

データセンタ向け次世代 (400 Gbit/s) 光通信用 VCSEL アレイ

High-Speed Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Arrays for 400 Gbit/s Data Center Interconnects

青木 健志*
Takeshi Aoki

久保田 良輔
Ryosuke Kubota

吉本 晋
Susumu Yoshimoto

柳沢 昌輝
Masaki Yanagisawa

石塚 貴司
Takashi Ishizuka

小路 元
Hajime Shoji

世界的なIPトラフィックの急増に対応すべく、データセンタでは伝送速度400 Gbit/sの短距離光通信の導入が始まっており、そこでは多値変調方式PAM-4に対応したVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) アレイ製品が求められている。筆者らはPAM-4用VCSELを850 nm/900 nmの2波長のラインナップで開発した。本稿では変調帯域向上とノイズ低減に着目したデバイス設計の最適化、開発したPAM-4用VCSELの特性、およびアレイ製品に高く求められる特性均一性の改善について報告する。

This paper reviews the device design and performance of high-speed VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser) arrays for the next-generation short-reach 400 Gbit/s applications in data centers using a PAM-4 (4-level pulse amplitude modulation) format. The both 850-nm and 900-nm PAM-4 VCSELs have been optimized to improve dynamic performance and suppress noises for PAM-4 transmission. The new VCSELs exhibit good uniformity of characteristics, which is highly required for array products.

キーワード：VCSEL、PAM-4、データセンタ、400 Gbit/s、850 nm/900 nm

1. 緒言

第5世代移動通信システムの実用化と、AI (人工知能)、VR/AR (仮想/拡張現実)、IoT (Internet of Things) 技術等の市場拡大を見据え、ネットワークの高速化へのニーズはますます高まっており、データセンタ内の通信インフラである光イーサネットでは、伝送速度100 Gbit/sから400 Gbit/sへの移行が加速している。短距離通信においては、近年、400 Gbit/s光通信規格の標準化が進められており⁽¹⁾、ここでは、多値変調方式PAM-4^{*1}に対応したVCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) が求められている。PAM-4は従来の2倍の情報を伝送できる変調方式であり、変調速度25 GbaudのPAM-4に対応したVCSELにより50 Gbit/sの伝送を実現する。400 Gbit/s光トランシーバでは、この50 Gbit/s PAM-4 VCSELを複数集積する方式が主流となる見込みであり、規格の一つである400G-SR8⁽²⁾では850 nm帯の1×8素子VCSELアレイ、別規格の400G-BD4.2 (2波長双方向通信、BiDi)⁽³⁾では850 nm帯と900 nm帯の1×4素子VCSELアレイが2波長1セットで求められている。

このような市場要求を踏まえ、筆者らはPAM-4用VCSELを850 nm/900 nmの2波長のラインナップで開発した。本稿では、PAM-4用のデバイス設計とその特性、および400 Gbit/s向けアレイ製品に高く求められる特性均一性について報告する。

2. デバイス設計

2-1 PAM-4用VCSELの要求性能

PAM-4は、4段階の光強度レベルを用いて信号を伝送する多値変調方式である。そのため、オン/オフのみ2段階の光強度レベルを用いる従来の変調方式NRZ (Non-Return-to-Zero) と比較して信号が複雑化しており、VCSELの動特性が光トランシーバにおける符号誤り率に与える影響は従来以上に大きい。具体的には、符号間干渉を抑えるために、従来よりも広い変調帯域と、周波数変化に対してフラットな周波数応答が求められるとともに、S/N比や相対強度雑音 (Relative Intensity Noise, 以下RIN)^{*2}の低減が必要である⁽⁴⁾。さらに、実用距離の光ファイバにおけるモード分配ノイズを抑えるため、スペクトル幅の狭窄化も求められる⁽⁵⁾。

