光配線用1060 nm帯低消費電力VCSEL

喜瀬 智文, 清水 均, 那須 秀行

古河電気工業(株) ファイテル製品事業部門 (〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通6)

Low-Power Dissipation 1060-nm VCSELs for Optical Interconnect

Tomofumi KISE, Hitoshi SHIMIZU, and Hideyuki NASU

FITEL Products Division, Furukawa Electric Co., Ltd., 6 Yawata-kaigandori, Ichihara, Chiba 290-8555

(Received March 20, 2015)

We report the low-power dissipation 1060-nm VCSELs operating at a high modulation speed of 25 Gb/s or more. We achieved a direct modulation capability of 25 Gb/s with low-power dissipation less than 125 fJ/bit. We also successfully demonstrated 28 Gb/s error-free signal transmission at a long distance of 500 m using an MMF with a modal bandwidth maximized at 1060 nm. An accelerated aging test shows the high reliability of a VCSEL that has an estimated failure rate less than 70 FIT/ch. The 1060-nm VCSEL is a promising light source for future green data centers and high performance computer systems.

Key Words: Vertical cavity surface emitting laser, Multimode fiber link

1. はじめに

近年スマートフォン、クラウドの普及やビッグデータ活用の進展により、データセンターやスーパーコンピュータで扱われるデータ量は飛躍的に増え続けている。例えば、スーパーコンピュータの演算速度は4年毎に10倍のペースで伸びており、2020年にはペタフロップスの1,000倍の性能をもつエクサフロップスのマシンが開発されることが予測されている^{†1}。一方、高性能情報処理システムによるエネルギー消費も増大しており、スーパーコンピュータの消費電力は15 MWを上回る。一般家庭での平均電力使用量を400 Wとすると、これは約38,000世帯分に相当する。今後のスーパーコンピュータやデータセンターの進展とともに、システムの消費電力を抑制することは不可欠となってきている。

情報処理システムの性能向上に貢献する中核技術として、従来の電気配線に代わり、光による配線を実現する光インターコネクションが急速に普及している。伝送距離が数十メートル程度の装置ラック間伝送では、従来の電気ケーブルから、帯域や伝送距離に優れ、かつ同一の電気インターフェースを有するアクティブ光ケーブル(Active Optical Cable: AOC)^{†2}への置き換えが進んでい

る^{1,2)}。光インターコネクションを実現するレーザー光源としては、低消費電力かつ高速並列動作が可能な面発光レーザー(Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL)が広く採用されている³⁾。AOCには通常10ギガビットイーサネットの短距離用途として広く普及している波長850 nmのVCSELが搭載されている⁴⁾。一方、我々が開発を行ってきた波長1060 nmのVCSELは、動作電圧が低く、高微分利得のため低バイアス電流での高速動作が可能といった、低消費電力の観点からの利点を有している⁵⁾。

VCSELおよびそれを用いた光リンクの低消費電力化は、これまで複数の研究機関による取り組みがなされている⁶⁻⁸⁾。25 Gb/s動作において、VCSEL単体としては酸化開口径を3.5 μm と極小化した素子にて56 fJ/bitの低消費電力動作が報告されている⁶⁾。但しこの場合、電流密度上昇により信頼性に懸念が残る。また、90 nm CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)技術を用いた1060 nm VCSELベースの光リンクとして、1.1 pJ/bitという低消費電力動作も報告されている⁹⁾。さらに、VCSELの高速化の観点では、100 Gb/s用途ではレーン速度25 Gb/sの標準化が決まっているが^{†3}、その先の400 Gb/sの議論も始まっており、レーン速度50 Gb/sを視野に入れた検討が行われている^{†4}。BiCMOS(Bipolar CMOS)に

^{†1} URL: <http://www.top500.org>

^{†2} For example, Finisar web page: <https://www.finisar.com/active-optical-cables>

^{†3} URL: <http://www.ieee802.org/3/bm/index.html>

^{†4} URL: <http://www.ieee802.org/3/bs/index.html>

よるVCSEL driverにおいてFFE(Feed-Forward Equalization)技術により、850 nm VCSELを用いた71 Gb/sの高速動作が報告されている¹⁰⁾。

我々は、平成23年度から平成25年度の間、NEDOの「省エネルギー革新技術開発事業/先導研究/グリーン光リンク技術のための低消費電力面発光レーザーアレイの研究開発」に参画し、スパコン用1060 nm帯低消費電力VCSELの研究開発を行った。本稿では、その成果を含めて最新の開発状況について報告する。

