

## Autoreferat

### 1. Imię i nazwisko

Krzysztof Szczerba

### 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

30/12/2013 Tytuł doktora nauk technicznych w dziedzinie mikro i nanotechnologii (ang. Doctor of Philosophy in Microtechnology and Nanoscience, szw. Teknologie Doktor inom Mikroteknologi och Nanovetenskap) przyznany przez Uniwersytet Technologiczny Chalmers w Goeteborgu (ang. Chalmers University of Technology, szw. Chalmers Tekniska Högskola). Tytuł rozprawy doktorskiej: „Multilevel modulation in Short-range Optical Links”.

29/04/2008 Tytuł Magistra (ang. Master of Science) przyznany przez Duński Uniwersytet Techniczny (ang. Technical University of Denmark, duń. Danmarks Tekniske Universitet), tytuł pracy magisterskiej „Utilizing Motion Information in MPEG Video for Surveillance Applications”. Praca magisterska została zrealizowana jako projekt badawczo-rozwojowy we współpracy z firmą Milestone A/S z Brøndby w Danii.

01/10/2008 Tytuł Magistra Inżyniera przyznany przez Politechnikę Łódzką.

### 3. Informacje o zatrudnieniu

09/2016 do dziś Senior Principal Engineer w Finisar Corporation. Sunnyvale USA. Praca w dziale badawczo-rozwojowym nad rozwojem technologii łączy optycznych dla superkomputerów i centrów danych oraz technologiami 3D sensing. Kieruję i prowadzę prace badawczo rozwojowe. Finisar Corp. jest jedną z wiodących firm w zakresie łączności optycznej dla centrów danych i superkomputerów. Moje zadania polegają na rozwoju systemów komunikacji optycznej, modelowaniu łączy optycznych, modelowaniu behawioralnym komponentów opto-elektronicznych oraz wyznaczaniu kierunku rozwoju technologii. Ostatnio zajmuję się technologiami 3D sensing, powstającymi w oparciu o matryce laserów o emisji powierzchniowej.

- 01/2014 – 08/2016 Postdoctoral researcher na Uniwersytecie Technologicznym Chalmers (ang. Chalmers University of Technology, szw. Chalmers Tekniska Högskola). Praca w projektach: “Energy-efficient optical fibre communication”, ‘Multi-Tbps Optical Interconnects (MuTOI)’ oraz “Towards Flexible and Energy Efficient Datacenter Networking”
- 06/2008 - 02/2009 Research assistant na Duńskim Uniwersytecie Technicznym (ang. Technical University of Denmark) w łączonym projekcie z razem Milestone Systems A/S, Brøndby, Dania. Praca nad rozwojem algorytmów wykrywania i analizy ruchu w skompresowanych strumieniach wideo.

#### 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym

Prezentuję osiągnięcie naukowe pod tytułem:

„Szybkie i energooszczędne łącza optyczne krótkiego zasięgu z wykorzystaniem wielopoziomowych formatów modulacji”

którego podstawą jest następujący monotematyczny cykl dziesięciu publikacji:

- [A1] **K. Szczerba**, P. Westbergh, M. Karlsson, P. Andrekson and A. Larsson, "70 Gbps 4-PAM and 56 Gbps 8-PAM using an 850 nm VCSEL" Proc. 40th European Conference on Optical Communication, 2014. doi: 10.1109/ECOC.2014.6963923.
- [A2] **K. Szczerba**, P. Westbergh, M. Karlsson, P. Andrekson and A. Larsson, "70 Gbps 4-PAM and 56 Gbps 8-PAM Using an 850 nm VCSEL", Journal of Lightwave Technology 33 (7) (2015): 1395-1401. doi:10.1109/jlt.2015.2389898.
- [A3] **K. Szczerba**, M. Karlsson, P. A. Andrekson, and A. Larsson. "94-Gb/s 4-PAM Using an 850-nm VCSEL, Pre-Emphasis, and Receiver Equalization." IEEE Photonics Technology Letters 28(22), (2016): 2519-2521, 10.1109/LPT.2016.2602008.
- [A4] T. Lengyel, **K. Szczerba**, P. Westbergh, M. Karlsson, A. Larsson, and P. A. Andrekson, "Sensitivity Improvements in an 850-nm VCSEL-Based Link Using a Two-Tap Pre-Emphasis Electronic Filter," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 35(9), (2017): 1633-1639, 10.1109/JLT.2016.2643783.
- [A5] T. Lengyel, **K. Szczerba**, E. P Haglund, P. Westbergh, M. Karlsson, A. Larsson, P. A. Andrekson, "Impact of damping on 50 Gbps 4-PAM modulation of 25G class VCSELs," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 35(19), (2017): 4203-4209, 10.1109/JLT.2017.2727549.
- [A6] **K. Szczerba**, P. Westbergh, J. Gustavsson, M. Karlsson, P. Andrekson and A. Larsson, "Energy Efficiency of VCSELs in the Context of Short-Range Optical Links.", IEEE Photonics Technology Letters 27 (16), (2015): 1749-1752. doi:10.1109/LPT.2015.2439154.

- [A7] **K. Szczerba**, C. Fougstedt, P. Larsson-Edefors, P. Westbergh, A. Graell i Amat, L. Svensson, M. Karlsson, A. Larsson and P. Andrekson, "Impact of Forward Error Correction on Energy Consumption of VCSEL-based Transmitters," Proc. of the 41st European Conference on Optical Communications, Valencia, Spain, September 2015, doi: 10.1109/ECOC.2015.7341630.
- [A8] C. Fougstedt, **K. Szczerba**, P. Larsson-Edefors, "Low-power low-latency BCH decoders for energy-efficient optical interconnects," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 35 (23), (2017):5201-5207, 10.1109/JLT.2017.2764679.
- [A9] H. Rastegarfar, L. Yan, **K. Szczerba**, and E. Agrell, "PAM Performance Analysis in Multicast-Enabled Wavelength-Routing Data Centers," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology 35(13), (2017): 2569-2579, 10.1109/JLT.2017.2691278.
- [A10] **K Szczerba**, C Kocot, G Landry, "A Simple Circuit-Level Model of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Working Over a Broad Temperature Range," Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC), Gothenburg, Sweden 2017, DOI: 10.1109/ECOC.2017.8345956.

## 5. Omówienie celu naukowego prac, osiągniętych wyników oraz ich wykorzystania.

### 5.1 Wstęp i przedstawienie kontekstu prac

W przeciągu ostatniego dziesięciolecia nastąpił dramatyczny rozwój centrów danych oraz superkomputerów (ang. High Performance Computing (HPC)). Superkomputery odgrywają bardzo ważną rolę w obszarach takich jak prognozowanie pogody, modelowanie klimatu czy biotechnologia [1]. Przykładem pozytywnego działania HPC dla społeczeństwa jest przypadek huraganu Sandy w 2012 roku, kiedy modele pogodowe pozwoliły na poprawne prognozowanie przebiegu huraganu i ewakuację zagrożonych miejscowości [2]. Redukcja szkód była możliwa dzięki superkomputerom z European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Centrum ECMWF ma około 400.000 łączy optycznych krótkiego zasięgu [2]. Centra danych z kolei stały się instrumentalnym narzędziem współczesnej gospodarki i stanowią podstawę wszelkich rozwiązań chmurowych w zakresie magazynowania i przetwarzania danych [3, 4, 5]. Zastosowanie łączy optycznych centrach danych w miejsce łączy opartych o przewody miedziane pozwoliło na znaczące obniżenie zużycia energii oraz podniesienie przepływności [6, 7, 8, 9].

Przesył danych wewnątrz superkomputerów i centrów danych, pomiędzy przełącznikami sieciowymi (ang. switch) i elementami obliczeniowymi oraz magazynowania danych jest realizowany głównie przy pomocy łączy światłowodowych zbudowanych przy pomocy laserów o emisji powierzchniowej (ang. Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL)) światłowodów wielomodowych (ang. Multimode Fiber (MMF)) i fotodiod typu p-i-n [10, 11]. Wybór takiej technologii jest podyktowany tym, że lasery typu VCSEL są wydajne energetycznie (w sensie ilości energii potrzebnej do przesłania jednego bitu informacji), mają szerokie pasmo przenoszenia, co umożliwia ich bezpośrednią modulację i eliminuje potrzebę wykorzystania zewnętrznego modulatora. Są też wydajne ekonomicznie, dzięki wysokiej gęstości laserów na substracie półprzewodnikowym oraz temu, że można jest szybko testować bez potrzeby cięcia substratu, na którym zostały wyprodukowane [12]. Zużycie energii przy

użyciu laserów typu VCSEL działających na długości fali równej 850 nm na poziomie 73 fJ/bit przy prędkości transmisji 40 Gbps i 95 fJ/bit przy 50 Gbps zostało zademonstrowane przez grupę badawczą na Uniwersytecie Technologicznym Chalmers [13]. Jeszcze niższe zużycie energii, na poziomie 56 fJ/bit, aczkolwiek przy niższej prędkości 25 Gbps zostało zademonstrowane przez grupę badawczą z TU Berlin [14]. Lasery te miałyby bardzo małą średnicę apertury tlenkowej ( $<3 \mu\text{m}$ ), który jest używana do ograniczenia poziomego rozkładu prądu i światła we wnętrzu rezonansowej lasera i w jego obszarze aktywnym.

Zastosowanie światłowodów wielomodowych wynika z tego, że ich duże średnice rdzeni ( $50 \mu\text{m}$  do  $62,5 \mu\text{m}$  w zależności od standardu) pozwalają na większe tolerancje mechaniczne, co z kolei przekłada się na bardziej ekonomiczny w produkcji system. Wadą światłowodów wielomodowych jest występowanie dyspersji międzymodalnej. Jej przyczyną jest to, że różne grupy modów w światłowodzie mają różne prędkości grupowe. W połączeniu z szerokim spektrum emisji laserów typu VCSEL, wynoszącej ok. 0.6 nm dla typowych wielomodowych laserów o emisji powierzchniowej. Zmniejszenie szerokości spektrum poprzez zbudowanie jednomodowego lasera o emisji powierzchniowej pozwala na zwiększenie długości transmisji, co pokazałem praktycznie w latach 2012-2013 [15, 16]. Obecnie trwa debata czy światłowody wielomodowe będą równie popularne przyszłości, jednak porównanie struktury kosztów transponderów opartych o lasery o emisji krawędziowej i powierzchniowej sugeruje, że lasery o emisji powierzchniowej będą w dalszym ciągu dominującą technologią dla łączy optycznych o zasięgu poniżej 300 m [17]. Lasery typu VCSEL mają pasma przenoszenia dochodzące do 30 GHz [18, 19, 20]. Niestety, zwiększenie szerokości pasma przenoszenia laserów typu VCSEL ponad 30 GHz w demonstracjach badawczych i ponad 25 GHz w rozwiązaniach produkcyjnych, gdzie osiągi muszą być równoważone z niezawodnością jest coraz trudniejsze [19]. Innowacyjne metody konstrukcji laserów, takie jak np. lasery o emisji powierzchniowej o sprzężonych wnękach rezonansowych [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] nie przekładają się jeszcze na praktyczne zastosowania, ponieważ bardzo trudno jest osiągnąć stabilne działanie w szerokim zakresie temperatur. Wobec tego, by zwiększyć przepływność łączy pozostają techniki takie jak:

- Multipleksowanie długości fali.
- Multipleksowanie wymiarów przestrzennych, i.e. zwiększenie ilości rdzeni w światłowodach lub zwiększenie ilości włókien światłowodowych.
- Zwiększenie wydajności spektralnej poprzez zastosowanie bardziej zaawansowanych formatów modulacji.

Multipleksowanie długości fali w łączach optycznych krótkiego zasięgu ograniczone jest do kilku (zazwyczaj 4) długości fali [28, 29, 30], ponieważ ze względu na znaczenie zużycia energii w systemie unika się aktywnej stabilizacji temperatury lasera. We wszystkich laserach półprzewodnikowych następuje zjawisko przesunięcia długości fali w funkcji temperatury. W laserach typu VCSEL zbudowanych w systemie materiałowym AlGaAs przesunięcie fali zazwyczaj następuje w około  $0.06 \text{ nm/K}$  [31]. Ponadto, aby zwiększyć gęstość przesyłu danych transpondery optyczne formatu QSFP mają po kilka linii nadawczych i odbiorczych. Często praktyką jest wykorzystanie matryc laserów. Postęp w kierunku wykorzystania matryc laserów typu VCSEL, gdzie długość fali każdego lasera na matrycy można ustawiać indywidualnie zaprezentowano w [32]. Obiecującą techniką jest tutaj zastosowanie siatek dyfrakcyjnych o dużym kontraście (ang. High contrast grating, HCG) jako górnego zwierciadła lasera o emisji powierzchniowej [33, 34]. Dodatkowym ograniczeniem techniki multipleksowania długości fali jest to, że mimo że zmniejszona zostaje ilość światłowodów, ilość laserów, ich sterowników, fotodiod i ich wzmacniaczy pozostaje proporcjonalna do prędkości przesyłu danych. Z kolei każdy dodatkowy element aktywny powoduje wzrost zużycia energii.

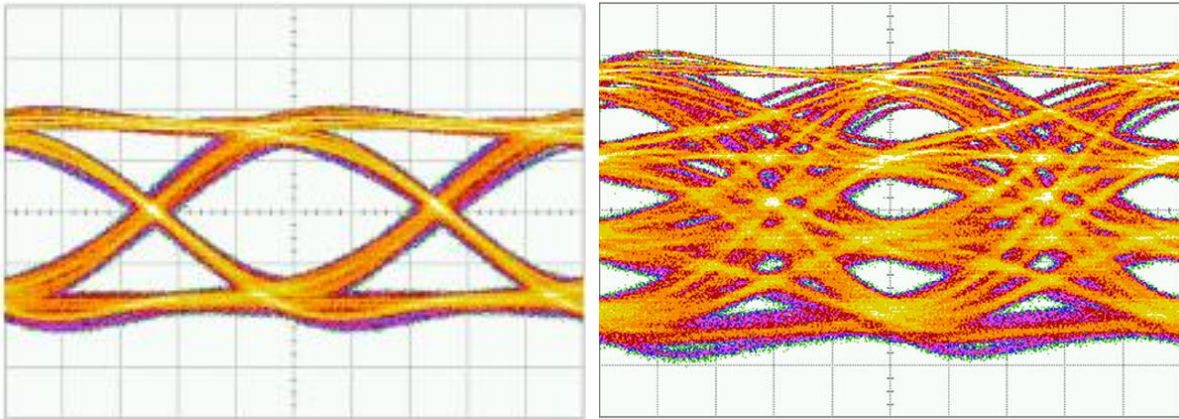
Podobne ograniczenia mają miejsce w przypadku multipleksowania wymiarów przestrzennych. W tym przypadku mamy do czynienia z liniowym skalowaniem zużycia energii i ilości koniecznych laserów i odbiorników. Multipleksowanie wymiarów przestrzennych odbywa się zazwyczaj poprzez stosowanie wiązek światłowodów, łączonych kontaktami typu MPO (Multi-fiber Push On). Zaletą tego rozwiązania jest jego prostota. Nie wymaga ono produkcji światłowodów wielordzeniowych i złożonego procesu wyrównania światłowodu wielordzeniowego do układu optycznego w transponderze. Nie mniej jednak, rozwiązanie tych problemów jest bardzo pożądane, ponieważ systemy oparte na wielomodowych światłowodach wielordzeniowych są w stanie osiągnąć większą gęstość przepływości danych [35, 36, 37, 38].