これらの要求性能に応えるべく、当社28 Gbit/s NRZ用VCSEL⁽⁶⁾ (以下、28G VCSEL) をベースに、PAM-4用VCSEL (以下、PAM-4 VCSEL) のデバイス設計を行った。

2-2 デバイス構造

図1に当社酸化狭帯型VCSELの概略構造を示す。2波長 (850 nm/900 nm) とも同様である。エピタキシャル層構造は、GaAs基板上に有機金属気相成長法 (MOCVD法) により成長した。活性層には、歪みInGaAs/AlGaAs材料系からなる多重量子井戸 (MQW: Multiple Quantum Well) を用いた。この活性層の上下を、p型およびn型のAlGaAs多層膜反射鏡 (DBR: Distributed Bragg Reflector) で挟

み、基板と垂直方向に共振器 (Cavity) を構成した。共振器長は、縦方向の光閉じ込めとキャリア輸送距離の観点から、発振波長の2分の1の光路長となるように設計した。上部 p-DBR 層の活性層近傍には他よりも高い Al 組成の AlGaAs 層を1層配置し、メサエッチング後に水蒸気酸化プロセスによってこの層を選択的に酸化することで、電流狭窄と横方向の光閉じ込めのための酸化アパーチャを形成した。また、表面保護や出射面の反射率調整のために、誘電体膜を成膜した。

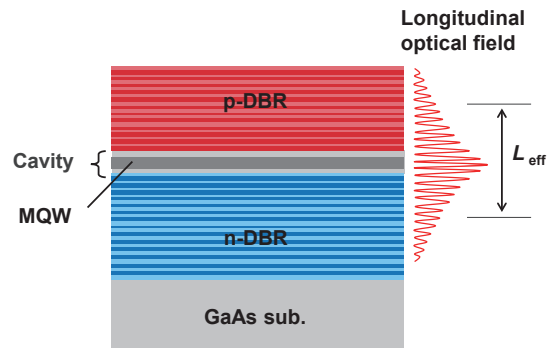


図2 エピタキシャル層構造と光強度分布

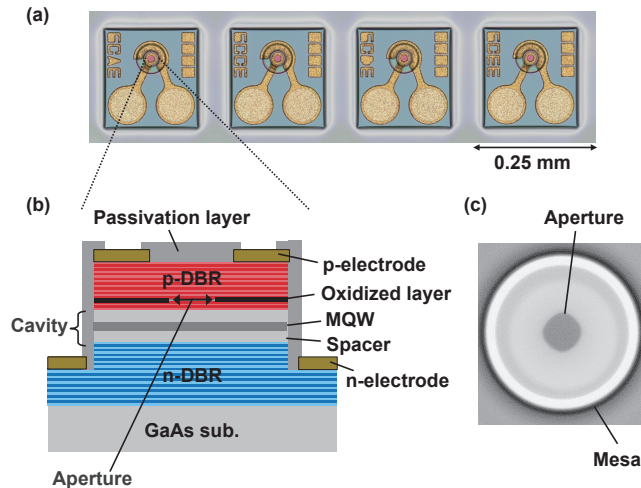


図1 VCSELの (a) 外観写真 (1×4アレイ)、(b) 断面構造、(c) 酸化アパーチャの外観像

2-3 高速化設計

VCSELの変調帯域は、キャリアと光子間の共振相互作用・固有減衰、電氣的寄生成分などによって制限されるが、広帯域化のためには緩和振動周波数 (f_r)^{※3}の向上が特に重要である。 f_r はバイアス電流密度 (J)、しきい値電流密度 (J_{th})、および D 係数により次式で表される⁽⁶⁾。

$$f_r = D\sqrt{J - J_{th}} \dots\dots\dots (1)$$

電流密度の増大により f_r が向上するが、電流密度の増大は素子の短寿命化を招く。また、VCSELは端面発光型レーザに比べて熱抵抗が高いため、高電流密度で f_r は熱飽和する。よって、比較的低い電流密度で高い f_r を得ることが望ましく、そのためには D 係数を高めることが重要である。 D 係数には共振器の光閉じ込めの強さと微分利得が強く影響するが、今回は前者に着目した。

