

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 dokorską 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 wgrzyza 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 Inżyniersko-Technicznych, według klasyfikacji określonej w Rozporządzeniu MNiSzW z dnia 20 września 2018 r. (Dz.U.2018 poz.1818), oraz wnoszę o jej wyróżnienie.