Te ograniczenia nie występują w przypadku użycia modulacji wielopoziomowej. Modulacja wielopoziomowa pozwala efektywniej wykorzystać dostępne pasmo przenoszenia i podnieść przepływość łączy ponad do 50 Gbps – 100 Gbps. Formaty modulacji którym poświęcono najwięcej uwagi w pracach badawczych to 4-PAM (ang. Pulse Amplitude Modulation) [39, 40, 41, 42, 29, 43, 44] i różne typy modulacji podnośnej [45, 46, 47, 48, 49, 50], z jedną bądź z wieloma falami podnośnymi, w szczególności OFDM, gdzie poszczególne fale podnośne są do siebie ortogonalne. Zaletami formatów z wieloma falami podnośnymi jest możliwość zastosowania techniki adaptacyjnego kodowania poszczególnych sygnałów podnośnych i łatwiejsza korekcja sygnału. Wadą jest wysoki współczynnik mocy szczytowej do mocy średniej, co przekłada się na problemy związane z nieliniowym zachowaniem komponentów oraz niska wydajność energetyczna w przypadku zastosowania w łączach nie-koherentnych z modulacją intensywności i bezpośrednią detekcją [51, 52]. Przykład diagramów oka dla modulacji OOK, 4-PAM przy 56 Gbaud (a więc odpowiednio 56 Gbps i 112 Gbps) jest pokazany na Rys. 1. Diagramy pochodzą z mojej pracy i zostały uzyskane przy pomocy specjalnie zaprojektowanego sterownika wykonanego technologii InP [53].

Poza zwiększeniem wydajności spektralnej formatu modulacji można też zastosować korekcję sygnału, zarówno po stronie nadajnika jak i odbiornika [54, 55, 56, 57, 58, 59, 60]. Zastosowanie korekcji sygnału w krótkich łączach optycznych jest ułatwione, ponieważ odpowiedź częstotliwościowa systemu zazwyczaj łagodnie opada wraz ze wzrastającą częstotliwością, bez charakterystyki pasmopaporowej.

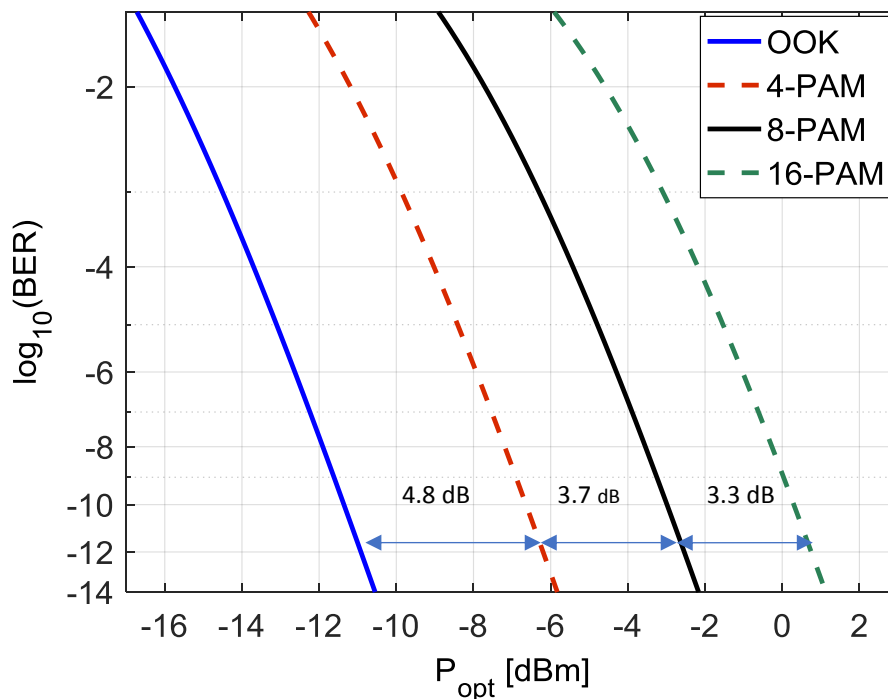
Wprowadzenie formatów modulacji bardziej zaawansowanych niż on-off keying (OOK) wiąże się z nowymi wyzwaniami. Wielopoziomowe formaty modulacji wymagają wyższego stosunku sygnału do szumu, mają mniejszą tolerancję na interferencję między symbolami [61]. Głównymi źródłami szumu w krótkich łączach optycznych jest szum termiczny [61], szum względny lasera (ang. relative intensity noise (RIN)) oraz szum fluktuacji modowych (ang. mode partition noise (MPN)) [62, 63]. Ponieważ wielopoziomowy format PAM był nowy w tym zastosowaniu, zaistniała potrzeba dokładnego zrozumienia limitów możliwości podnoszenia prędkości przesyłu danych w krótkich łączach światłowodowych.

Fundamentalną konsekwencją wynikającą z zastosowania modulacji wielopoziomowej jest wyższa stopa błędów przy tej samej mocy optycznej i stosunku sygnału do szumu w odbiorniku [61]. Dla M-poziomowej modulacji PAM wymagany wzrost mocy optycznej, aby utrzymać stałą stopę błędów wynosi  $P = 10 \log_{10}(M - 1)$ . Ilustracja analitycznie obliczonej stopy błędów dla formatów modulacji OOK, 4-PAM, 8-PAM i 16-PAM przy prędkości 20 Gbaud (a więc odpowiednio 20 Gbps, 40 Gbps, 60 Gbps i 80 Gbps) dla idealnego łącza jest pokazana na Rys. 2. Jak widać przejście z OOK do 4-PAM wymaga 4.8 dB więcej odebranej mocy optycznej, przejście z 4-PAM do 8-PAM dodatkowe 3.7 dB, a przejście z 8-PAM do 16-PAM wymaga dodatkowe 3.3 dB. W praktyce modulacja 16-PAM jest bardzo trudna do realizacji.



Rysunek 1 Przykład diagramów oka dla modulacji OOK przy 56 Gbps i 4-PAM przy 112 Gbps (56 Gbaud) uzyskany z lasera typu VCSEL o paśmie przenoszenia ok. 24 GHz.

Aby utrzymać budżet mocy w łączy w granicach rozsądku oraz transmitowaną moc poniżej limitów narzuconych przez względy bezpieczeństwa wzroku zaczęto stosować korekcję błędów. Pojawilo się pytanie o sumaryczny efekt zastosowania korekcji błędów na zużycie energii w łączy w centrach danych. Zużycie energii jest bardzo ważnym zagadnieniem ze względów ekonomicznych, środowiskowych oraz technologicznych. Biorąc pod uwagę, że 50% zużycia energii w centrach danych przypada na chłodzenie, 26% na serwery i przechowywanie danych a 10% na przesył danych [64], dbałość o minimalizację zużycia energii przy przesyśle danych jest jak najbardziej zasadna.

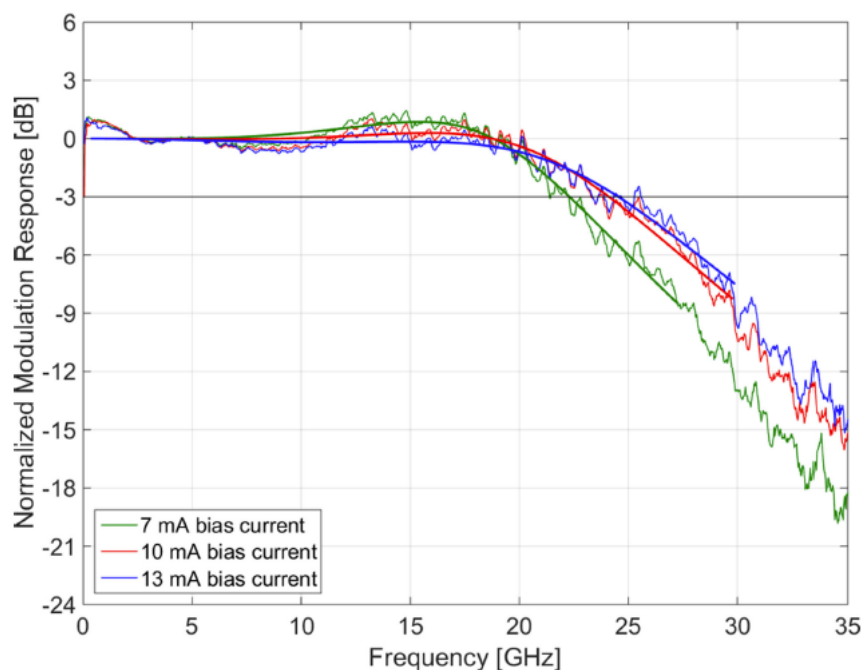


Rysunek 2 Obliczona analitycznie stopa błędów dla modulacji PAM przy 20 Gbaud.

Poza zwiększeniem wydajności spektralnej modulacji, optymalizacją zużycia energii dla systemu z korekcją błędów ważne jest też wykorzystanie laserów półprzewodnikowych o pożądanych właściwościach. Modulacja OOK może być stosowana w systemach zbudowanych w oparciu o lasery z przesterowaniem, o silnym pikie rezonansowym w odpowiedzi częstotliwościowej lasera. Lasery takie dają efekt korekty sygnału. Ewentualne przekroczenie poziomu logicznego „zera” lub logicznego „jeden” nie jest problemem, ponieważ punkt decyzji leży pomiędzy tymi poziomami. W przypadku modulacji wielopoziomowej mamy do czynienia z trzema poziomami decyzyjnymi. Odpowiedź częstotliwościową lasera jest silnie zależna od m.in. współczynnika tłumienia. Dobranie właściwego współczynnika tłumienia jest bardzo ważnym etapem projektowania systemu i transpondera. Przykładowa odpowiedź częstotliwościowa lasera typu VCSEL dobrane do pracy z modulacją wielopoziomową pokazany został na Rys. 3.

W przypadku modulacji 4-PAM poza doбором współczynnika tłumienia ważny jest też właściwy dobór średnicy apertury tlenkowej lasera. Apertura tlenkowa jest wykorzystywana w laserach typu VCSEL do ograniczenia przepływu prądu do obszaru aktywnego, jak i bocznego ograniczenia pola elektromagnetycznego światła lasera we wnęce rezonansowej. W przypadku modulacji OOK gdzie wymagania odnośnie mocy optycznej są mniejsze, można argumentować ze zmniejszenie średnicy apertury prowadzi do zmniejszenia zużycia energii na przesłany bit [65, 66, 67]. W przypadku modulacji 4-PAM, gdzie wymagana jest większa moc optyczna, zmniejszenie rozmiaru apertury tlenkowej nie jest już oczywiste, ponieważ zmniejszenie jej rozmiaru prowadzi do zmniejszenia maksymalnej mocy optycznej (thermal roll-over następuje przy niższym natężeniu prądu). Głównym czynnikiem ograniczającym moc optyczną w laserach typu VCSEL opartych o system materiałowy AlGaAs jest samonagrzewanie lasera, które prowadzi do zmniejszenia wewnętrznej wydajności kwantowej oraz rozejścia się długości fali wnęki rezonansowej oraz spektrum wzmocnienia studni kwantowych w warstwie aktywnej [68, 69, 70].

Aby lepiej dopasować komponenty łącza optycznego i przyspieszyć proces projektowania, poprzez ograniczenie ilości prób eksperymentalnych należy zastosować modele komponentów



Rysunek 3 Odpowiedź częstotliwościowa lasera typu VCSEL o współczynniku tłumienia dostosowanym do pracy z modulacją 4-PAM dla typowych punktów pracy.

użytych do budowy łącza. O ile elementy takie jak fotodiody i światłowody są elementami liniowymi (w użytym zakresie mocy), i w symulacjach można je uprościć przy pomocy macierzy parametrów rozpraszania bądź odpowiedzi impulsowej, symulacja elementów nieliniowych, takich jak wzmacniacze szerokopasmowe używane do sterowania laserów czy wzmacniacze transimpedancyjne używane w odbiornikach, oraz w szczególności same bezpośrednio modulowane lasery jest o wiele bardziej wymagająca. W przypadku elementów elektronicznych mamy do dyspozycji narzędzia computer aided design (CAD) które pozwalają na symulacje całości urządzenia od poziomu tranzystora do całego układu scalonego. Dla wyjaśnienia, należy tu przypomnieć, że modele w narzędziach takich jak Cadence Spectre czy PSpice są czysto behawioralne, i.e. zachowanie poszczególnych tranzystorów jest modelowane matematycznie a nie w wyniku np. symulacji użytego materiału półprzewodnikowego. W przypadku laserów półprzewodnikowych, aby taki model poprawnie opisywał zachowanie bezpośrednio modulowanego lasera musi on uwzględniać dynamikę opisaną przez równania różniczkowe opisujące ilość ładunków oraz ilość fotonów w laserze. Taki model, zaimplementowany w środowisku takim jak Spectre czy Pspice pozwala na ko-symulację lasera i wzmacniacza szerokopasmowego sterującego tym laserem [71, 72, 73, 74].

Mając do dyspozycji pełne zrozumienie interakcji między urządzeniami opto-elektronicznymi, formatami modulacji i kodowaniem korygującym błędy, można to zrozumienie wykorzystać do optymalizacji wyższych warstw sieci w centrum danych. Kooptymalizacja warstwy fizycznej z warstwą łącza danych i warstwą sieciąową pozwala na lepsze wykorzystanie istniejących zasobów. Ponieważ fundamentalnie przepustowość łącza jest ograniczona limitem Shannona, który jest liniową funkcją szerokości pasma przenoszenia i logarytmiczną funkcją stosunku sygnału do szumu, mamy do czynienia z ograniczonymi zasobami które trzeba wykorzystać w jak najbardziej optymalny sposób [75, 76, 77].

