

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Łukasza Chorchosa

która odbędzie się w dniu **06.05.2026 roku**, o godzinie **12:00** w trybie stacjonarnym

Temat rozprawy:

„Modelowanie fotodiod i laserów VCSEL dla potrzeb transmisji optycznej”

Promotor: prof. dr hab. inż. Jarosław Turkiewicz – Politechnika Warszawska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Krzysztof Abramski – Politechnika Wrocławska

płk prof. dr hab. inż. Norbert Pałka – Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie

dr hab. nauk fizycznych Marian Marciniak, prof. Instytutu – Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy

Obrona odbędzie się w sali 116 w gmachu Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych PW (ul. Nowowiejska 15/19)

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-Informatyka-Tehniczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Łukasz-Chorchos>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja
Politechniki Warszawskiej
Prof. dr hab. inż. Jarosław Arabas

Streszczenie

Niniejsza praca dedykowana jest modelowaniu małosygnalowemu i charakteryzacji komponentów optoelektronicznych dla potrzeb światłowodowej transmisji krótkodystansowej. W pracy rozwinięto modele małosygnalowe kluczowych elementów optoelektronicznych wykorzystywanych w systemach światłowodowych: standardowych i wieloaperturowych laserów o emisji powierzchniowej z pionową wnęką rezonansową (VCSEL) oraz fotodiod PIN. Opracowany model VCSEL charakteryzuje się wysoką zgodnością charakterystyki częstotliwościowej z rzeczywistymi komponentami. W pracy zweryfikowano, iż struktury wieloaperturowe mogą osiągać pasma do około 30 GHz, porównywalne ze standardowymi laserami VCSEL. Głównym ograniczeniem ich odpowiedzi częstotliwościowej okazały się efekty pojemnościowe redukujące pasmo części pasożytniczej do 26,8 GHz dla VCSELa 850 nm przy prądzie polaryzacji 10 mA. W kolejnej części opracowano model małosygnalowy fotodiod PIN pracujących w pierwszym oknie transmisyjnym. Przeanalizowano wpływ układu pasożytniczego i konwersji optyczno-elektrycznej. Zbadano fotodiody o różnych średnicach obszaru aktywnego (8–32 μm) oraz z niepełnym kontaktem elektrycznym. Wykazano, że mimo zwiększenia powierzchni efektywnej, pasmo takich fotodiod ulega pogorszeniu. Dalsza część pracy dedykowana jest transmisji danych z użyciem badanych laserów i fotodiod, zarówno samodzielnych, jak i zintegrowanych ze sterownikami. Udowodniono możliwość osiągnięcia przepływności rzędu 100 Gbit/s przy zastosowaniu prostych formatów modulacji, takich jak Duobinary i PAM-4.

Praca wnosi oryginalny wkład w rozwój telekomunikacyjnych systemów światłowodowych, proponując zastosowanie laserów VCSEL o wielu aperturach w celu zwiększenia zasięgu transmisji przy zachowaniu wysokiej mocy i wąskiej linii widmowej. Opracowane modele mogą być wykorzystane do projektowania i symulacji układów nadawczo-odbiorczych, stanowiąc praktyczne narzędzie inżynierskie.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof M. Abramski
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska,
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
Budynek C-5, im. Profesora M. Suskiego
tel. (71) 320 30 24, e-mail: krzysztof.abramski@pwr.edu.pl

Rada Naukowa Dyscypliny
INFORMATYKA TECHNICZNA
I TELEKOMUNIKACJA

Sekretariat
Data wpływu 13.02.2026
Numer.....

Wrocław, 5.02.2026

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Chorchosa pod tytułem: „Modelowanie fotodiod i laserów VCSEL dla potrzeb transmisji optycznej”

Opiniowana praca mgr. inż. Łukasza Chorchosa pod tytułem „Modelowanie fotodiod i laserów VCSEL dla potrzeb transmisji optycznej” powstała na Politechnice Warszawskiej w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja pod promotorstwem prof. dr hab. inż. Jarosława Turkiewicza i została rekomendowana przez Radę Dyscypliny Naukowej „Informatyka Techniczna i Telekomunikacja” Politechniki Warszawskiej.