2. 低消費電力28 Gb/s 1060 nm VCSEL

2.1 基本設計

25 Gb/s以上で動作するVCSELの基本設計に当たっては、高速性、低消費電力、高信頼性の全てを同時に達成することが求められた。検討すべき設計項目としては、1)活性層構造(材料)、2)デバイス構造、3)酸化層構造、に大別される。

活性層構造については、高速動作のための微分利得の向上を目的に、キャリア閉じ込めの観点から障壁層材料や量子井戸数のパラメータについて、利得計算等のシミュレーションによる検討を実施した。デバイス構造についても、高速動作を目的に、主に共振器化の短尺化を実施した。酸化層の構造設計については、主に注意すべき事項が2点ある。まず、被酸化層はVCSELにおける主要な寄生容量成分であり、厚膜化することによる容量低減、および適度な酸化開口径を維持し抵抗上昇を抑えることにより、RCによる電氣的な帯域制限を改善し、高速動作が実現できる。一方、被酸化層には歪が内在するため、特に酸化層が厚くなると歪が蓄積され素子の信頼性を劣化させる。これらの観点から、酸化層自体の厚さやメサ径/酸化開口径について構造最適化を行った。

2.2 素子構造と基本特性

当社の1060 nm帯VCSELの構造図をFig. 1に示す。GaAs基板上に、AlGaAs/GaAs系の半導体DBR(Distributed Bragg Reflector)、InGaAs/GaAs材料を用いた活性層を有する共振器、及び誘電体DBRから構成される。電流狭窄層は、高Al組成からなるAlGaAs層をメサ側面から水蒸気により選択的に酸化し、絶縁体であるAlO_xとした構造となっており、中央部の非酸化開口部分を通して電流が活性領域に注入される。素子構造としては、P電

Fig. 1 Device structure of 1060-nm VCSEL.

極、N電極共に、共振器内部に配置する構造(イントラキャビティ構造)となっている。本構造では、複数の半導体ヘテロ障壁を有する半導体DBRには電流が流れないため、安定した微分抵抗が得られる。また、上部DBRを誘電体で構成することにより、光学損失を低く抑えることができ、低しきい値電流動作が可能となる。このように本構造は低消費電力動作を実現する上でも有利である。

Fig. 2に試作した素子の25°Cにおける典型的な光出力-電流-電圧曲線を示す。酸化開口径は6 μmである。しきい値電流は0.45 mAであり、通常バイアス電流である6 mA時の動作電圧も2 V以下と低く抑えられている。

2.3 高速・低消費電力動作

25 Gb/s以上の高速動作のためには、変調周波数帯域の向上が必要である。一般的に半導体レーザーの周波数応答は、電気応答と光学応答の積で表され、両者の改善が必要である。電気応答はFig. 3に示すレーザー素子の等価回路によって決定される。 R_m 、 R_j はメサ部、接合部の抵抗、 C_m 、 C_p はメサ部、パッド部の寄生容量をそれぞれ表している。前述の通り主に酸化層における寄生容量を低減することが有効であり、酸化層厚さとメサ径/酸化開口径の最適化を行った。一方、光学応答はレーザーのレート方程式を用いて表現され、緩和振動周波数(Relaxation Oscillation Frequency: f_r)は式(1)のように表される¹¹⁾。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{dg}{dn} \frac{v_g \eta_i (I - I_{th})}{qV_a}} \quad (1)$$

光学応答の改善には、活性層体積 V_a の低減および微分

Fig. 2 Light-current and voltage-current characteristics measured at 25°C.

Fig. 3 Equivalent circuit model of the VCSEL.

利得 dg/dn の増加による f_r の改善が必要である。具体的な施策として、1)狭酸化開口径化、2)短共振器化、3)活性層構造変更による微分利得増加、を実施した。特に短共振器化は有効であるが、イントラキャビティ構造の場合、横方向の電流拡散層が薄くなるため抵抗増加につながる。これを抑制するため不純物ドーピング濃度の最適化が重要となる。

Fig. 4に各バイアス電流での f_r を示す。横軸はバイアス電流としきい値電流の差分の二乗根で示している。このグラフの傾きを表すD-ファクタは $10 \text{ GHz}/(\text{mA})^{1/2}$ と高い値が得られた。周波数応答特性をFig. 5に示す。実験的に3dB変調帯域を評価した結果、3 mA時に15 GHz、5 mA時に17 GHzがそれぞれ得られた。

次に、低消費電力動作の検証のため、室温において、異なるバイアス電流で測定した25 Gb/sのアイパターンをFig. 6に示す¹²⁾。酸化開口径は $5 \mu\text{m}$ である。低電流駆動状態について確認した結果、2 mA時でもアイ開口が得られた。3 mA時には、5 mAと遜色無い十分なアイ開口が得られていることが分かる。ここでビットあたりの消費電力(Power Dissipation)を、

$$(I \times V - P_0) / \text{bit rate} \quad (2)$$

と定義する。 P_0 は光出力である。消費電力は、Fig. 6中に記した通り、2 mA時に77 fJ/bit(0.077 mW/Gb/s)、3 mA時に125 fJ/bit(0.125 mW/Gb/s)と算出された。目標としていた0.3 mW/Gb/sを大きく上回る特性が25 Gb/sにおいて実現された。消光比も4~5dBが得られた。後述するように高信頼性も実現可能な上記素子設計において、1060 nm VCSELの優位性のひとつである低消費電力動作

Fig. 4 f_r plot vs square root of $(I - I_{th})$.