Celem mojej pracy badawczej opisanej w artykułach [A1, A2] była analiza limitów możliwości modulacji 4-PAM i 8-PAM w łączach światłowodowych zbudowanych w oparciu o lasery typu VCSEL o paśmie przenoszenia około 20GHz, bez korekcji sygnału [A1, A6] oraz z korekcją sygnału [A2]. W artykule [A3] dla porównania sprawdzone zostały możliwości podniesienia przepływności łącza z takim samym typem lasera w nadajniku i z odbiornikiem o takim samym paśmie przenoszenia z modulacją OOK. Metodą podniesienia przepływności była korekta sygnału w nadajniku. Zaletą takiego rozwiązania jest niska złożoność, prosta architektura nadajnika i odbiornika oraz możliwość zastosowania wzmacniacza ograniczającego w odbiorniku. Wzmacniacz ograniczający, jako urządzenie nieliniowe, ma możliwość regeneracji stosunku sygnału do szumu w amplitudzie (i jedynie w amplitudzie, w pewnych warunkach szum fazowy może ulec wzmożeniu), jak to zostało zademonstrowane w publikacjach IBM Research [54, 55].

W kontekście modulacji 4-PAM i efektu różnorodnych zakłóceń przeprowadzone zostało studium wpływu efektu współczynnika tłumienia lasera na jakość transmisji. Wyniki zostały opisane w [A4]. Modulacja binarna OOK może tolerować znaczne przesterowanie w odpowiedzi impulsowej (overshoot). Takie przesterowanie jest wręcz korzystne w niektórych przypadkach, kiedy mamy do czynienia np. z ograniczeniem pasma przenoszenia poprzez dyspersję międzymodową w światłowodach wielomodowych.



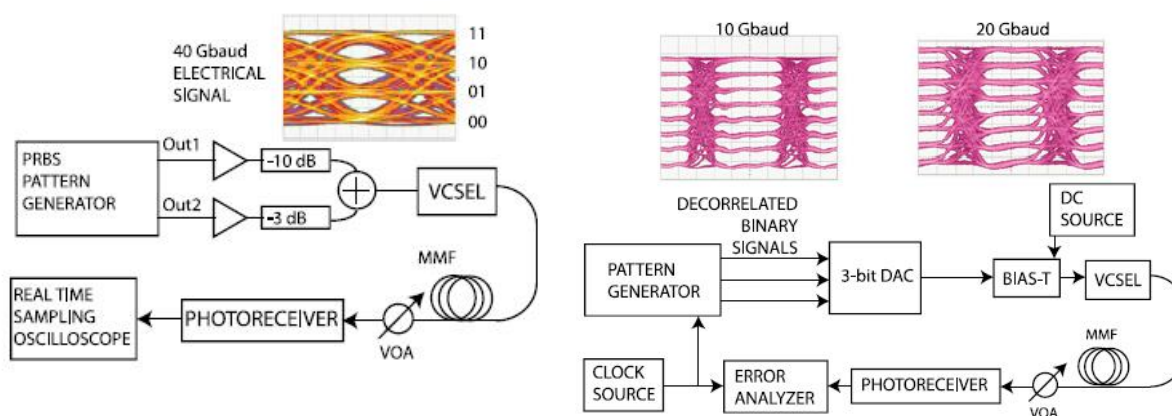
## 5.2 Omówienie celu naukowego przedstawionych prac

Celem naukowym przedstawionych prac jest

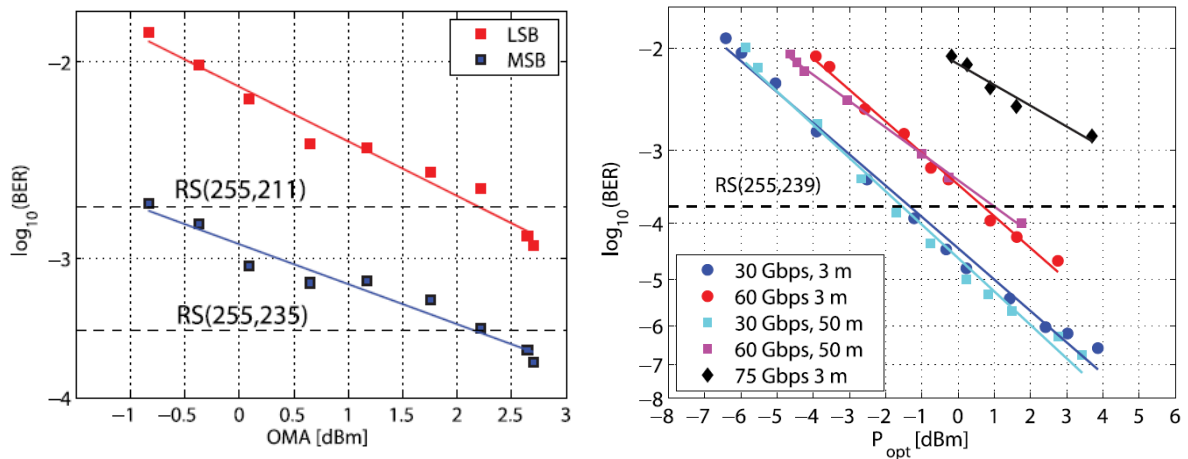
1. Opracowanie metod na zwiększenie przepływności krótkich łączy optycznych do zastosowań w centrach danych i superkomputerach poprzez zastosowanie wielopoziomowych formatów modulacji.
2. Opracowanie metod na zmniejszenie zużycia energii na przesłany bit informacji w takich łączach poprzez optymalizację systemów i modelowanie laserów dla potrzeb projektowania układów scalonych.
3. Optymalizacja wykorzystania dostępnych zasobów w sieciach optycznych w centrach danych.

## 5.3 Omówienie wyników w publikacjach [A1, A2] pod tytułem „70 Gbps 4-PAM and 56 Gbps 8-PAM Using an 850 nm VCSEL” oraz ich zastosowań

Po raz pierwszy pokazana została eksperymentalnie transmisja przy prędkości 70 Gbps przy użyciu modulacji 4-PAM i 56 Gbps przy użyciu modulacji 8-PAM. Podane prędkości przesyłu danych są po odjęciu nadmiarowości kodów korekcyjnych. Wykorzystany został laser typu VCSEL z pasmem przenoszenia o szerokości 20 GHz. Układy pomiarowe przedstawione są na Rys. 4, wraz z diagramami oka dla sygnału elektrycznego użytego do modulacji lasera. Wyniki pomiarów stopy błędów pokazane są na Rys. 5. Podane prędkości przesyłu danych są przed odjęciem nadmiarowości kodów korekcyjnych. Nadmiarowość założonego kodu zależy od osiągniętej stopy błędów. Nadmiarowość kodu została obliczona tak, aby finalnie uzyskać  $BER < 10^{-12}$ . Dla sygnału 4-PAM zastosowane zostały kody o różnej nadmiarowości dla pierwszego i drugiego bitu w każdym symbol. Zastosowane zostało kodowanie naturalne symboli do bitów. W przypadku transmisji przy użyciu 4-PAM zastosowany został również korektor w odbiorniku, ponieważ szerokość widma sygnału przy prędkości 80 Gbps (40 GBd) jest większa niż szerokość pasma przenoszenia zastosowanego lasera. Diagram oka przed i po korekcji sygnału pokazany jest na Rys. 6.

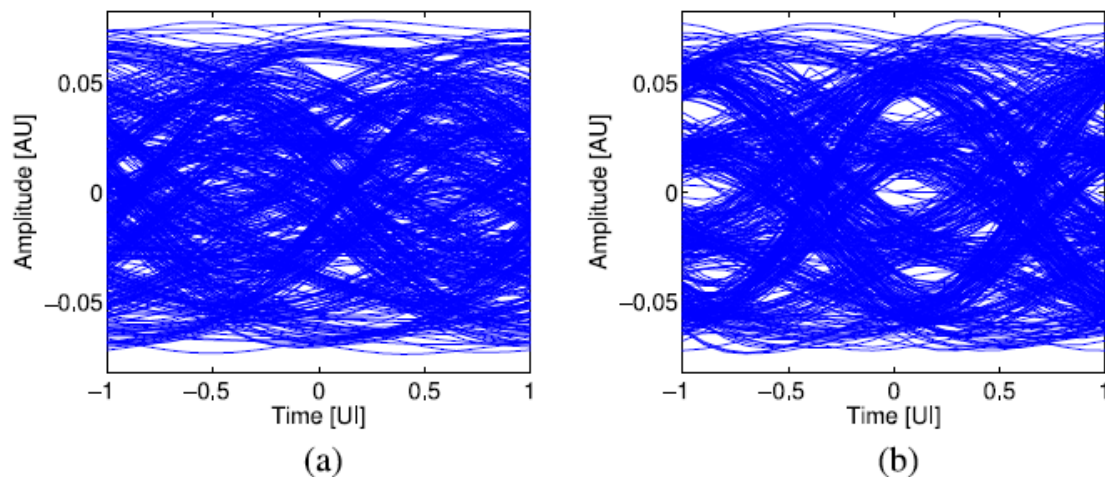


Rysunek 4 Układy pomiarowe do testów z 4-PAM (po lewej) i 8-PAM (po prawej).



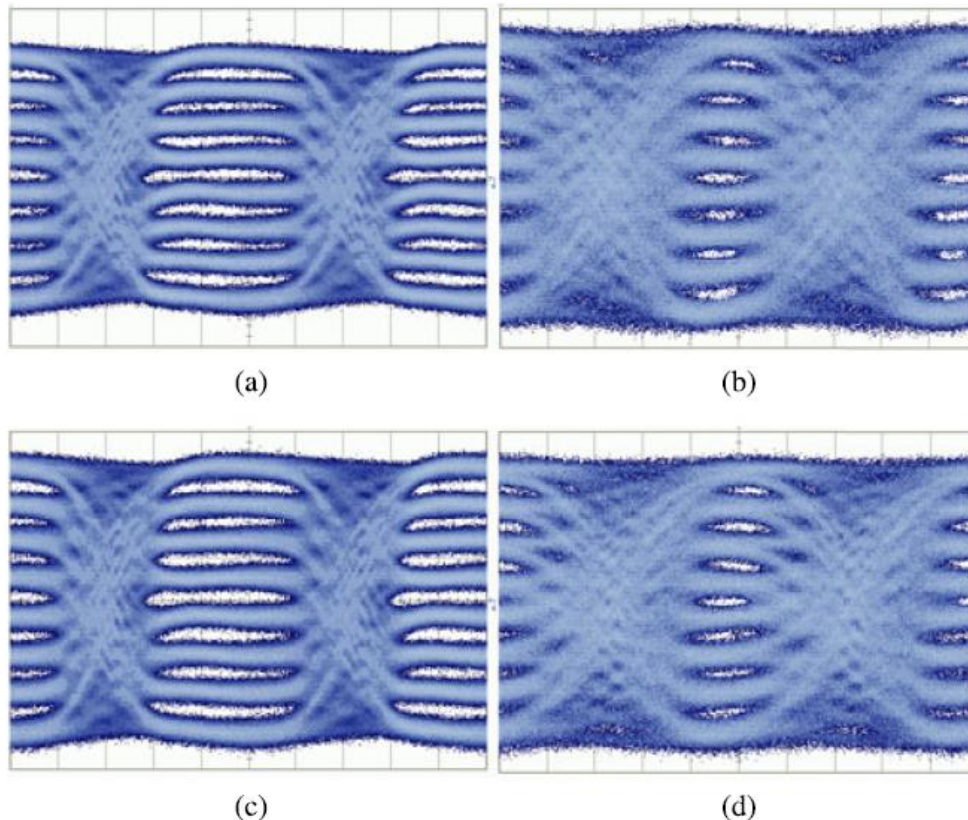
Rysunek 5 Zmierzone stopy błędów (BER) dla 4-PAM przy 80 Gbps przed odjęciem nadmiarowości kodu korekcyjnego (po lewej) i 8-PAM przy 30 Gbps, 60 Gbps oraz 75 Gbps przed odjęciem nadmiarowości kodu korekcyjnego (po prawej).

Diagramy oka dla transmisji przy użyciu 8-PAM przedstawione są Rys. 7. Maksymalna prędkość transmisji, dla której można było uzyskać bezbłędną transmisję ( $\text{BER} < 10^{-12}$ ) po zastosowaniu kodowania korekcyjnego to 60 Gbps (56 Gbps po odjęciu nadmiarowości kodu). Dla tej prędkości szerokość widma sygnału 8-PAM jest porównywalna z szerokością pasma przenoszenia systemu, mierzoną do punktu -3 dB.



Rysunek 6 Diagram oka dla odebranego sygnału 4-PAM przy 40 GBd (a) oraz po korekcji (b).

Przedstawione wyniki pokazują, że przy danym kanale komunikacyjnym uzyskano wyższą prędkość przesyłu przy użyciu formatu modulacji niższego rzędu. Wyniki pokazują, że zwiększenie rzędu modulacji nie zawsze wiąże się z wzrostem przepływności łącza. Ma to swoje konsekwencje dla rozwoju technologii nowych generacji łącz optycznych krótkiego zasięgu.



Rysunek 7 Diagramy oka dla transmisji 8-PAM po propagacji w 3 m światłowodu typu OM4 dla 10 GBd (a) i 20 GBd (b) oraz po transmisji w 50 m światłowodu OM4 dla 10 GBd (c) i 20 GBd (d)

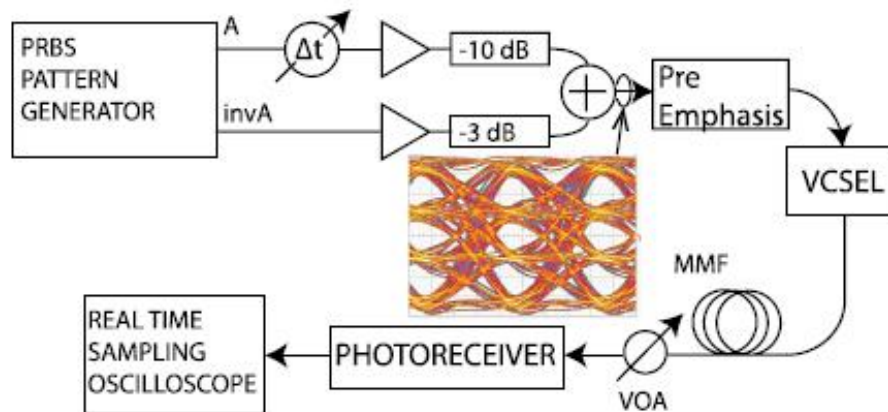
**Zastosowanie** tych wyników widać już w produktach. Nowe transpondery firmy Finisar, gdzie obecnie pracuję, używają modulacji 4-PAM z korekcją sygnału. Aby podnieść prędkość przesyłu danych przy użyciu tej techniki do 100 Gbps trzeba podnieść pasmo przenoszenia laserów i fotoodbiorników do około 25 GHz – 30 GHz, co wydaje się osiągalne. Nie wskazuję do zastosowania modulacji 8-PAM, ponieważ nie ma ona w tym typie łączy i z typowymi wartościami stosunku sygnału do szumu wyraźniej przewagi nad 4-PAM.