Rozprawa liczy 107 stron w 6. rozdziałach, zawiera 127 pozycji literaturowych. Autor w swojej dysertacji doktorskiej powołuje się na dwie swoje publikacje w *Journal Lightwave Technology* (2020, 2025, IF = 4.8), gdzie jest pierwszym autorem oraz na dwie prezentacje konferencyjne, *Optical Interconnects* (SPIE, 2021) i *Optical Fiber Communications Conference* (2023), gdzie również jest pierwszym autorem.

O DYSERTACJI

Rozdział 1. WSTĘP

Zawiera zwięzłe i przekonujące motywacje podjętej tematyki. Głównymi obiektami tej pracy są lasery VCSEL (850nm i 910nm) i fotodiody PIN, których parametry pasmowe determinują ich przydatność w optycznych sieciach krótkiego zasięgu, zwłaszcza wykorzystywanych w centrach danych. To nie jest praca poświęcona technologii laserów typu VCSEL czy fotodetektorów PIN, a jej istotę stanowi charakteryzacja częstotliwościowa i modelowanie elektrycznych schematów zastępczych tych elementów oraz badanie ich szybkości transmisji. Autor formułuje trzy tezy dysertacji doktorskiej:

- 1. Możliwa jest adaptacja modeli małosygnałowych standardowych laserów VCSEL na potrzeby modelowania laserów VCSEL o wielu aperturach.**
- 2. Zwiększenie powierzchni efektywnej fotodiody poprzez ograniczenie powierzchni kontaktu elektrycznego może prowadzić do ograniczenia pasma modulacji tak zaprojektowanych struktur.**
- 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.**

Ta tematyka ma swoje praktyczne uzasadnienie, bowiem badania związane z pracą doktorską były realizowane w ramach dwóch grantów międzynarodowych „Współpraca Polska-Berlin/Brandenburgia” (2018-2024) realizowanych w ramach konsorcjów, w których partnerem była niemiecka firma VI Systems GmbH, producent laserów VCSEL i fotodetektorów PIN. Pan Chorchos był wykonawcą w tych grantach. Obiektami badań były wytworzone w VI Systems GmbH diody laserowe typu VCSEL i fotodetektory PIN, a zadaniem Doktoranta było opracowanie nietrywialnej, bo dotyczącej bardzo wysokich częstotliwości, technik pomiarowych ich charakterystyk częstotliwościowych i na bazie tych pomiarów modelowanie zastępczych schematów elektrycznych.

Rozdział 2. ROZWÓJ LASERÓW VCSEL I FOTODIOD PIN

W tym rozdziale Autor wprowadza w historię laserów typu VCSEL, ich rolę, zwłaszcza w telekomunikacji i stan rozwoju pod kątem przepływności. Dysertacja dotyczy zastosowań telekomunikacyjnych na długości fali 850nm i koncentruje Swoje badania na dwóch typach laserów VCSEL oraz fotodetektorach typu PIN, produkowanych w niemieckiej firmie VI Systems GmbH. Dysertacja nie obejmuje konstrukcji i technologii ani laserów ani PIN diod, natomiast dotyczy pomiarowych technik częstotliwościowych, w celu modelowania elektrycznych schematów zastępczych diod laserowych VCSEL i diod PIN, zwłaszcza identyfikacji ich obwodów pasożytniczych istotnie ograniczających ich charakterystyki pasmowe. Dwa typy VCSEL-i to dioda o pojedynczej aperturze i dioda o tak zwanych czterech aperturach. Z kolei badane fotodiody PIN charakteryzowały się rozmiarami obszaru aktywnego w czterech rozmiarach kontaktu elektrycznego. Autor dokonał analizy osiągnięć przepływności (w latach 1995-2025) w systemach transmisyjnych bazujących na diodach VCSEL/850nm (w wersji diod standardowych i wielordzeniowych), zwracając uwagę, że kilka najlepszych wyników (rok 2016, lara 2019-2021, a także 2025) to rekordy przepływności uzyskane przy współudziale grupy z Politechniki Warszawskiej, z istotnym udziałem Autora. Zwraca uwagę na formaty modulacji stosowane w łączach krótkiego zasięgu (najpopularniejsze - NRZ, PAM-4, ale też i PAM-8, MultiCAP, OFDM, DMT).