図2は、VCSELの垂直方向のエピタキシャル層構造と、対応する縦モードの光強度分布の模式図である。光電界は上下のDBR層内にある程度侵入するため、実効的な共振器

長 (L_{eff}) は約1 μm の範囲に広がっている。この際、MQWと光強度分布の重なり積分のみが、キャリアと光の相互作用に寄与する。そのため、エピタキシャル層構造の設計においては、 L_{eff} をできるだけ短くして光をMQWに集める、すなわち光閉じ込めを強めることが肝要である。今回の設計では、上下のDBRと共振器の反射位相を厳密に整合させ、定在波の共振効果を最適化することで縦方向の光閉じ込め強化を図った。図3は、デバイスシミュレーションの過渡応答解析により求めた小信号周波数応答である。光閉じ込め強化によって、従来設計から2 GHz程度の広帯域化 (3dB帯域) を期待できることから、PAM-4 VCSELではこのエピタキシャル層構造設計を採用した。

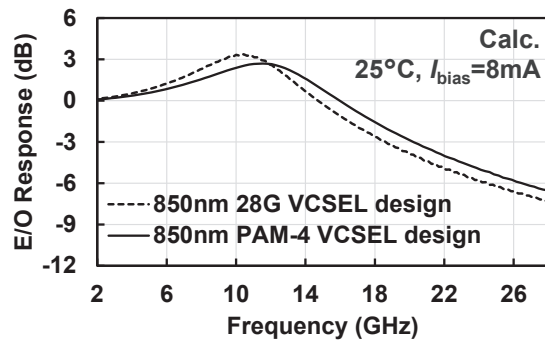


図3 周波数応答のシミュレーション

高品質の伝送波形を得るには、変調帯域を広げるだけでなく、周波数応答の適切な減衰 (ダンピング) も重要である⁽⁷⁾。図4の計算結果に示すように、ダンピングが弱い場合には周波数応答における緩和振動の共振ピークが高くなる。これは光出力波形におけるオーバーシュートや時間軸方向での揺らぎ (ジッタ) を引き起こすため、好ましくない。一方で、過剰なダンピングは帯域を狭める。このダン

ピングは f_r^2 に比例して強まる一方で、共振器の光子寿命にも左右される⁽⁶⁾。よって、広帯域かつフラットな周波数応答を得るには、 f_r 増大によって強まるダンピングを光子寿命によって緩和し、バランスを取ることが重要である。PAM-4 VCSELでは、DBR層のエピタキシャル成長および誘電体膜の成膜において、膜厚制御の高精度化を図り、射出面の反射率を厳密に調整することによって、光子寿命を最適化した。なお、反射率は光出力やしきい値利得にも影響するため、各特性間のトレードオフは十分に考慮した。

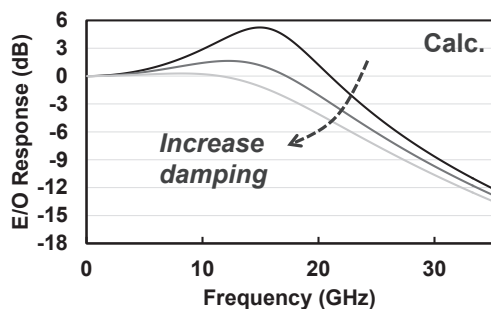


図4 ダンピングの強さと共振ピークの関係

2-4 横モード制御

VCSELの酸化アパーチャは、酸化膜の屈折率が半導体より低いことから光ファイバのコア/クラッドのように機能し、VCSELの横モードを決定する。当社のVCSELにはそのような横モードが複数存在し、マルチモードで発振する。マルチモード発振においては、各横モードの空間的な分布、波長間隔、および強度比が、発振スペクトルやノイズ発生に関係するため重要である⁽⁹⁾。そこで、この横モードを制御するため、アパーチャ形状の最適化を図った⁽¹⁰⁾。