#### 5.4 Omówienie wyników w publikacji [A3] pod tytułem „94-Gb/s 4-PAM Using an 850-nm VCSEL, Pre-Emphasis, and Receiver Equalization” oraz ich zastosowań

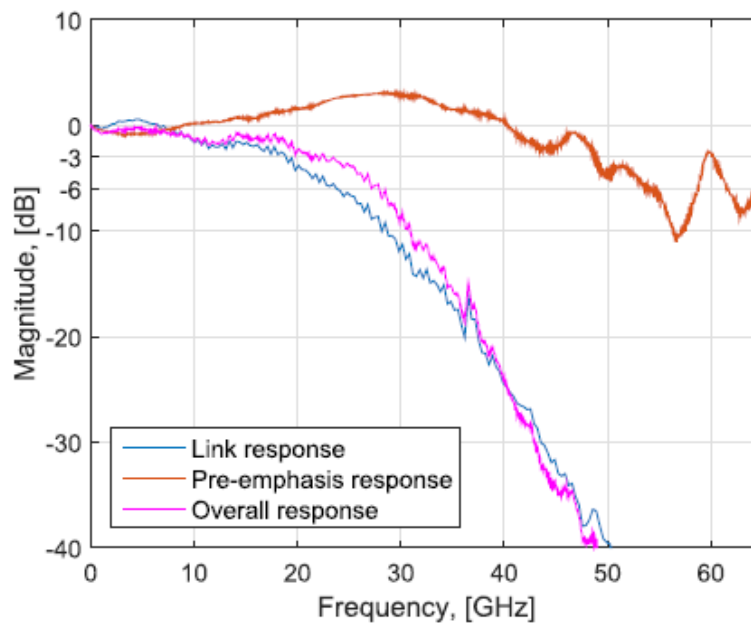
W tej pracy po raz pierwszy zaprezentowano ówczesnie rekordową transmisję przy prędkości 94 Gbps przy użyciu lasera typu VCSEL o paśmie przenoszenia szerokości 20 GHz. Zastosowano ten sam laser co w [A1, A2], o paśmie przenoszenia mierzonym do punktu 3 dB o wartości 20 GHz. Dodatkowo w transmitterze zastosowany został dyskretny pasywny filtr mikrofalowy jako „pre-emphasis”. Układ pomiarowy został zilustrowany na Rys. 8. Pasma przenoszenia lasera, filtra w transmitterze oraz sumaryczna odpowiedź częstotliwościowa lasera oraz filtra zostały zilustrowane na Rys. 9.

Ponadto, w odbiorniku zastosowany został liniowy korektor adaptacyjny. Korektor ten został zaimplementowany off-line w środowisku Matlab, ale ma on w założeniu symulować analogowy korektor typu „tapped delay line” [78]. Sygnał był próbkowany z częstotliwością 10 próbek na symbol, więc 10 elementów korektora w symulacji odpowiada jednemu blokowi opóźniającemu korektora. Wyniki pomiarów stopy błędów zilustrowane są na Rys. 10.

Z pomiarów BER wynika, że potrzebne są co najmniej 4 elementy opóźniające (>51 próbek w implementacji dyskretnej w środowisku Matlab) aby osiągnąć BER poniżej progu kodu Reed-Solomon (255,239,8) aby otrzymać  $BER < 10^{-12}$  na wyjściu dekodera. Cztery elementy opóźniające można łatwo zaimplementować w analogowym układzie scalonym w technologii BiCMOS jako linię transmisyjną LC [79]. Wykorzystanie analogowego korektora pozwala na zmniejszenie zużycia energii i ominięcie ograniczenia w częstotliwości próbkowania konwerterów analogowo-cyfrowych.

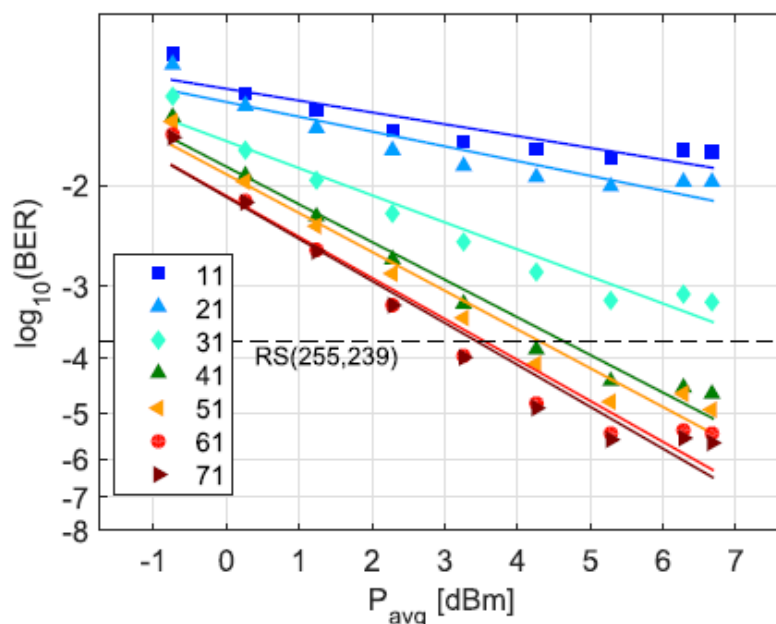


Rysunek 8 Układ pomiarowy w pracy [A3].



Rysunek 9 Pasma przenoszenia lasera, filtra w transmitterze oraz sumaryczna odpowiedź częstotliwościowa lasera oraz filtra.





Rysunek 10 Stopa błędów dla różnych długości korektora adaptacyjnego z zaznaczonym progiem kodu korekcyjnego.

**Zastosowanie** tej pracy przyjdzie w kolejnych generacjach łączy optycznych dla centrów danych i superkomputerów. Obecnie trwają prace wdrożeniowe dla łączy o przepływności 56 Gbps w jednym światłowodzie i jednej długości fali, następnym krokiem jest zwiększenie przepływności w jednym światłowodzie i jednej długości fali do 112 Gbps. Zastosowanie filtra „pre-emphasis” w nadajniku i korektora w odbiorniku pozwoli na zastosowanie modulacji 4-PAM przy tych prędkościach w systemach opartych o lasery typu VCSEL o paśmie przenoszenia około 25 GHz [60].

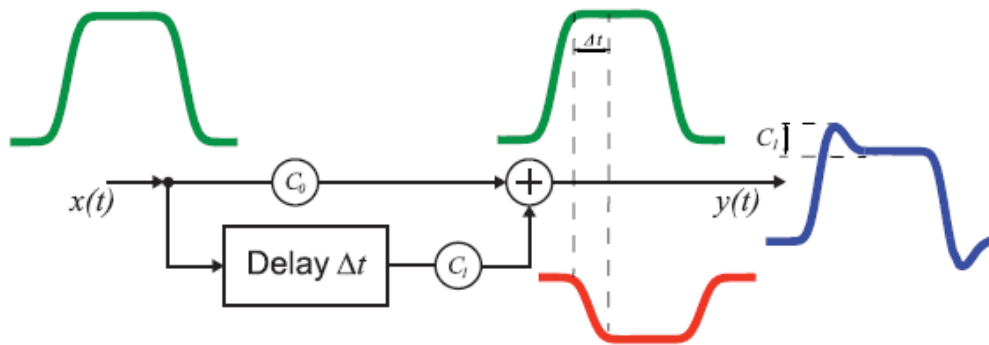
## 5.5 Omówienie wyników w publikacji [A4] pod tytułem „Sensitivity Improvements in an 850-nm VCSEL-Based Link Using a Two-Tap Pre-Emphasis Electronic Filter” oraz ich zastosowań

W tej pracy po raz pierwszy zaprezentowano jakościową i kwantytatywną analizę możliwości poprawy jakości łączy niekoherentnego (intensity modulation and direct detection, IM/DD) przy użyciu pre-kompensacji przy pomocy korektora sygnału zastosowanego w transponderze. Docelowa stopa błędów wynosiła  $10^{-12}$  przy prędkości transmisji rzędu 57 Gbps. Zastosowano analogowy filtr FIR o dwóch elementach opóźniających, zbudowany z dyskretnych komponentów mikrofalowych. Koncepcję implementacji filtra zilustrowano na Rys. 11.

Zmienny współczynnik  $C_1$  został zrealizowany eksperymentalnie jako szerokopasmowy wzmacniacz o zmiennym wzmocnieniu. W eksperymentach wykorzystano laser typu VCSEL o paśmie przenoszenia o szerokości 25 GHz. Opóźnienie, zaznaczone na Rys. 11 jako „Delay  $\Delta t$ ” zrealizowane zostało jako regulowany przesuwnik fazowy. Optymalne parametry opóźnienia i współczynnika  $C_1$  (współczynnik  $C_0$  pozostał stały) zostały najpierw znalezione w symulacji komputerowej w środowisku Matlab, a później zweryfikowane eksperymentalnie. Zanalizowano dwa przypadki:

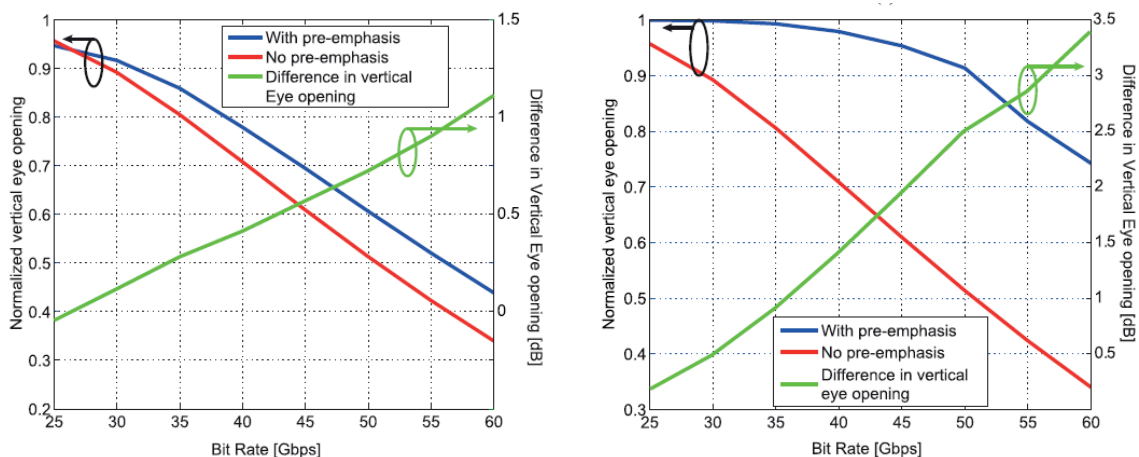
- 1) Ze stałą amplitudą sygnału modulującego VCSEL.
- 2) Ze stałym otwarciem diagramu oka sygnału modulującego VCSEL.

Znalezione w symulacji optymalne wartości  $C_1$  i opóźnień w funkcji przepływności użyte zostały w symulacji do obliczenia poprawy otwarcia diagramu oka po transmisji. Wyniki są zilustrowane na Rys. 12. Jak widać z rysunku w obydwu przypadkach nastąpiło poprawienie otwarcia diagramu oka, co przełożyło się na zmniejszenie stopy błędów w pomiarach eksperymentalnych, co zostało zilustrowane na Rys. 13. Jak widać z Rys. 13 w obydwu przypadkach podniesiona została maksymalna przepływność do 56 Gbps, ograniczona przez możliwości generatora sygnału i analizatora błędów.

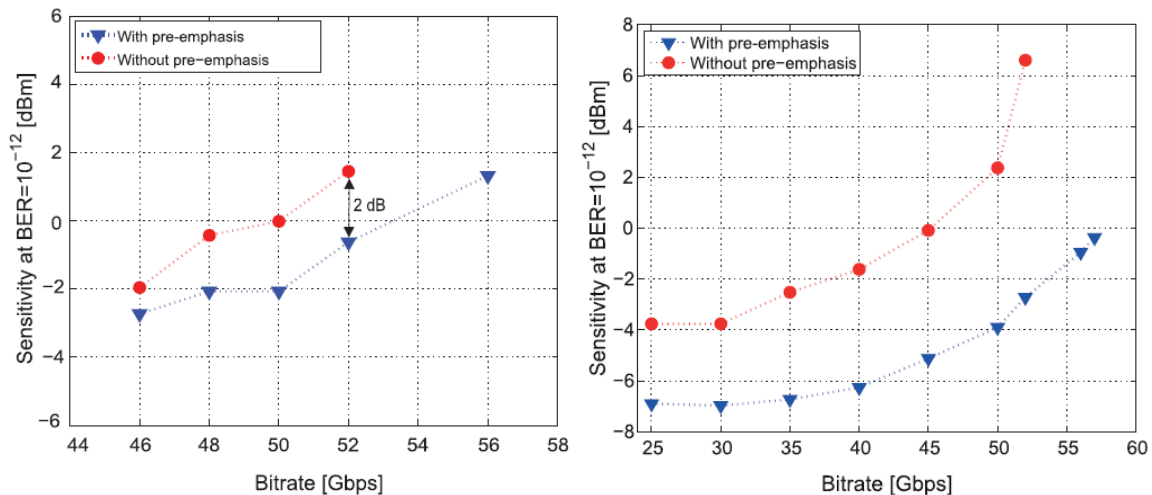


Rysunek 11 Koncepcja filtru FIR do pre-kompensacji w transmitterze.

**Zastosowanie** tych wyników jest możliwe w energooszczędnych łączach optycznych wykorzystujących modulację OOK. Przykładem mogą być łącza typu „co-packaged optics”, gdzie transponder optyczny w formie „chiplet” jest zintegrowany w sposób hybrydowy na interposerze z układem CMOS przełącznika sieciowego. Zastosowanie przedstawionego rozwiązania umożliwi transmisję z prędkościami rzędu 56 Gbps przy użyciu istniejących laserów typu VCSEL o paśmie przenoszenia do 25 GHz. Rozwiązania takie są kluczowe dla nowych generacji switchy dla zastosowań w centrach danych, ponieważ umożliwiają



Rysunek 12 Poprawa otwarcia diagramu oka dla konfiguracji, gdzie utrzymano stałą amplitudę sygnału (po lewej) oraz dla konfiguracji, gdzie utrzymano stałe otwarcie diagramu oka w transmitterze (po prawej).