Rozdział 3. CHARAKTERYZACJA I MODELOWANIE LASERÓW VCSEL

Współpracując z niemiecką firmą VI System GmbH, Autor dysponował dwoma typami diod VCSEL na 850nm i 950nm: standardowe (wielomodowe z pojedynczą aperturą) i czteroaperturowe (jednomodowe). Z interpretacji rysunku Nr 9 rozumiem, że przez pracę jednomodową bądź wielomodową Doktorant rozumie modowość w sensie spektralnym, to znaczy, że laser pracuje w jednym bądź w kilku modach podłużnych. Rozumiem też, że technologicznie te lasery mają różne grubości warstwy aktywnej, a przez to różne długości rezonatora Fabry-Perota. Z rys. 8 wynika, że charakterystyki statyczne dla laserów VCSEL na 850 nm i laserów na 910 nm niewiele się różnią. Ich optyczne charakterystyki spektralne również zachowują podobne struktury modowe (rys.9). **Wydaje się, że 3-decybelowe szerokości spektralne optycznych linii widmowych (0.7 nm i 0.2 nm dla odpowiednio laserów wielo- i jedno-modowych) zostały przez Autora oszacowane chyba niezbyt dokładnie, bo charakterystyki widmowe na tych rysunkach są w skali logarytmicznej.**

Ten rozdział dysertacji doktorskiej Pana Chorchosa dotyczy układu pomiarowego charakterystyk pasmowych badanych diod VCSEL. Zakładając model małosygnałowego zastępczego schematu elektrycznego diody laserowej VCSEL jak na rysunku nr 12, Autor dobiera koncepcję i układ do pomiaru parametrów rozproszenia diody VCSEL przedstawiony na rys.11. Układ nie jest trywialny, bo dotyczy bardzo szerokopasmowych pomiarów do ponad 60 GHz. **Przedstawiono dość skromny opis układu pomiarowego parametrów rozproszenia S11 i S21 ograniczając się do blokowego rysunku nr 11.** Układ pomiarowy bazuje na wektorowym analizatorze widma, zapewniającym szerokopasmową modulację wejściową promieniowania lasera z możliwością zmiany warunków jego zasilania, natomiast sygnał wyjściowy jest mierzony poprzez konwersję optyczno-elektryczną za pomocą stosownie wykalibrowanego fotodetektora. **Byłbym bardzo wdzięczny, gdyby w czasie obrony, Doktorant wyjaśnił:**

- jaka jest rola „.... przewodu o długości 50 cm” (str. 27, 7 linia od góry),
- co oznacza zdanie: - „Dla pomiarów odbiciowych S11 system pomiarowy został skalibrowany do płaszczyzny lasera.” (str.27, linie 13-14 od góry).