図5は、回転対称、および非対称のアパーチャの観察像と、それぞれに対応した横モードごとの光強度分布（計算）である。また図6は、それぞれの素子で実測した発振スペクトルである。(a)の回転対称アパーチャ（円型）の発振スペクトルにおいて注目すべき点は、ほぼ同一の波長で複数の横モードが存在していることである（図6 (a) ピーク4, 5, 6）。すなわち、空間的に異なる光強度分布をもつ複数の横モードが、エネルギー的に競合している。これら波長の近い複数の横モードはお互いに相互作用し、モード間遷移を繰り返しながら発振するため、光出力の空間的ゆらぎとなりノイズ発生の一因となる。一方、対称性を崩したアパーチャ（図5 (b)）の発振スペクトルでは、これらのスペクトルが均等に分散されている（図6 (b)）。この場合、横モードの競合が抑えられ、ノイズの低減を期待できる。さらに、アパーチャの回転対称性を崩すことで偏波面が安定化する効果も報告されており⁽¹¹⁾、この効果もノイズの低

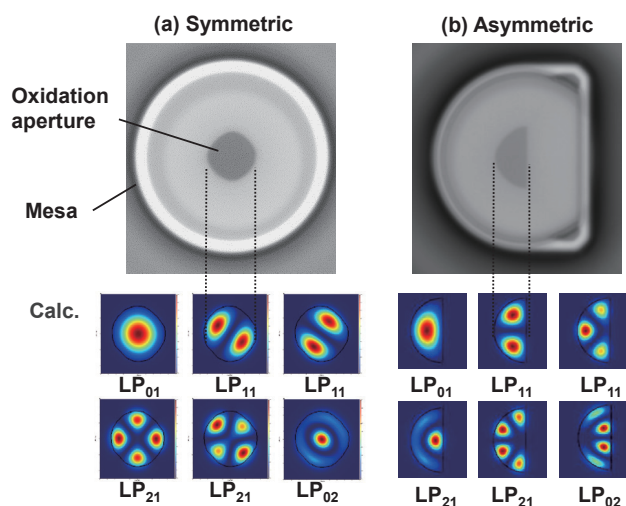


図5 回転対称/非対称アパーチャの横モード

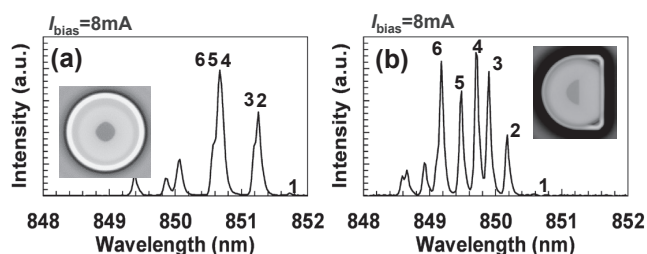


図6 回転対称/非対称アパーチャの発振スペクトル

減に寄与すると考えられる。PAM-4 VCSELではノイズの低減を目的に、このような回転非対称のアパーチャ形状を採用した。

3. デバイス特性

3-1 DC特性

図7は、発振波長850 nm/900 nmのPAM-4 VCSEL 1×4素子アレイの光出力特性 ($I-L$) である。4素子 (ch1~

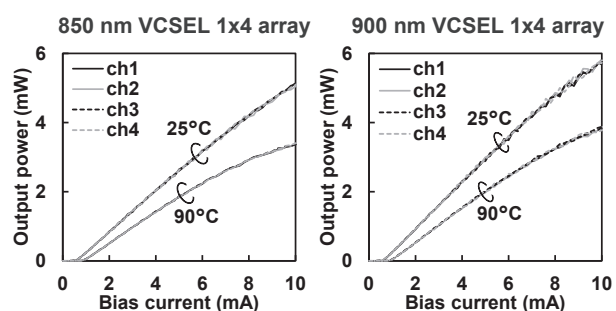


図7 光出力 vs. バイアス電流特性

ch4) の特性はよく一致している。90°Cにおいても各素子のしきい値電流 (I_{th}) は0.9 mA以下、スロープ効率 (SE) は0.4 W/A以上、光出力はバイアス電流8 mAで2 mW以上が得られた。また、自己発熱による光出力低下はバイアス電流10 mAにおいても顕在化しておらず、優れた温度特性を有するといえる。