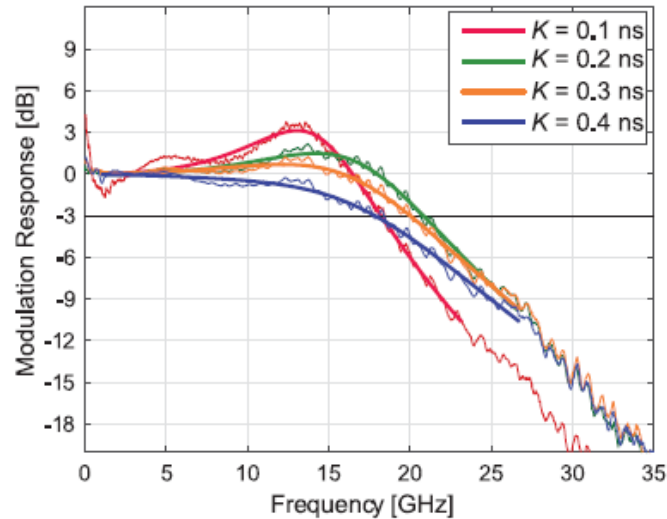


Rysunek 13 Ilustracja poprawy jakości transmisji dla przypadku ze stałą amplitudą (po lewej) i ze stałym otwarciem diagramu oka w transmierze (po prawej).

dramatyczne zwiększenie gęstości przepływności w porównaniu do rozwiązań typu „edge optics” i „midboard optics”. Dodatkowo, pozwoli to na uniknięcie degradacji sygnału przez propagację sygnału przez linie transmisyjne na substracie organicznym typu FR4. Łącza elektryczne oparte na linach transmisyjnych na FR4 mają możliwość pracy z większym stosunkiem sygnału do szumu, ale za to z o wiele mniejszym pasmem przenoszenia niż transmisja optyczna. Z kolei transmisja optyczna ma szersze pasmo przenoszenia, ale o wiele bardziej ograniczony stosunek sygnału do szumu, ponieważ moc sygnału optycznego jest ograniczona do 0 dBm poprzez wymagania związane z bezpieczeństwem wzroku.

## 5.6 Omówienie wyników w publikacji [A5] pod tytułem “Impact of damping on 50 Gbps 4-PAM modulation of 25G class VCSELs” oraz ich zastosowań

W tej pracy po raz pierwszy przeanalizowany został wpływ tłumienia lasera na zachowanie modulacji 4-PAM w krótkich łączach optycznych. Tłumienie w laserach półprzewodnikowych jest zazwyczaj kwantyfikowane jako współczynnik K (K-factor), wyrażany w jednostkach czasu. Dla laserów zoptymalizowany dla modulacji OOK wartość tego współczynnika jest optymalizowana dla uzyskania jak największej szerokości pasma przenoszenia. W przypadku modulacji 4-PAM bardzo ważne jest uniknięcie oscylacji przy przejściach między symbolami oraz minimalizacja szumu intensywności względnej. Głównym czynnikiem mającym wpływ na współczynnik K jest okres życia fotonów, który jest regulowany poprzez absorbcję we wnęce rezonansowej lasera, oraz współczynnik odbicia górnego zwierciadła lasera. Wydłużony okres życia fotonów powoduje zwiększenie współczynnika K i zwiększenie tłumienia. Wpływ współczynnika K na odpowiedź częstotliwościową lasera pokazany jest na Rys. 14. Pomiar zrealizowany został na czterech laserach o identycznej strukturze warstwy epitaksjalnej, wyprodukowanych na tym samym substracie w tym samym procesie oraz o tej samej średnicy apertury tlenkowej. Okres życia fotonów został zmodyfikowany poprzez wytrawienie ostatniej warstwy górnego lustra Bragga.

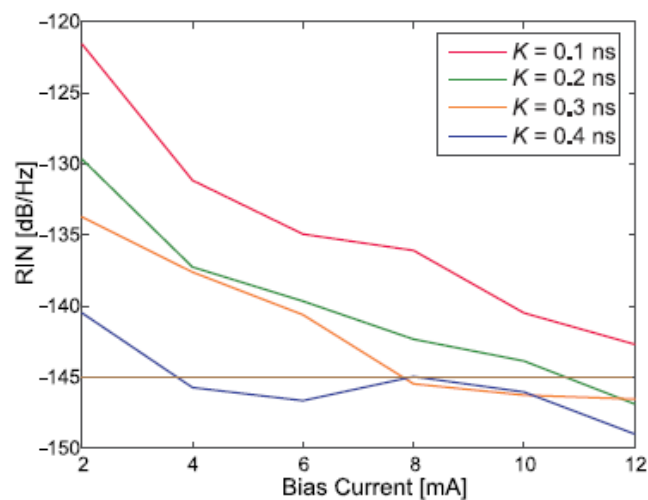


Rysunek 14 Wpływ współczynnika  $K$  na odpowiedź częstotliwościową lasera przy prądzie pracy 12 mA.

Jak widać wartość  $K=0.2$  ns maksymalizuje szerokość pasma przenoszenia lasera. Efekt współczynnika  $K$  na szum relatywnej intensywności (ang. relative intensity noise, RIN) pokazany jest na Rys. 15. Zwiększone tłumienie powoduje zmniejszenie RIN. RIN został zmierzony przy pomocy klasycznej metody z użyciem elektrycznego analizatora spektrum. Wartość RIN potrzebna do transmisji 50 Gbps 4-PAM powinna być poniżej -145 dB/Hz.

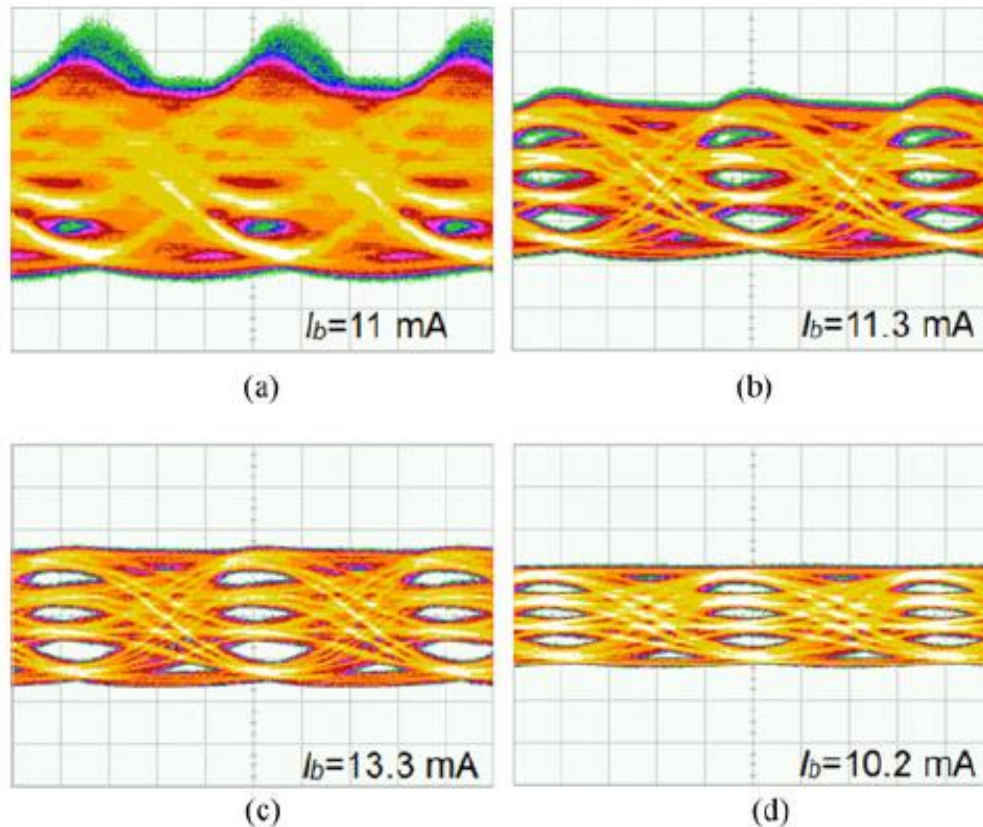
Diagramy oka dla 4-PAM dla czterech wartości współczynnika  $K$  pokazano na Rys. 16. Jak widać niskie wartości współczynnika  $K$  powodują znaczące przesterowanie sygnału, duże wartości współczynnika  $K$  powodują obniżenie sprawności lasera i pasma przenoszenia.

Optymalną wartością współczynnika  $K$  okazało się być 0.3 ns, co zostało potwierdzone przez pomiary współczynnika stop błędów. Jedynie laser z  $K=0.3$  ns pozwolił na osiągnięcie  $BER < 10^{-12}$ . Podsumowując, optymalna wartość współczynnika  $K$  jest większa dla modulacji 4-PAM niż dla OOK.



Rysunek 15 Uśredniona widmowa gęstość mocy szumu relatywnej intensywności dla różnych wartości współczynnika  $K$ .



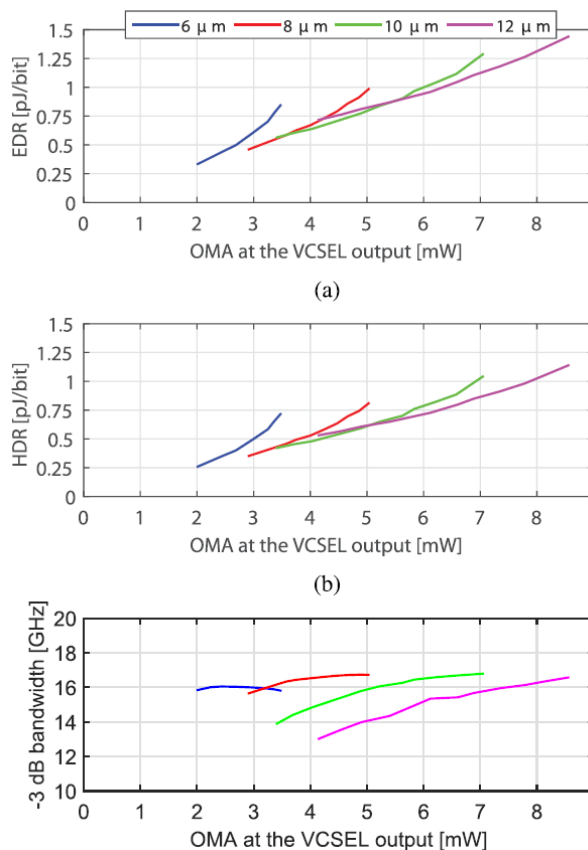


Rysunek 16 Diagramy oka dla współczynnika  $K$  równego odpowiednio 0.1 ns (a), 0.2 ns (b), 0.3 ns (c) oraz 0.4 ns (d).

**Zastosowanie** – wyniki tej pracy są znaczące dla projektantów laserów które mają być użyte w krótkich łączach optycznych z wielopoziomową modulacją, zwłaszcza biorąc pod uwagę fakt, że optymalne tłumienie dla modulacji 4-PAM jest większe niż dla modulacji OOK.

## 5.7 Omówienie wyników w publikacji [A6] pod tytułem “Energy Efficiency of VCSELs in the Context of Short-Range Optical Links” oraz ich zastosowań

W tej pracy po raz pierwszy zmierzona została energia zużyta na bit informacji w laserze typu VCSEL, z uwzględnieniem wymaganej mocy optycznej. Dotychczasowe badania pomijały zagadnienie wymaganej mocy optycznej, które jest bardzo ważne w kontekście zastosowania wielopoziomowych formatów modulacji, skupiając się głównie na przepływności i średnicy apertury tlenkowej w laserze typu VCSEL. W pracy tej wykazane zostało, że energia na przesłany bit dla wysokich współczynników wygaśnięcia (ang. extinction ratio, ER) jest zależna głównie od wymaganej amplitudy sygnału optycznego (optical modulation amplitude, OMA) na wyjściu lasera. Zmiana rozmiaru apertury tlenkowej powoduje, że poprawia się szerokość pasma przenoszenia przy niskim natężeniu prądu punktu pracy, ale zmniejsza się maksymalna moc lasera i jego sprawność przy większych natężeniach prądu. W efekcie, kiedy możemy dowolnie dostosować średnicę apertury tlenkowej, dla każdej wymaganej wartości OMA możemy osiągnąć podobne pasmo przenoszenia. Podsumowanie tego efektu dla czterech średnic apertury tlenkowej dla ER = 6 dB pokazane jest na Rys. 17.



Rysunek 17 Zużycie energii na bit oraz pasmo przenoszenia w laserze typu VCSEL w funkcji OMA. HDR oznacza "heat to data ratio", EDR oznacza "electrical energy to data ratio". Dane dla ER = 6 dB.

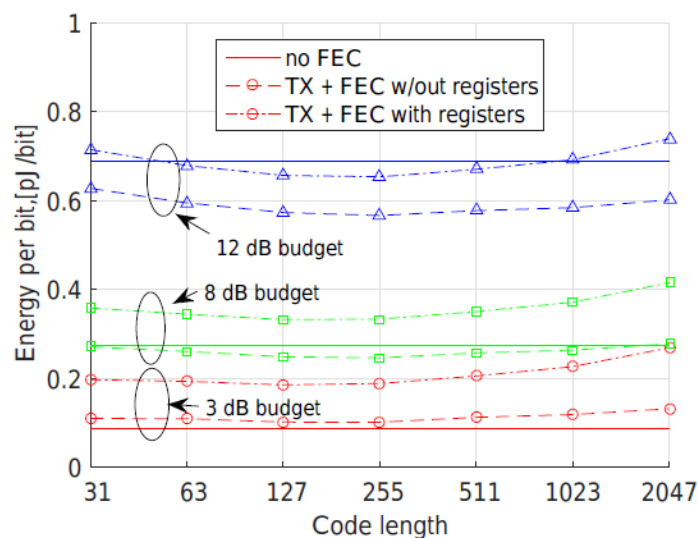
Na Rys. 17 zilustrowana jest rozproszona moc cieplna na przesłany bit (heat to data ratio, HDR) oraz całkowita moc elektryczna na wejściu do lasera VCSEL (electrical energy to data ratio, EDR) oraz pasmo przenoszenia mierzone do punktu -3 dB.

W rezultacie pojawia się możliwość zmniejszenia zużycia energii na bit w laserze poprzez zmniejszenie wymaganej ilości mocy optycznej dzięki np. zastosowaniu kodów korekcyjnych, do daje możliwość zastosowania laserów o mniejszej średnicy apertury tlenkowej. W dalszej części mojej pracy zanalizowany został kompromis pomiędzy zużyciem energii koderów i dekodek prostych kodów korekcyjnych a zużyciem energii laserów i ich sterowników.