Istotnie, w schemacie zastępczym pojemność C_p i indukcyjność L_p kontaktów pozostaje stała z częstotliwością. Pozostałe elementy, takie jak rezystancja złącza R_a , pojemność obszaru aktywnego C_a , czy rezystancja szeregową R_s są elementami zmieniającymi się w zależności od warunków zasilania diody VCSEL. I tu Autor przedstawia serię takich wyników pomiarów tych elementów w funkcji prądu zasilania. Dla tak zmierzonych parametrów elementów C_a , R_a i R_s modeluje parametry rozproszenia S_{11} w pasmie do 40 GHz. Porównanie wyników modelowania z pomiarami parametrów S_{11} i S_{21} cechuje się z bardzo dobrą zgodnością, co świadczy o poprawności modelowania. Istotna jest tu analiza pozwalająca estymować częstotliwościowe charakterystyki standardowych i wieloaperturowych laserów VCSEL. I tu dwa ważne wnioski:

- Pasmowe charakterystyki małosygnałowej modulacji są ograniczone elementami pasożytniczymi, przy czym w laserach wieloaperturowych ten wpływ jest znacząco większy.
- Lasery na długości fali 910nm charakteryzują się większym pasmem modulacji (znacząco mniejsza pojemność C_a).

Bardzo enigmatycznie opisano wyjaśnienie faktu, że „można skompensować zmierzoną charakterystykę częstotliwości otrzymując ograniczenie pasmowe wynikające z konwersji elektro-optycznej w strukturze lasera (str. 37, linie 9-11 od góry, wzór (12)). W trakcie obrony będę prosił o wyjaśnienie fizyki pojawiania się rezonansu w charakterystyce częstotliwościowej.

Będę prosił o wyjaśnienie fizycznego zjawiska powodującego, że częstotliwość rezonansowa f_r dla wieloaperturowych laserów jest większa od f_r dla laserów jednoaperturowych.

Autor wykazał, że 3-decybelowe pasmo lasera VCSEL może osiągnąć wartości:

- 31,7 GHz (dla 850 nm), dla jednoemiterowej struktury, (zmierzona wartość – 25,2 GHz),
- 25,5 GHz (dla 910 nm), dla jednoemiterowej struktury, (zmierzona wartość – 24,4 GHz),
- 49,4 GHz (dla 850 nm), dla wieloemiterowej struktury, (zmierzona wartość – 27,7 GHz),
- 35,5 GHz (dla 910 nm), dla wieloemiterowej struktury, (zmierzona wartość – 24,8 GHz).

Ta część dysertacji to dobra recepta dla konstruktorów, technologów i producentów laserów VCSEL pod kątem maksymalizacji ich pasma modulacji dla celów telekomunikacyjnych.

Rozdział 4. CHARAKTERYZACJA I MODELOWANIE FOTODIOD PIN

O szybkości transmisji decyduje para elementów : nadajnik (dioda VCSEL) i odbiornik (dioda PIN). Jak do tej pory diody PIN są najszybszymi fotodetektorami i stąd ich analiza pasmowa w tej dysertacji. W swojej dysertacji Autor bada fotodiody PIN na 850 nm (czułość prądowa 0,5 A/W. Badania przeprowadził na PIN diodach o różnych rozmiarach obszaru aktywnego (8-32 μm) oraz w czterech wersjach rozmiarów kontaktu elektrycznego (90%, 50%, 25% i 15%).

Doktorant prezentuje schemat zastępczy modelu małosygnałowego fotodiody PIN bazując na wcześniejszych publikacjach. Obwód zastępczy sprowadza się do dwóch części (Rys.23):

- części odpowiedzialnej za konwersję optyczno-elektryczną (ekwiwalentne dwa elementy, reprezentujące konwersję optyczno-elektryczną: pojemność C_T i rezystancja R_T),
- części elektrycznej odpowiedzialnej za efekty pasożytnicze (pojemność złącza C_j , indukcyjność L_p i pojemność C_p kontaktów, rezystancja złącza R_s).

