaktem elektrycznym, oraz wykazanie zgodności modelu z danymi uzyskanymi eksperymentalnie.
3. Zaprojektowanie, wykonanie i zbadanie eksperymentalne wraz z symulacją zintegrowanego systemu transmisyjnego wykorzystującego badane elementy oraz osprzęt elektroniczny. Przetestowanie systemu dla trzech różnych zaawansowanych sposobów modulacji sygnału.

Rozprawa wykazuje również istotny dorobek publikacyjny Autora w zakresie rezultatów częściowych opublikowanych w renomowanych wydawnictwach o zasięgu międzynarodowym.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona Rozprawa Doktorska spełnia przepisane prawem wymagania z wyraźnym nadmiarem. Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny i eksperymentalny przedstawionej Rozprawy oraz szczególną przydatność wyników do zastosowań praktycznych **wnioskuję o jej wyróżnienie.**

*Marian Marciniak*