**Zastosowanie:** wyniki te mają duże znaczenie we współczesnych systemach „optical interconnect”, ponieważ zużycie energii jest jednym z krytycznych aspektów operacji centrów danych. Znajomość fundamentalnych zależności pomaga zbudować bardziej energooszczędne systemy o lepszych osiągnięciach. Wyniki tej pracy stanowią rozszerzenie pracy grupy badawczej na TU Berlin, gdzie pokazane została transmisja danych o przy bardzo niskim zużyciu energii na przesłany bit informacji przy użyciu laserów o małej średnicy apertury tlenkowej [65, 66].

5.8 Omówienie wyników w publikacji [A7] pod tytułem “Impact of Forward Error Correction on Energy Consumption of VCSEL-based Transmitters” oraz ich zastosowań

W tej pracy po raz pierwszy wykazane zostało, że zastosowanie kodów korekcyjnych może zmniejszyć całkowite zużycie energii w łączu optycznym. Praca bazuje na wynikach otrzymanych w [A6]. Kod korekcyjny BCH (Bose–Chaudhuri–Hocquenghem) korygujący jeden błąd na słowo kodowe może zmniejszyć zużycie energii nadajnika opartego na laserze typu VCSEL. W przypadku dużych budżetów mocy łączy redukcja ta jest większa niż dodatkowe zużycie energii w obwodach kodowania korekcyjnego, a więc osiąga się zmniejszenie zużycia energii netto w systemie. Rejestry przesuwne koderów i dekodek kodów korekcyjnych mogą być również współdzielone z kodowaniem długości przebiegu (ang. run length coding), co oznacza, że narzut energii dla kodowania korekcyjnego jest zminimalizowany. Całkowite zużycie energii w łączu dla budżetów mocy wynoszących 3 dB, 8 dB i 12 dB zostało zilustrowane na Rys. 18. Jak widać redukcja całkowitego zużycia energii z uwzględnieniem zużycia energii w rejestrach następuje przy budżecie łącza równym 12 dB. Jeśli założymy że te rejestry i tak muszą być w systemie dla kodowania długości przebiegu, zmniejszenie zużycia energii na przesłany bit następuje już przy budżecie wynoszącym 8 dB.



Rysunek 18 Zużycie energii na bit w łączu w funkcji długości słowa kodowego dla budżetów łącza wynoszących 3 dB, 8 dB i 12 dB.

Istnieje dalszy potencjał zmniejszenia zużycia energii w obwodach FEC przy użyciu bardziej zaawansowanych technologii CMOS, o mniejszym wymiarze charakterystycznym i przy niższym napięciu zasilania. W przypadku bardziej wydajnych obwodów FEC redukcja zużycia energii nastąpi przy niższym budżecie łącza.

**Zastosowanie:** Wyniki tej pracy posłużą zmniejszeniu całkowitego zużycia energii w krótkich łączach optycznych. Zmniejszenie zużycia energii na bit przesłanej informacji pozwoli na zmniejszenie potrzeby chłodzenia transponderów, co z kolei pozwoli na ich umieszczenie bliżej układu scalonego przełącznika i ich ewentualny co-packaging z tym układem, co da bardziej kompaktowy, tańszy i bardziej energooszczędny system o większej przepływności.

## 5.9 Omówienie wyników w publikacji [A8] pod tytułem „Low-power low-latency BCH decoders for energy-efficient optical interconnects” oraz ich zastosowań

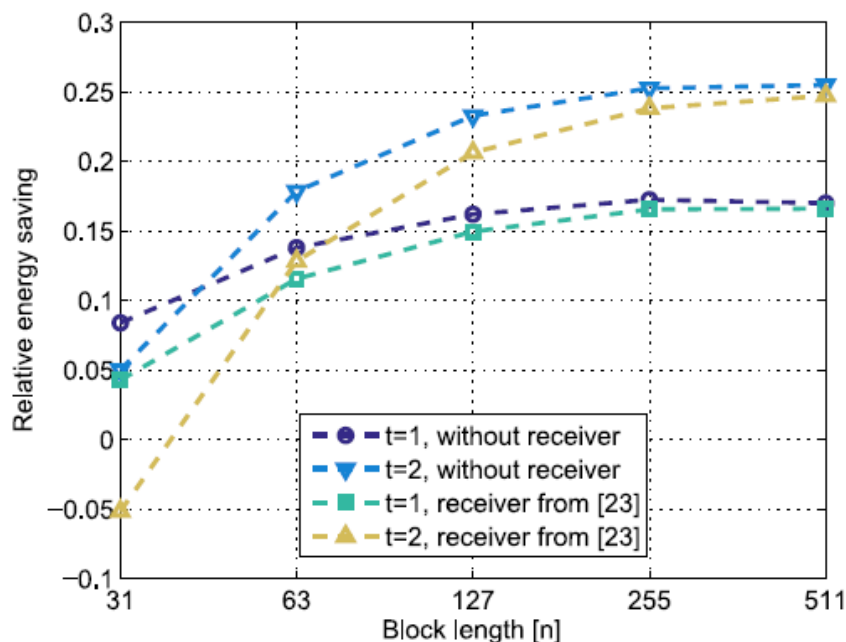
W tej pracy pokazano po raz pierwszy, że lekkie kody BCH, zaimplementowane przy użyciu nie-iteracyjnych dekodek algebraicznych o niskiej latencji, wraz ze skojarzonymi koderami, mogą zapewnić całkowitą redukcję energii nawet w krótkich łączach optycznych zbudowanych przy użyciu nawet najbardziej efektywnych dopasowanych sterowników laserów VCSEL

wykonanych w technologii CMOS. Praca ta bazuje na wynikach pokazanych w [A6, A7], przede wszystkim na sformułowanej w [A6] zależności zużycia energii na przesłany bit od wymaganego OMA. Zmniejszenie zużycia energii nastąpiło poprzez możliwość zastosowania dekodery algebraicznych i tablicą syndromów kodów korekcyjnych. Takie architektury dekodery mają sens przy lekkich kodach BCH. Przy długich kodach o większej zdolności korekcji błędów lepiej sprawdzają się klasyczne dekodery oparte o algorytm Berlekamp-Massey i Chien search do lokalizacji błędów. Takie rozwiązanie zużywa jednak zbyt wiele energii na bit aby móc zmniejszyć całkowite zużycie energii na przesłany bit w łączu.

Najlepsza implementacja kodowania korekcyjnego (algebraiczna,  $t = 2$ ) umożliwi redukcję zużycia energii na przesłany bit o 25%, nawet biorąc pod uwagę fakt, że nadmiar kodowania powoduje zmniejszenie efektywnie przesłanych bitów informacji. Przyjęty scenariusz oceny zakładał sterowniki laserów VCSEL zbudowane w energooszczędnej technologii CMOS o wymiarze charakterystycznym 28 nm, co oznacza, że wykazana redukcja zużycia energii nastąpi nawet w przypadku bardziej rozpowszechnionej technologii sterowników SiGe.

Chociaż możliwe jest użycie dekodery z tablicami syndromów i osiągnięcie działania przy małej mocy, proponowane implementacje dekodera algebraicznego są zarówno lepsze pod względem powierzchni obwodu (która przekłada się zarówno na koszt jak i zużycie energii), jak i wydajności energetycznej, gdy  $t = 2$ . W przypadku kodów Hamminga ( $t = 1$ ), dekodery oparte o tabele syndromów i dekodery algebraiczne działają niemal identycznie.

Proponowane dekodery algebraiczne są nieiteratywne, co sprawia, że opóźnienie (latencja) jest bardzo krótkie i możliwe do wdrożenia przy bardzo dużej przepływności, a zatem może być wykorzystane do poprawy efektywności energetycznej krótkich łącz optycznych. Relatywne zmniejszenie zużycia energii względem systemu bez kodowania korekcyjnego jako funkcja długości kodu zaprezentowane jest na Rys. 19. Jak widać możliwe jest zmniejszenie zużycia energii do 25%, przy założeniu wydajnych sterowników CMOS. Redukcja zużycia energii byłaby jeszcze bardziej znacząca w przypadku zastosowania sterowników w technologii SiGe.



Rysunek 19 Relatywne zmniejszenie zużycia energii względem systemu bez kodowania korekcyjnego jako funkcja długości kodu.

**Zastosowanie:** Zaprezentowane wyniki pokazują dalszą drogę do zmniejszenia zużycia energii w krótkich łączach optycznych centrach danych i superkomputerach. Wykazano, że nawet w bardzo wydajnych systemach zbudowanych w całości w technologii CMOS możliwe jest zmniejszenie zużycia energii nawet o 25%, co jest znaczące w kontekście centrów danych.

### 5.10 Omówienie wyników w publikacji [A9] pod tytułem „PAM Performance Analysis in Multicast-Enabled Wavelength-Routing Data Centers” oraz ich zastosowań

Praca ta bazuje na poprzednich wynikach zaprezentowanych w [80], gdzie zaproponowane zostały innowacyjne architektury sieci optycznych dla zastosowań w centrach danych, w szczególności w Top-of-the-Rack-Interconnect. Architektury te eliminują wykorzystanie przełączników elektrycznych, zastępując je elementami pasywnymi, takimi jak arrayed waveguide gratings (AWG) i pasywnymi sprzęgaczami optycznymi. Routing następuje przez zmianę długości fali nadajnika i multipleksowanie w dziedzinie czasu.

W tej pracy opracowano i pokazano po raz pierwszy wielowarstwowy framework do wspólnej oceny wydajności modulacji PAM oraz adaptacji współczynnika kodowania w środowiskach centrów danych, które obsługują zarówno trasowanie długości fali, jak i multicast optyczny. Analiza ta wskazała na znaczący wpływ przesłuchu w AWG na modulację PAM wyższego rzędu w rozproszonych architekturach z ponownym wykorzystaniem długości fali. Stwierdzono, że adaptacja współczynnika kodowania w oparciu o kody korekcyjne o krótkiej długości słowa kodowego ma kluczowe znaczenie dla wielopoziomowych sygnałów PAM, które powinny przechodzić przez wiele etapów routingu w sieci.

W odniesieniu do ustawień w tym artykule stwierdzono, że 8-PAM zapewnia najlepszą wydajność dla połączeń kończących się w jednej domenie rozgłoszeniowej, podczas gdy 4-PAM daje wyższe efektywne przepływności dla połączeń obejmujących dwie domeny rozgłoszeniowe i etap bogaty w przesłuchy. Nadajniki PAM zdolne do dostosowania zarówno rzędu modulacji, jak i współczynnika kodowania zgodnie z ograniczeniami warstwy fizycznej i wymaganiami wyższych warstw sieciowych mogą służyć jako obiecująca, przełomowa technologia dla programowalnych centrów danych nowej generacji. Przyszłe prace powinny zbadać wspólną optymalizację współczynnika kodowania i kolejności modulacji dla takich nadajników-odbiorników, biorąc pod uwagę różne typy kodów (np. kody Bose'a, Ray-Chaudhuri i Hocquenghem (BCH) i splotowe) oraz długości bloków. Poza tym istnieje zapotrzebowanie na zestaw optycznych architektur centrów danych i algorytmów planowania, które obsługują ruch multicast, optymalizując wydajność i koszty między warstwami.

**Zastosowanie:** Zaprezentowany framework pozwala na wspólną optymalizację warstw fizycznej, transportowej i sieciowej. Pozwala to na totalną maksymalizację przepływności sieci.

### 5.10 Omówienie wyników w publikacji [A10] pod tytułem „A Simple Circuit-Level Model of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers Working Over a Broad Temperature Range” oraz ich zastosowań

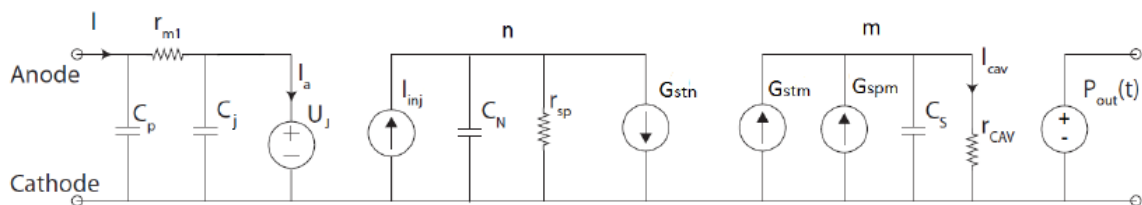
W pracy tej przedstawiony został model lasera typu VCSEL wykonany przy pomocy obwodu ekwiwalentnego dla symulatora Spectre. Model ten oparty jest o równania różniczkowe stanu lasera i pozwala na ko-symulację i ko-optymalizację laserów i ich sterujących układów scalonych. Jest to bardzo ważne dla optymalizacji transponderów dla krótkich łączy optycznych jeszcze na etapie projektowania. Pozwala to też na wybór optymalnych warunków pracy lasera w danym transponderze.



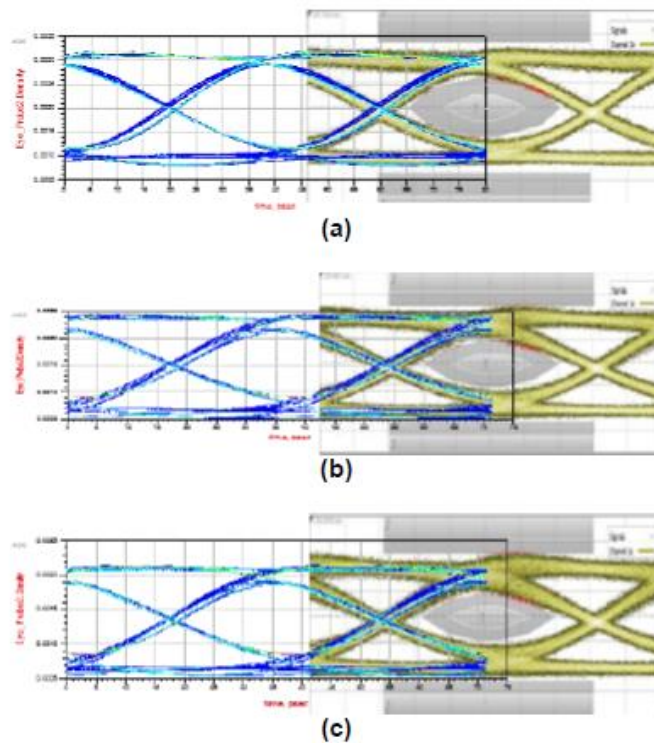
Pokazany model wykazuje bardzo dobrą korelację z mierzonymi wartościami, zarówno w zakresie analizy małosygnalowej (parametry S), pracy przy prądzie stałym oraz charakterystykę wielosygnalową w zakresie temperatur od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $95^{\circ}\text{C}$ .