Fig. 5 Frequency response at 3 mA and 5 mA.

Fig. 6 25 Gb/s eye diagrams at different bias currents. Estimated power dissipations and measured extinction ratios are indicated at each bias current. (a) 2 mA, 77 fJ/bit, 5.6dB. (b) 2.5 mA, 100 fJ/bit, 4.9dB. (c) 3 mA, 125 fJ/bit, 4.4dB. (d) 5 mA, 250 fJ/bit, 3.7dB.

が検証できたと考えられる。さらに、より高速の28 Gb/sにおけるアイパターンを室温および85°Cにて測定した結果をFig. 7に示す。85°Cでは高温での帯域劣化による僅かなアイ開口の劣化が見られるが、いずれの温度においてもクリアなアイ開口が観測された。

3. 1060 nm VCSELによるマルチモード伝送

次に1060 nmに最適化したマルチモードファイバ (Multimode fiber: MMF)を用いた伝送実験について報告する¹³⁾。MMFを用いた光信号伝送において、伝送距離は、主にモード分散と波長分散によって制限される。モード分散については、これまでに標準化されているMMFでは、波長850 nmでモード分散が最小になるように設計されており、実効モード帯域(Effective Modal Bandwidth: EMB)の規格により、OM2, OM3, OM4に分類される。従って、850 nmと異なる波長で伝送した場合、モード分散の影響で伝送特性は大きく劣化する。一方、石英系光ファイバの波長分散は850 nmから1060 nmへと波長が長波長になると、 $-90 \text{ ps}/(\text{nm km})$ から $-34 \text{ ps}/(\text{nm km})$ まで減少するため、長波長の方が長距離伝送に有利である。そこで、1060 nm帯において、モー

Fig. 7 28 Gb/s eye diagrams at 25°C and 85°C. Extinction ratio of 4.1dB is observed at both temperatures. (a) 25°C, 6 mA. (b) 85°C, 8 mA.

ド分散が最小化するように設計されたMMFを用いて、VCSELによる光リンクを構成し伝送実験を行った。この1060 nm最適化MMFのコア径方向0~23 μm におけるDMD(differential mode delay)は、波長1050 nmにおいて0.12 ps/mと測定された。これはOM4に相当するモード分散であることを示している。Fig. 8に伝送実験の測定系を示す。本実験はVCSELを図中の写真に示す並列光モジュールに搭載して行った。送信機(Tx)モジュールにはVCSELアレイとVCSELドライバICが、受信機(Rx)モジュールにはInGaAs PDとTIAがそれぞれ実装されている¹⁴⁾。パルスパターンジェネレータ(Pulse Pattern Generator: PPG)SHF12100で発生した28 Gb/sのNRZ, PRBS31段の電気信号をTxモジュールに入力し、VCSELアレイから出射される信号光がマイクロレンズアレイで集光しファイバに結合されている。アイパターン測定時はファイバをサンプリングオシロスコープAgilent 86105D受信モジュールに接続し、ビットエラーレート(BER)測定時は、Rxモジュールに接続し、出力される電気信号をエラーディテクタ(Error detector: ED)SHF11102Aで測定を行う。本実験におけるVCSELのバイアス電流は7.1 mAとした。このバイアス電流におけるスペクトルのRMS線幅は約0.5 nmであった。

Fig. 9に28 Gb/s, PRBS 31段の変調信号を使ったBack to Backおよび500 m伝送後のアイパターンを示す。伝送後はアイ開口が小さくなっているが、500 mまで十分なアイ開口が観測された。また、Fig. 10に28 Gb/sのBER測定結果を示す。全ての伝送距離においてエラーフリー伝送が観測された。さらに、Fig. 11には28 Gb/sのBER測定

Fig. 8 System setup of transmission test. The inset picture shows a parallel optical transceiver module.

Fig. 9 28 Gb/s eye diagrams of Back to Back and after 500 m transmission. (a) Back to Back. (b) After 500 m transmission.

Fig. 10 BER curve of transmission test using MMF optimized for 1060-nm at 28 Gb/s.

Fig. 11 BER Bathtub curve of transmission test using MMF optimized for 1060-nm.