850 nm VCSELのバイアス電流8 mAにおけるスペクトル幅は、25°Cで0.35 nm、90°Cで0.24 nm、900 nm VCSELでは25°Cで0.55 nm、90°Cで0.39 nmであった。これはIEEE P802.3cmの提案する規格 (850 nmで0.6 nm、900 nmで0.65 nm以下)⁽⁵⁾ を満たしている。

RINについては、一定バイアス (8 mA) を印加した状態で、DCA (digital communication analyzer) により出射光の平均強度と標準偏差を測定し算出した。850 nm VCSELでは-142.2 dB/Hz、900 nm VCSELでは-142.8 dB/Hzであった。これはTatumら⁽¹²⁾のガイドライン (-138 dB/Hz以下) をクリアしており、PAM-4向けの水準に達している。従来の28G VCSELからは4 dB/Hzほど低減できており、回転非対称アパーチャの導入による横モードと偏波面の安定化の効果といえる。

3-2 AC特性

図8は、PAM-4 VCSELの典型的な小信号周波数応答である。850 nm/900 nmともに、3dB帯域は室温で18.5 GHz以上に達し、90°Cにおいても17 GHzを上回った。28G VCSELとくらべて2 GHz以上の広帯域化を実現できており、これは先述のエピタキシャル層構造のチューニングによる f_r 増大の効果である。さらに、周波数応答における共振ピークは、90°Cにおいても3 dB以下にまで抑制さ

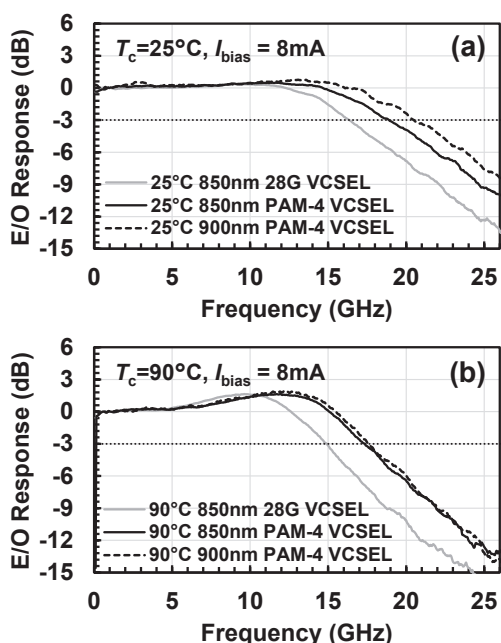


図8 小信号周波数応答

れている。光子寿命の制御によりダンピングを適切に調整できた結果といえる。

図9は、850 nm/900 nm PAM-4 VCSELの、バイアス電流8 mAにおけるPAM-4光出力波形である。高周波プローブと任意波形発生器 (AWG) を用いて25.5625 GbaudのPAM-4信号 (51.125 Gbit/s) を入力し、VCSELの光出力をオシロスコープに取り込むことで波形を観測した。