Schemat implementacji modelu przedstawiony jest na Rys. 20. Pierwszy po-obwód modeluje elektryczne zachowanie lasera wraz z elementami pasożytniczymi. Drugi pod-obwód modeluje zachowanie liczby ładunków w obszarze aktywnym lasera. Trzeci pod-obwód modeluje ilość fotonów we wnęce rezonansowej lasera. Ostatni pod-obwód służy do wyjścia mocy optycznej z modelu. Nie został pokazany pod-obwód modelujący wzrost temperatury wynikający z samonagrzewania lasera. Temperatura obliczona w tym pod-obwodzie jest używana do obliczenia wartości zależnych od temperatury parametrów fizycznych modelu lasera. Wyniki symulacji wielosygnalowej przedstawione są na Rys. 21. Po raz pierwszy przedstawiono porównanie zachowania modelu z pomiarami wielosygnalowymi pracy lasera dla którego wykonano model w tak szerokim zakresie temperatur pracy.

Zaletą tego modelu, poza dokładną symulacją zachowania lasera w szerokim zakresie temperatur jest też dobra zbieżność tego modelu w symulacjach numerycznych.



Rysunek 20 Schemat obwodu ekwiwalentnego lasera.



Rysunek 21 Przykład zachowania wielosygnalowego, z wynikami symulacji modelu (na niebiesko) i z wynikami pomiarów (na żółto) lasera dla którego wykonano model. Zakres temperatur:  $25^{\circ}\text{C}$  (a),  $80^{\circ}\text{C}$  (b) i  $95^{\circ}\text{C}$  (c)

**Zastosowanie:** Przedstawiony model służy do współ- optymalizacji zachowania laserów typu VCSEL i układów scalonych nimi sterującymi oraz reszty systemu – odbiorników, układów przetwarzania sygnałów, takich jako korektory adaptacyjne i korektory pre-emphasis stosowane w nadajniku. Dokładne narzędzia symulacji pozwalają przyspieszyć cykle projektowe oraz znaleźć potencjalne problemy na bardzo wczesnym etapie projektowania systemu i zmniejszyć ilość potrzebnych cykli produkcji prototypów.

## 5.11 Podsumowanie mojego wkładu w rozwój nauki i technologii

Mój wkład w ramach wskazanego osiągnięcia:

1. Znaczące podniesienie prędkości transmisji w krótkich łączach światłowodowych dla centr danych i superkomputerów.
2. Pokazałem rekordowe w czasie publikacji prędkości przesyłu danych w takich łączach światłowodowych.
3. Rozpocząłem badania nad fundamentalnym zrozumieniem w limitach prędkości transmisji przy użyciu laserów typu VCSEL.
4. Określiłem właściwie problem badawczy w zakresie zmniejszenia zużycia energii na przesłany bit krótkich łączach optycznych. Wskazany przeze mnie kierunek doprowadził do późniejszych prac, gdzie wykazane zostało, że zastosowanie kodów korekcyjnych może prowadzić do zmniejszenia systemowego zużycia energii na przesłany bit.
5. Wykorzystałem moje doświadczenie z warstwą fizyczną systemów do pracy interdyscyplinarnej, gdzie przeprowadzona została optymalizacja na przekroju warstw sieciowych.
6. Rozpocząłem prace nad dokładnymi modelami laserów, które można wykorzystać w projektowaniu i optymalizacji szybkich łącz optycznych i ko-optymalizacji laserów z układami scalonymi.

## 6. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze.

### 6.1 Cykl dwóch publikacji:

- R. Lin, **K. Szczerba**, E. Agrell, L. Wosinska, M. Tang, D. Liu, J. Chen, "Scalability analysis methodology for passive optical interconnects in data center networks using PAM," *Optics Communications* 403, (2017): 283-289, doi.org/10.1016/j.optcom.2017.07.052.
- H. Rastegarfar, K. Keykhosravi, **K. Szczerba**, E. Agrell, L. LaComb and M. Glick, "Optical circuit granularity impact in TCP-dominant hybrid data center networks," 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Santa Clara, CA, 2017, pp. 318-322, 10.1109/ICCNC.2017.7876147.

Publikacje te są poświęcone innowacyjnej architekturze sieci optycznych dla centrów danych, eliminujących wykorzystanie przełączników elektrycznych w Top-Of-The-Rack interconnect. Pozwala to na znaczące zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Pojawia się jednak kompromis w formie dużych strat i przegłosu w systemie, dlatego konieczna jest optymalizacja systemu na przekroju warstw fizycznej, transportowej i sieciowej, aby zapewnić poprawne funkcjonowanie systemu. Głównym wynikiem tej pracy jest framework do między-warstwowej łączności optycznych, z uwzględnieniem aspektów fizycznych, rozmiaru modulacji, kodowania korekcyjnego i architektury sieci.

Prace nad tym problemem wykonane zostały w ramach współpracy między Chalmers Tekniska Högskola w Getenorgu, Kungliga Tekniska Högskola w Sztokholmie, Huazhong University of Science and Technology w Wuhan i University of Arizona w Tucson.

## 6.2 Cykl trzech publikacji:

- J.M. Castro, R. Pimpinella, B. Kose, P. Huang, B. Lane, **K. Szczerba**, P. Westbergh, T. Lengyel, J.S. Gustavsson, Larsson, A. And P.A. Andrekson „Investigation of 60 Gb/s 4-PAM Using an 850 nm VCSEL and Multimode Fiber,” IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 34(16), (2016): 3825-3836, 10.1109/JLT.2016.2549539.
- J. M. Castro, R. Pimpinella, B. Kose, Y. Huang, B. Lane, **K. Szczerba**, P. Westbergh, T. Lengyel, J. Gustavsson, A. Larsson and P. Andrekson, "48.7 Gb/s 4-PAM Transmission over 200 m of High Bandwidth MMF using an 850 nm VCSEL", IEEE Photonics Technology Letters 27 (17) (2015): 1799-1801. doi: 10.1109/LPT.2015.2441097.
- J. Castro, R. Pimpinella, B. Kose, Y. Huang, B. Lane, **K. Szczerba**, P. Westbergh, T. Lengyel, J. Gustavsson, A. Larsson and P. Andrekson, "50 Gb/s 4-PAM over 200 m of High Bandwidth MMF using a 850 nm VCSEL" Proc. 2015 Optical Fiber Communication Conference, 2015. doi: 10.1364/OFC.2015.W1D.1., Los Angeles,

Prace te poświęcone są wykorzystaniu dyspersji chromatycznej w specjalnie zaprojektowanym światłowodzie wielomodowym do kompensacji dyspersji międzymodalnej. Światłowód został dostarczony przez Panduit Corporation, pomiary zostały wykonane przeze mnie na Chalmers z wykorzystaniem naszych laserów typu VCSEL. Efektem prac był wydłużony zasięg transmisji przy przepływnościach rzędu 50 do 60 Gbps do 200 m światłowodu wielomodowego.

## 6.4 Zastosowania szeregu Voltery i sieci neuronowych do modelowania behawioralnego laserów półprzewodnikowych.

**K Szczerba**, C Kocot, “Behavioral modeling of VCSELs for high-speed optical interconnects”, Proc. SPIE Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII 10552, 1055204, DOI:10.1117/12.2295835, San Francisco, CA, USA, 2018.  
Zaproszony artykuł konferencyjny.

W pracy tej zaprezentowano po raz pierwszy wykorzystanie szeregów Voltery i sieci neuronowych do behawioralnego modelowania laserów typu VCSEL. Modele takie mają o wiele mniejszą złożoność obliczeniową w porównaniu do modeli opartych o równania różniczkowe. Unikają one również problemów ze zbieżnością modeli opartych o równania różniczkowe.

## 6.5 Wpływ tłumienia w laserze na transmisję przy użyciu 4-PAM.

T. Lengyel, E. P. Haglund, J. Gustavsson, **K. Szczerba**, A. G. Larsson, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, "Impact of Damping on 50 Gbps 4-PAM Modulation of 25G Class VCSELs," in



Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2017), paper W3G.2., doi.org/10.1364/OFC.2017.W3G.2, Los Angeles, California, United States, 2017.

Praca ta była preludem dla analizy zaprezentowanej później w publikacji [A5] o tym samym tytule, opublikowanej później w Journal of Lightwave Technology.

## 6.6 Sterowniki laserów VCSEL wykonane w technologii InP dla modulacji 4-PAM.

J. Chen, Z. S. He, T. Lengyel, **K. Szczerba**, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, H. Zirath, and A. Larsson. "An Energy Efficient 56 Gbps PAM-4 VCSEL Transmitter Enabled by a 100 Gbps Driver in 0.25  $\mu\text{m}$  InP DHBT Technology." *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* 34(21), (2016): 4954-4964, 10.1109/JLT.2016.2600591.

Praca ta polegała na zaprojektowaniu szerokopasmowego układu scalonego generującego sygnał 4-PAM z dwóch strumieni binarnych na wejściu, sterującego laserem typu VCSEL. Zaprezentowane zostały rekordowo szybkie wyniki transmisji 4-PAM, sięgające prędkości 120 Gbps, bez potrzeby zastosowania korektora sygnału.

## Bibliografia

- [1] C. Kachris, K. Bergman and I. Tomkos, "Optical interconnects for Future Data Center Networks," 05 01 2018. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/high-performance-computing-accurate-weather-forecast>. [Accessed 2019].
- [2] D. Kuchta, „Optics on the First Level Package for Servers and High Performance Computing,” w *Optical Fiber Communication Conference and Exhibition*, Anaheim, 2016.
- [3] B. Varghese i R. Buyya, „Next generation cloud computing: New trends and research directions,” *Future Generation Computer Systems*, tom 79, pp. 849-861, 2018.
- [4] R. Buyya i J. Son, „Software-Defined Multi-Cloud Computing: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions,” w *In International Conference on Computational Science and Its Applications*, 2018.
- [5] D. Schniederjans i D. Hales, „ Cloud computing and its impact on economic and environmental performance: A transaction cost economics perspective,” *Decision Support Systems*, tom 86, pp. 73-82, 2019.
- [6] A. Vahdat, H. Liu, X. Zhao i C. Johnson, „The emerging optical data center,” w *proc. Optical Fiber Communication Conference*, 2011.
- [7] A. Benner, „Optical interconnect opportunities in supercomputers and high end computing,” w *Optical Fiber Communication Conference*, 2012.

- [8] C. Cole, „Future datacenter interfaces based on existing and emerging optics technologies,” w *IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, 2013.
- [9] D. Coleman, „Optical trends in the data center,” *ICT Today*, tom 36, nr 5, pp. 16-22, 2015.
- [10] M. A. Taubenblatt, „Optical interconnects for high-performance computing,” *IEEE J. Lightw. Technol.*, tom 30, nr 4, pp. 448-457, 2012.
- [11] D. Mahgerefteh, C. Thompson, C. Cole, G. Denoyer, T. Nguyen, I. Lyubomirsky, C. Kocot i J. Tatum, „Techno-economic comparison of silicon photonics and multimode VCSELs,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 34, nr 2, pp. 233-242, 2016.
- [12] J. Tatum, „VCSEL proliferation,” w *Proc. SPIE 6484:648403-648403-7*, 2007.
- [13] E. Haglund, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, E. P. Haglund, A. Larsson, M. Geen i A. and Joel, „30 GHz bandwidth 850 nm VCSEL with sub-100 fJ/bit energy dissipation at 25-50 Gbit/s,” *Electronics Letters*, tom 51, nr 4, pp. 1096-1096, 2015.
- [14] P. Moser, J. A. Lott, P. Wolf, G. Larisch, H. Li, N. N. Ledentsov i D. Bimberg, w *Proc. SPIE 8639-86390V-86390V-8*, San Francisco, 2013.
- [15] R. Safaisini, K. Szczerba, P. Westbergh, E. Haglund, B. Kögel, J. S. Gustavsson, M. Karlsson, P. Andrekson i A. Larsson, „High-speed 850 nm quasi-single-mode VCSELs for extended-reach optical interconnects,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, tom 5, nr 7, pp. 686-695, 2013.
- [16] R. Safaisini, K. Szczerba, E. Haglund, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, A. Larsson i P. Andrekson, „20 Gbit/s error-free operation of 850 nm oxide-confined VCSELs beyond 1 km of multimode fibre,” *Electronics letters*, tom 48, nr 19, pp. 1225-1227, 2012.
- [17] R. Pimpinella, „Datacenter Dynamics,” [Online]. Available: <https://www.datacenterdynamics.com/opinions/future-fiber-optics-data-center/>. [Data uzyskania dostępu: 06 03 2019].
- [18] R. Rosales, M. Zorn i J. Lott, „30-GHz Bandwidth With Directly Current-Modulated 980-nm Oxide-Aperture VCSELs,” *IEEE Photonics Technology Letters*, tom 29, nr 23, pp. 2107-2110, 2017.
- [19] A. Larsson, J. Gustavsson, E. Haglund, E. Haglund, T. Lengyel, E. Simpanen i M. Jahed, „VCSEL modulation capacity: Continued improvements or physical limits,” w *IEEE Optical Interconnects Conference*, 2017.
- [20] A. Larsson, J. Gustavsson, P. Westbergh, E. Haglund, E. Haglund, E. Simpanen, T. Lengyel, K. Szczerba i M. and Karlsson, „VCSEL design and integration for high-capacity optical interconnects,” w *Proc. SPIE Optical Interconnects XVII (Vol. 10109, p. 101090M)*, San Francisco, 2017.
- [21] H. Dalir i F. Koyama, „29 GHz directly modulated 980 nm vertical-cavity surface emitting lasers with bow-tie shape transverse coupled cavity,” *Applied Physics Letters*, tom 103, nr 9, 2013.