Charakterystyki częstotliwościowe diody PIN sprowadzają się do pomiaru parametrów rozproszenia S_{11} , S_{22} i S_{21} i przeprowadzono je przy użyciu podobnego sprzętu jak w przypadku pomiarów diod VCSEL (wektorowy analizator widma, wysokoczęstotliwościowy trójnik, sonda mikrofalowa, zasilacz do regulacji polaryzacji diody PIN). **Tutaj znowu mało zrozumiałe zdanie – „Analizator VNA został podłączony do fotodiod z wykorzystaniem przewodu o długości 50 cm,..”.**

Pomiarów parametrów rozproszenia dokonano w dwóch układach:

- części czysto elektrycznej (Rys.24), do pomiarów parametrów S11 i S22 macierzy rozproszenia,
- części optyczno-elektrycznej (Rys.27), tu jako źródło sygnału jest dobrze wykalibrowana dioda laserowa VCSEL.

Dokonując analiza obwodowej i mierząc parametry rozproszenia S22 i S11 (układ pomiarowy na Rys.24) Doktorant dokonał obliczeń pojemności i indukcyjności kontaktów elektrycznych fotodiody. W celu znalezienia charakterystyk częstotliwościowych przeprowadził skrupulatnie pomiary parametru rozproszenia S12 (układ pomiarowy na rys.27), gdzie sygnałem wejściowym było zmodulowane promieniowanie z lasera VCSEL. Rezultatem tych pomiarów i obliczeń jest seria wyników parametrów obwodu zastępczego w funkcji polaryzacji fotodiody oraz rozmiaru aktywnego obszaru przy różnych temperaturach takich jak:

- elementy obwodu zastępczego,
- częstotliwościowe charakterystyki parametrów macierzy rozproszenia,
- częstotliwościowe charakterystyki czułości fotodiod PIN.

Najlepsze wyniki charakterystyk częstotliwościowych przebadanych fotodiod PIN przekraczają pasmo 30 GHz.

Na uwagę zasługuje analiza charakterystyki fotodiody PIN z niską rezystancją wyjściową i wykorzystanie wzmacniacza transimpedancyjnego o niskiej impedancji wejściowej. Symulacje Autora pokazują, że pasmo przenoszenia może dla takiego układu osiągnąć 50 GHz. To bardzo dobra recepta dla konstruktorów, technologów i producentów fotodiod PIN jak maksymalizować ich pasmo przenoszenia dla celów telekomunikacyjnych.

Rozdział 5. EKSPERYMENTY TRANSMISYJNE

Dysponując zaawansowaną aparaturą (generator sygnałów arbitralnych, szybki oscyloskop, generator sekwencji pseudolosowych), Doktorant przygotował eksperymenty transmisji z badanymi laserami VCSEL i fotodiodami PIN, w trzech formatach modulacji: NRZ, Duobinary i PAM-4.

Mając parametry zależne od częstotliwości poszczególnych komponentów laserów VCSEL i fotodiod PIN przeprowadził Pan Chorchoś modelowanie diagramów oka:

- dla laserów (850nm wielomodowych i standardowych, oraz 910nm wielomodowych i standardowych) dla formatów modulacji NFZ przy różnych przepływnościach (25 Gbit/s, 50Gbit/s, 80Gbit/s, 100Gbit/s),
- i osobno dla diod PIN w podobnych warunkach.

Przeprowadził również pomiary częstotliwości łącza transmisyjnego oraz diagramów oka dla całego toru transmisji dla różnych laserów, ich stanu polaryzacji i różniących się fotodiodach (ze względu na rozmiary kontaktów). Te pomiary był w stanie zamodelować, co uznaję za dużą umiejętność. Zademonstrował również transmisję w formacie modulacji Duobinary i PAM-4 przy równoczesnym pomiarze bitowej stopy błędów. Uzyskał przepływności:

- dla formatu Duobinary (dla obu długości fal) dla progu korekcyjnego 3% uzyskał przepływność 110Gbit/s (przepływność netto 106 Gbit/s), oraz dla progu korekcyjnego 6% uzyskał 118 Gbit/s (przepływność netto 111 Gbit/s),
- dla formatu PAM-4 (dla 850nm) dla progu korekcyjnego 3% uzyskał przepływność 116 Gbit/s (przepływność netto 112,6 Gbit/s), oraz dla progu korekcyjnego 6% uzyskał 119 Gbit/s (przepływność netto 112,2 Gbit/s).