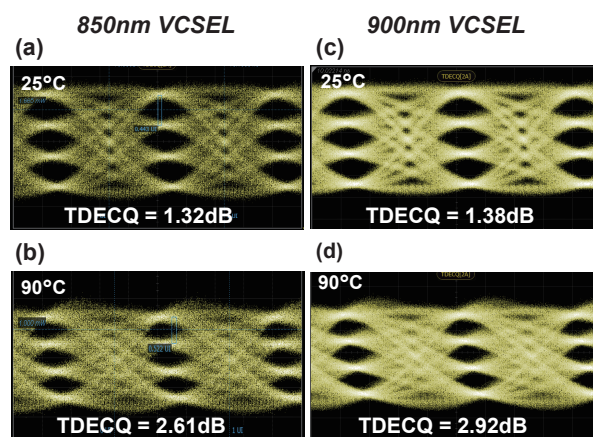


図9 PAM-4光出力波形 (アイパターン)

PAM-4波形の4つの強度レベルにおいてオーバーシュートやジッタがそれぞれ抑制され、良好なアイ開口が得られた。PAM-4波形の品質指標であるTDECQ^{*4)}は、高温 (90°C) においても3 dB以下であり、IEEE P802.3cm規格の要求4.5 dB以下⁽¹³⁾ を満たしている。この結果は、先ほど述べた17 GHz以上の広い帯域、フラットな周波数応答、および低いRINにより達成されたものである。このようにして、当社VCSELが2波長とも、PAM-4変調による50 Gbit/s以上の伝送に対応することを確認した。

3-3 特性均一性

400 Gbit/s用途の1×4または1×8 VCSELアレイ製品は、同一ウエハ内の、隣接した複数のVCSEL素子により構成される。そのため、アレイ製品としての特性均一性を高めるには、個々の素子において、従来よりも高いレベルの特性均一性が必要となる。光出力や帯域の分布はMOCVD成長とウエハプロセスの品質に起因するものであるが、製造技術の成熟によって、それらはすでに高いレベルにある。一方で、スペクトル幅とRINは素子ごとにランダムにばらついており、課題であった。

図10は、スペクトル幅とRINの均一性を評価した統計図である。一例として、850 nm VCSELの結果を示した。従来の28G VCSELに対しPAM-4 VCSELでは、スペクトル幅とRINのばらつきが顕著に改善していることがわかる。こ

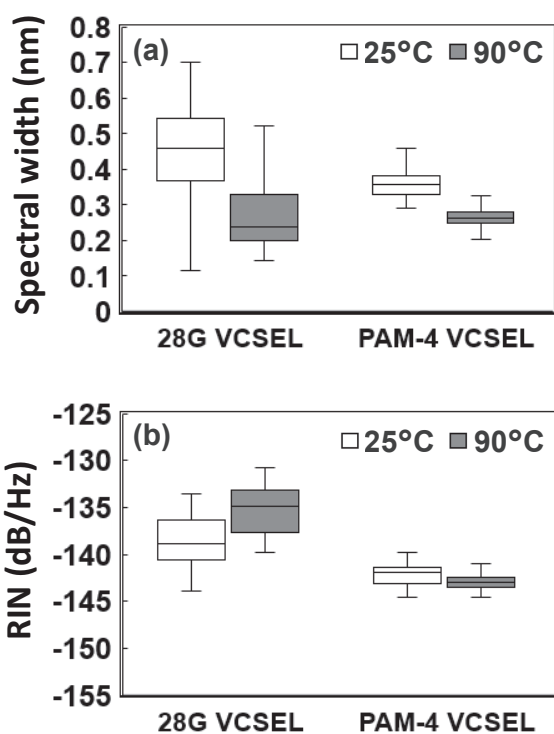


図10 スペクトル幅 (a) とRIN (b) の均一性

これは、先ほど述べたアパーチャ形状の最適化によって、横モードが従来よりも安定化したことによるものである。スペクトル幅とRINのばらつきが改善した結果、当社PAM-4 VCSELは、すべての特性において高い均一性を実現しており、400 Gbit/s用途として十分な品質を有しているといえる。