- [22] H. Dalir, A. Matsutani, M. Ahmed, A. Bakry i F. Koyama, „High frequency modulation of transverse-coupled-cavity VCSELs for radio over fiber applications,” *IEEE Photonics Technology Letters*, tom 26, nr 3, pp. 281-284, 2014.
- [23] T. Kondo, J. Hayakawa, N. Jogan, A. Murakami, J. Sakurai, X. Gu i F. Koyama, „Temperature dependence of small signal response of 850 nm transverse-coupled-cavity VCSELs,” w *In 2016 International Semiconductor Laser Conference*, 2016.
- [24] H. Ibrahim, M. Ahmed i F. Koyama, „Design of 100Gbps double transverse coupled cavity VCSELs,” w *Proc. 22nd Microoptics Conference*, 2017.
- [25] H. Dalir i F. Koyama, „Highly stable operations of transverse-coupled cavity VCSELs with enhanced modulation bandwidth,” *Electronics Letters*, tom 50, nr 11, pp. 823-823, 2014.
- [26] K. Panajotov, M. Zujewski i H. Thienpont, „Coupled-cavity surface-emitting lasers: spectral and polarization threshold characteristics and electrooptic switching,” *Optics Express*, tom 18, nr 26, pp. 27525-27533, 2010.
- [27] S. Fryslie, M. Siriani, D. Siriani, M. Johnson i K. Choquette, „37-GHz modulation via resonance tuning in single-mode coherent vertical-cavity laser arrays,” *IEEE Photonics Technology Letters*, tom 27, nr 4, pp. 415-418, 2015.
- [28] J. Tatum, D. Gazula, L. Graham, J. Guenter, R. Johnson, J. King, C. Kocot, G. Landry, I. Lyubomirsky, A. MacInnes i E. Shaw, „VCSEL-based interconnects for current and future data centers,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 33, nr 4, pp. 727-732, 2015.
- [29] R. Motaghiannizam, I. Lyubomirsky, Daghighian, K. C. H., T. Gray, J. Tatum, A. Amezcua-Correa, M. Bigot-Astruc, D. Molin, F. Achten i P. Sillard, „Four 45 Gbps PAM4 VCSEL based transmission through 300 m wideband OM4 fiber over SWDM4 wavelength grid,” *Optics Express*, tom 24, nr 15, pp. 17193-17199, 2016.
- [30] T. Huynh, F. Doany, D. Kuchta, D. Gazula, E. Shaw, J. O'Daniel i J. Tatum, „4× 50Gb/s NRZ shortwave-wavelength division multiplexing VCSEL link over 50m multimode fiber,” w *Proc. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2017.
- [31] Finisar Corp., „APPLICATION NOTES Optical Modes In VCSELs,” [Online]. Available: [https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/application\\_note\\_vcsele\\_optical\\_modes.pdf](https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/application_note_vcsele_optical_modes.pdf). [Data uzyskania dostępu: 08 03 2019].
- [32] E. Haglund, J. S. Gustavsson, J. Bengtsson, Å. Haglund, A. Larsson, D. Fattal, W. Sorin i M. Tan, „Demonstration of post-growth wavelength setting of VCSELs using high-contrast gratings,” *Optics Express*, tom 24, nr 3, pp. 1999-2005, 2016.
- [33] V. Karagodsky, B. Pesala, C. Chase, W. Hofmann, F. Koyama i C. Chang-Hasnain, „Monolithically integrated multi-wavelength VCSEL arrays using high-contrast gratings,” *Optics Express*, tom 18, nr 2, pp. 694-699, 2010.
- [34] M. Gebski, O. Kuzior, M. Wasiak, A. Szerling, Wójcik-Jedlińska, A., N. Pałka, M. Dems, Y. Xie, Z. Xu, Q. Wang i D. Zhang, „High-contrast grating reflectors for 980

nm vertical-cavity surface-emitting lasers,” w *High Contrast Metastructures IV (Vol. 9372, p. 937206)*, 2015.

- [35] B. Zhu, T. Taunay, M. Yan, M. Fishteyn, G. Oulundsen i D. Vaidya, „70-Gb/s multicore multimode fiber transmissions for optical data links,” *IEEE Photonics Technology Letters*, tom 22, nr 22, pp. 1647-1649, 2010.
- [36] B. Lee, D. Kuchta, F. Doany, C. Schow, C. Baks, R. John, P. Pepeljugoski, T. Taunay, B. Zhu, M. Yan i G. Oulundsen, „120-Gb/s 100-m transmission in a single multicore multimode fiber containing six cores interfaced with a matching VCSEL array,” w *IEEE Photonics Society Summer Topicals 2010*, 2010.
- [37] P. Westbergh, J. Gustavsson i A. Larsson, „VCSEL arrays for multicore fiber interconnects with an aggregate capacity of 240 Gb/s,” *IEEE Photonics Technology Letters*, tom 27, nr 3, pp. 296-299, 2015.
- [38] P. Westbergh, J. Gustavsson, A. Larsson, T. Taunay, L. Bansal i L. Grüner-Nielsen, „ Crosstalk characteristics and performance of VCSEL array for multicore fiber interconnects.,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, tom 21, nr 6, pp. 429-435, 2015.
- [39] K. Szczerba, P. Westbergh, J. Karout, J. Gustavsson, Å. Haglund, M. Karlsson, P. Andrekson, E. Agrell i A. Larsson, „4-PAM for high-speed short-range optical communications,” *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, tom 4, nr 11, pp. 885-894, 2012.
- [40] K. Szczerba, P. Westbergh, M. Karlsson, P. A. Andrekson i A. and Larsson, „60 Gbits error-free 4-PAM,” *Electronics Letters*, tom 49, nr 15, pp. 953-955, 2013.
- [41] J. Lavrencik, V. A. Thomas, S. Varughese i S. E. Ralph, „DSP-enabled 100 Gb/s PAM-4 VCSEL MMF links,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 35, nr 15, pp. 3189-3196, 2017.
- [42] J. Lavrencik, E. Simpanen, S. Varughese, A. Melgar, V. Thomas, J. S. Gustavsson, W. Sorin, S. Mathai, M. Tan, A. Larsson i S. E. Ralph, „Error-Free 100Gbps PAM-4 Transmission over 100m OM5 MMF using 1060nm VCSELs,” w *Optical Fiber Communication Conference*, 2019.
- [43] R. Motaghianezam, T. Pham, A. Chen, T. Du, C. Kocot, J. Xu i B. Huebner, „52 Gbps PAM4 receiver sensitivity study for 400GBase-LR8 system using directly modulated laser,” *Optics Express*, tom 24, nr 7, pp. 7374-7380, 2016.
- [44] L. Suhr, I. Lyubomirsky, H. Daghighian, C. Kocot, I. T. Monroy i J. J. V. Olmos, „Comparing 52 Gbps Duobinary and 4-PAM Transmission Over 100m OM-3 Fiber With 25 GHz Class VCSELs,” w *proc. Asia Communications and Photonics Conference*, 2015.
- [45] I. C. Lu, C. C. Wei, H. Y. Chen, K. Z. Chen, C. H. Huang, K. L. Chi, J. W. Shi, F. I. Lai i D. H. Hsieh, „Very high bit-rate distance product using high-power single-mode 850-nm VCSEL with discrete multitone modulation formats through OM4 multimode fiber,” *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, tom 21, nr 6, pp. 444-452, 2015.

- [46] W. A. Ling, I. Lyubomirsky, R. Rodes, H. M. Daghighian i C. Kocot, „Single-channel 50G and 100G discrete multitone transmission with 25G vcsel technology,” *J. Lightw. Technol.*, tom 33, nr 4, pp. 761-767, 2015.
- [47] J. Cartledge i A. Karar, „100 Gb/s intensity modulation and direct detection,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 32, nr 16, pp. 2809-2814, 2014.
- [48] C. Xie, P. Dong, S. Randel, D. Pileri, P. Winzer, S. Spiga, B. Kögel, C. Neumeyr i M. Amann, „Single-VCSEL 100-Gb/s short-reach system using discrete multi-tone modulation and direct detection,” w *Proc. Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2015.
- [49] E. Hugues-Salas, R. Giddings, X. Jin, J. Wei, X. Zheng, Y. Hong, C. Shu i J. Tang, „Real-time experimental demonstration of low-cost VCSEL intensity-modulated 11.25 Gb/s optical OFDM signal transmission over 25km PON systems,” *Optics Express*, tom 19, nr 4, pp. 2979-2988, 2011.
- [50] E. Tyler, M. Webster, R. Penty i I. White, „Penalty free subcarrier modulated multimode fiber links for datacomm applications beyond the bandwidth limit,” *IEEE Photonics Technology Letters*, tom 14, nr 1, pp. 110-112, 2002.
- [51] J. Kahn i J. Barry, „Wireless infrared communications,” *Proceedings of the IEEE*, tom 85, nr 2, pp. 265-298, 1997.
- [52] J. Carruthers i J. Kahn, „Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tom 14, nr 3, pp. 538-546, 1996.
- [53] J. Chen, Z. S. He, T. Lengyel, K. Szczerba, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, H. Zirath i A. Larsson, „An energy efficient 56 Gbps PAM-4 VCSEL transmitter enabled by a 100 Gbps driver in 0.25  $\mu\text{m}$  InP DHBT technology,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 34, nr 21, pp. 4954-4964, 2016.
- [54] I. Ozkaya, A. Cevrero, P. Francese, C. Menolfi, M. Braendli, T. Morf, D. Kuchta, L. Kull, M. Kossel, D. Luu i M. Meghelli, „A 56Gb/s burst-mode NRZ optical receiver with 6.8 ns power-on and CDR-Lock time for adaptive optical links in 14nm FinFET CMOS,” w *Proc. IEEE International Solid-State Circuits Conference-(ISSCC)*, 2018.
- [55] I. Ozkaya, A. Cevrero, P. Francese, C. M. T. Menolfi, M. Brändli, D. Kuchta, L. Kull, C. Baks, J. Proesel i M. Kossel, „A 60-Gb/s 1.9-pJ/bit NRZ Optical Receiver With Low-Latency Digital CDR in 14-nm CMOS FinFET.,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, tom 54, nr 4, pp. 1227-1237, 2018.
- [56] D. Kuchta, C. Schow, A. Rylyakov, J. Proesel, F. Doany, C. Baks, B. Hamel-Bissell, C. Kocot, L. Graham, R. Johnson i G. Landry, „A 56.1 Gb/s NRZ modulated 850nm VCSEL-based optical link,” w *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 2013.
- [57] D. Kuchta, Rylyakov, A.V., Schow, C.L., J. Proesel, C. Baks, P. Westbergh, J. Gustavsson i A. Larsson, „64Gb/s Transmission over 57m MMF using an NRZ Modulated 850nm VCSEL,” w *Optical Fiber Communication Conference*, 2014.

- [58] D. Kuchta, A. Rylyakov, C. Schow, J. Proesel, C. Baks, P. Westbergh, J. Gustavsson i A. Larsson, „A 50 Gb/s NRZ modulated 850 nm VCSEL transmitter operating error free to 90C,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 33, nr 4, pp. 802-810, 2015.
- [59] D. Kuchta, „Higher speed VCSEL links using equalization,” w *42nd European Conference on Optical Communication*, 2016.
- [60] S. Ralph, J. Lavrencik i A. Melgar, „VCSELs and 100G,” w *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIII (Vol. 10938, p. 1093803)*, 2019.
- [61] K. Szczerba, P. Westbergh, J. Karout, J. Gustavsson, Å. Haglund, M. Karlsson, P. Andrekson, E. Agrell i A. Larsson, „4-PAM for high-speed short-range optical communications,” *Journal of Optical Communications and Networking*, tom 4, nr 11, pp. 885-894, 2012.
- [62] S. Pavan, P. Decker, B. Klein i S. Ralph, „New model for mode partition noise and relative intensity noise in VCSEL-based optical links,” w *IEEE Photonics Conference*, 2013.
- [63] S. E. Ralph, J. Lavrencik i A. Melgar, „VCSELs and 100G,” w *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXIII Vol. 10938 pages 1093803*.
- [64] M. Dayarathna, Y. Wen i R. Fan, „Data center energy consumption modeling: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, tom 18, nr 1, pp. 732-794, 2016.
- [65] P. Moser, J. A. Lott i D. Bimberg, „Energy efficiency of directly modulated oxide-confined high bit rate 850-nm VCSELs for optical interconnects,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, tom 19, nr 4, pp. 1702212-1702212, 2013.
- [66] P. Moser, J. A. Lott, G. Larisch i D. Bimberg, „Impact of the oxide-aperture diameter on the energy efficiency, bandwidth, and temperature stability of 980-nm VCSELs,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 33, nr 4, pp. 825-831, 2015.
- [67] P. Moser, *Energy-Efficient VCSELs for Optical Interconnects*, Springer, 2015.
- [68] P. Baveja, B. Kögel, P. Westbergh, Gustavsson, J.S., Å. Haglund, D. Maywar, G. Agrawal i A. Larsson, „Assessment of VCSEL thermal rollover mechanisms from measurements and empirical modeling,” *Optics Express*, tom 19, nr 16, pp. 15490-15505, 2011.
- [69] W. Nakwaski, „Thermal aspects of efficient operation of vertical-cavity surface-emitting lasers,” *Optical and Quantum Electronics*, tom 28, nr 4, pp. 335-352, 1996.
- [70] W. Nakwaski i M. Osinski, „Thermal resistance of top-surface-emitting vertical-cavity semiconductor lasers and monolithic two-dimensional arrays,” *Electronics Letters*, tom 28, nr 6, pp. 572-574, 1992.
- [71] P. Mena, Morikuni, K. S. J.J., A. Harton i K. Wyatt, „A simple rate-equation-based thermal VCSEL model,” *A simple rate-equation-based thermal VCSEL model*, tom 17, nr 5, p. 685, 1999.

- [72] P. Mena, J. Morikuni, S. Kang, A. Harton i K. Wyatt, „A comprehensive circuit-level model of vertical-cavity surface-emitting lasers,” *Journal of Lightwave Technology*, tom 17, nr 12, p. 2612, 1999.
- [73] P. Desgreys, M. Karray, J. Charlot i Y. Herve, „Opto-Electro-Thermal Model of a VCSEL array using VHDL-AMS,” w *Proceedings of the 2002 IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation*, 2002.
- [74] M. Ghobadi, R. Mahajan, A. Phanishayee, Devanur, N., J. Kulkarni, G. Ranade, P. Blanche, H. Rastegarfar, M. Glick i D. Kilper, „Projector: Agile reconfigurable data center interconnect,” w *Proc. ACM SIGCOMM Conference*, 2016.
- [75] P. Wiatr, D. Yuan, L. Wosinska i J. Chen, „Optical Interconnect Architectures for Datacenters,” w *IEEE Photonics Conference*, 2018.
- [76] Y. Cheng, R. Lin, M. De Andrade, L. Wosinska i J. Chen, „Disaggregated Data Centers: Challenges and Tradeoffs,” *IEEE Communications Magazine*, 2018.
- [77] Muhammad, F. A., W. L. M. i J. Chen, „Joint optimization of resource allocation for elastic optical intra-datacenter network,” *IEEE Communications Letters*, tom 20, nr 9, pp. 1760-1763, 2016.
- [78] M. Kargar i M. Green, „A 10 Gb/s adaptive analog decision feedback equalizer for multimode fiber dispersion compensation in 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS,” w *Proceedings of ESSCIRC*, 2010.
- [79] J. Sewter i A. Carusone, „A CMOS finite impulse response filter with a crossover traveling wave topology for equalization up to 30 Gb/s,” *IEEE journal of solid-state circuits*, tom 41, nr 4, pp. 909-917, 2006.
- [80] R. Lin, Szczerba, K., E. Agrell, L. Wosinska, M. Tang, D. Liu i J. Chen, „Scalability analysis methodology for passive optical interconnects in data center networks using PAM,” *Optics Communications*, tom 403, pp. 283-289, 2017.

  
 20-03-2019