Kolejne pomiary transmisji ze zwiększającym się dystansem (dla 100, 400 i 800 metrów światłowodu wielomodowego) pokazują, że do 400 metrów światłowodu pasmo przenoszenia praktycznie się nie zmienia. Ale jak pokazano, diagramy oka są akceptowalne praktycznie do 100 metrów światłowodu.

Rozdział 6. PODSUMOWANIE

Autor lapidarnie przedstawił krótkie kompendium rozprawy, z którym generalnie się zgadzam. Wszystkie trzy tezy zostały jednoznacznie eksperymentalnie udowodnione i podparte stosownymi modelami. Praca napisana jest przejrzysto i zwięźle. Zabrakło mi trochę opisu technologicznego badanych elementów, ale to mogło być też ograniczenie producenta.

PODSUMOWANIE RECENZJI

W recenzji opisując poszczególne rozdziały, „wyboldowałem” pytania i zagadnienie, do których chciałbym, by Doktorant odniósł się w czasie obrony.

Szybkość transmisji optycznych sieci telekomunikacyjnych krótkiego zasięgu stanowi jedno z istotnych wyzwań technologicznych. Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Chorchosa wgrza się w tę tematykę. Praca ma charakter eksperymentalny z dodatkowym aspektem modelowania. Pan Chorchos posiada biegłą wiedzę praktyczną i teoretyczną o systemach optokomunikacji, optoelektroniki i techniki mikrofalowej. Jest bardzo dobrze zaznajomiony z problemami szybkiej transmisji i metrologii telekomunikacyjnej. Ta rozprawa doktorska powstała na bazie dwóch grantów międzynarodowych, w których Pan mgr inż. Łukasz Chorchos był głównym wykonawcą, a Jego prace stanowiły istotę badań dla niemieckiej firmy VI Systems GmbH produkującej lasery VCSEL i fotodiody PIN. **Nie mam wątpliwości co do praktycznej użyteczności tej pracy.** Zazwyczaj konstruktorzy laserów półprzewodnikowych nie są specjalistami od wysokich częstotliwości. Praca Pana Chorchosa bardzo dobrze uzupełnia pewną istotną lukę, pokazuje jak modelować i mierzyć własności pasmowe diod i fotodiod w pasmie mikrofalowym. Wyniki tej dysertacji zostały opublikowane w dwóch pracach prestiżowego czasopisma *Journal of Lightwave Technology*, gdzie Pan Chorchos jest pierwszym autorem. Pan Chorchos ma w swoim dorobku sporą liczbę publikacji z tematyki około-optokomunikacyjnej, którymi się w pracy nie chwali (a mógłby). Powyższe uwagi sprawiają, że wysoko oceniam tę pracę.

Rozróżniając jakość kategorii rozpraw doktorskich na:

- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
- b/ wymagającą wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
- c/ spełniająca wymagania,
- d/ zasługującą na wyróżnienie,

zaliczam tę rozprawę, jako „zasługującą na wyróżnienie”, motywując to bardzo dobrym rozeznaniem praktycznym i teoretycznym Doktoranta w szybkiej metrologii opto-komunikacyjnej, umiejętnością modelowania układów opto-elektronicznych i zajmowaniem się tematyką ze światowego frontu badań nad szybkimi sieciami optycznymi krótkiego zasięgu.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Łukasza Chorchosa w pełni spełnia warunki stawiane przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej „Informatyka Techniczna i Telekomunikacja”, odpowiadającej dziedzinie Nauk Inżynieryjno-Technicznych, według klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu MNiSzW z dnia 20 września 2018 r. (Dz.U.2018 poz.1818), oraz wnoszę o jej wyróżnienie.



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 nm i 910 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



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 małosygnalowy 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 małosygnalowego 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. Jakie wymiary 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 bazującej 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