4. 結 言

本稿では400 Gbit/s短距離光通信に求められている850 nm/900 nm PAM-4 VCSEL アレイの開発について報告した。PAM-4変調において高品質な光出力波形を得るために、広帯域化については、エピタキシャル層構造のチューニングにより光閉じ込めを強化し、RINについては、酸化アパーチャ形状を最適化した。これにより、高温においても17 GHz以上の3dB帯域を達成し、RINについては、約4 dB/Hz低減することに成功した。これら特性改善の結果、PAM-4光出力波形にて2波長とも良好なアイ開口が得られた。さらに、アレイ製品において重要な特性均一性に関しては、スペクトル幅とRINの均一性を、横モードの安定化によって改善した。開発したPAM-4 VCSEL アレイは400 Gbit/s短距離光通信用途として十分な性能と品質を有している。

用語集

※1 PAM-4

4値のパルス振幅変調 (PAM: Pulse Amplitude Modulation) による変調方式。従来のNRZ (2値) 変調方式に比べて倍の情報を扱える。

※2 RIN

Relative Intensity Noise : レーザ光における光強度の揺らぎを平均光パワーにより正規化したもの。

※3 緩和振動周波数 (f_r)

入力電流の変化に対する光出力応答が急激に低下し始める周波数。半導体レーザの変調帯域を決定付ける。

※4 TDECQ

Transmitter and Dispersion Eye Closure for PAM4 : PAM-4波形品質指標の一つ。

参 考 文 献

- (1) IEEE P802.3cm, "400 Gb/s over Multimode Fiber Task Force," <http://www.ieee802.org/3/cm/public/index.html>
- (2) "QSFP-DD MSA," <http://www.qsfp-dd.com/>
- (3) "400G BiDi MSA," <https://www.400gbidi-msa.org/>
- (4) S. E. Ralph, "Requirements and Results for Practical VCSEL Transmission using PAM-4 over MMF," 2016 Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, Anaheim (USA), Mar. 2016, Tu2G.4
- (5) R. Murty, "RMS Spectral Width," IEEE 802.3 400 Gb/s over Multimode Fiber Task Force, Jan. 2019.
- (6) L. Coldren and S. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits," New York Wiley (1995)
- (7) Chuan XIE, 「超高速マルチモードファイバ通信用面発光レーザ、フォトダイオード」、SEIテクニカルレビュー第183号 (2013年7月)
- (8) E. P. Haglund, et al., "Impact of Damping on Large Signal VCSEL Dynamics," International Semiconductor Laser Conference (ISLC) , 7-10 (Sept. 2014)
- (9) J. Lavrencik, et al., "Optimum VCSEL Apertures for High-Speed Multimode Fiber Links," Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, M11.1, San Diego (USA) (Mar. 2018)
- (10) R. Kubota, et al., "850/900-nm VCSEL Arrays for 400 Gbit/s BiDi Applications," 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka (July 2019)
- (11) T. Yoshikawa, et al., "Complete polarization control of 8×8 vertical-cavity surface-emitting laser matrix arrays," Appl. Phys. Lett. 66, 908 (1995)
- (12) J. A. Tatum, et al., "VCSEL-Based Optical Transceivers for Future Data Center Applications," Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, M3F.6, San Diego (USA) (Mar. 2018)
- (13) J. Ingham, "Baseline proposal for a 400 Gb/s optical PMD supporting four MMF pairs," IEEE P802.3cm 400 Gb/s over Multimode Fiber Task Force (July 2018)

執筆者

青木 健志* : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



久保田良輔 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



吉本 晋 : 伝送デバイス研究所 グループ長補佐



柳沢 昌輝 : 伝送デバイス研究所 グループ長
博士 (工学)



石塚 貴司 : 伝送デバイス研究所 グループ長
博士 (工学)



小路 元 : 伝送デバイス研究所 部長
博士 (工学)



*主執筆者