で得られたジッターバスタブ曲線を示す。500 m伝送時のトータルジッターはデュアルディラックモデルを用いて、特性を外挿することにより0.82 UIと見積もられ、かつジッターマージンがあることを確認した。

4. 1060 nm VCSELの信頼性

最後に、試作した素子の信頼性について紹介する。25 Gb/s VCSEL素子の高温での加速通電試験を120°C/6 mAにて実施した。Fig. 12には、バーンインによる初期スクリーニング後の素子に対する高温加速通電試験結果の一例を示す。バーンイン条件は、25 Gb/s素子用に温度および電流密度を最適化した。素子故障の基準は、通常VCSELの信頼性試験で使用されている光出力の2dB低下とし、図中に点線で示した。最大で約3,000時間の試験を行っており、試験素子2,246素子中、故障素子は1素子であった。加速係数を考慮すると、 5.5×10^7 device hourの試験時間に相当する。実用条件(40°C/6 mA)での偶発故障率として、90%のC.L.(Confidence Level)においてchあたり約70 FIT(Failure in Time)が得られ、目標としていた100 Fit/ch以下を達成した。この通電時間は、想

Fig. 12 Accelerated aging test results at 120°C 6 mA.

定される実際の動作環境(40°C, 6 mA)に換算すると約48年に相当する(活性化エネルギー $E_a = 0.7$ eVで換算). 本試験結果から今回開発した25 Gb/s VCSELが実用上十分な信頼性を有していることが示唆された.

5. まとめ

本稿では, 25 Gb/s以上で動作する低消費電力1060 nm VCSELは高効率特性を有し, 低電流で駆動できるため, VCSEL単体として125 fJ/bit以下の低消費電力動作を実現できることを示した. また, 1060 nmにモード分散を最適化したMMFを用いて, 28 Gb/sにて500 mまでエラーフリー伝送を実現した. 現在, データセンターの大規模化が進み, 光インターコネクションの長距離化が求められている¹⁵⁾. 本技術は長距離光リンク用途にとっても有望な技術と言える. また, 信頼性試験を実施した結果, 現時点で70 FIT/chという故障率が得られ, 高い信頼性を有することが示唆された. これらの技術が, 将来の低消費電力な情報処理システムの発展に貢献することを期待したい.

謝 辞

本研究の一部はNEDOの「省エネルギー革新技術開発

事業/先導研究/グリーン光リンク技術のための低消費電力面発光レーザーアレイの研究開発」より助成を受けた.

参考文献

- 1) Quad small form-factor pluggable (QSFP) transceiver specification revision 1.0 Dec. 2006.
- 2) 那須 秀行, 瀬尾 浩司: エレクトロニクス実装学会誌 **14** (2011) 537.
- 3) C. Ji, J. Wang, D. Soderstrom, K-L Chen, R. Murty, M. Keever, L. Giovane, J-K Hwang, G-H Koh, J. Tan *et al.*: *Proc. SPIE* **7229** (2009) 722904.
- 4) P. Westberg, J. S. Gustavsson, A. Haglund, M. Skold, A. Joel, and A. Larsson: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** (2009) 694.
- 5) K. Takaki, S. Imai, S. Kamiya, H. Shimizu, Y. Kawakita, K. Hiraiwa, T. Takagi, J. Yoshida, T. Ishikawa, N. Tsukiji, *et al.*: *Proc. SPIE* **7952** (2011), 795204.
- 6) P. Moser, J. A. Lott, P. Wolf, G. Larisch, H. Li, N. N. Ledentsov and D. Bimberg: *Electron. Lett.* **48** (2012) 1145.
- 7) S. Imai, K. Takaki, S. Kamiya, H. Shimizu, J. Yoshida, Y. Kawakita, T. Takagi, K. Hiraiwa, T. Suzuki, N. Iwai, *et al.*: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** (2011) 1614.
- 8) Yu-Chia Chang, and Larry A. Coldren: *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **15** (2009) 704.
- 9) J. B. Heroux, T. Kise, M. Funabashi, T. Aoki, C. L. Schow, A. V. Rylyakov, and S. Nakagawa: *IEEE J. Lightwave Technol.* **33** (2015) 733.
- 10) D. M. Kuchta, A. V. Rylyakov, F. E. Doany, C. L. Schow, J. E. Proesel, C. W. Baks, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, and A. Larsson: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** (2015) 577.
- 11) L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch: *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* (John Wiley & Sons, Inc., 2012) p.203.
- 12) T. Suzuki, M. Funabashi, H. Shimizu, K. Nagashima, S. Kamiya, and A. Kasukawa: *Proc. SPIE* **9001** (2014) 900104.
- 13) T. Kise, T. Suzuki, M. Funabashi, K. Nagashima, R. Lingle, D. S. Vaidya, R. Shubochlin, J. T. Kamino, X. Chen, S. R. Bickham, *et al.*: *Technical Digest of OFC2014* (2014) Th4G.3.
- 14) H. Nasu, K. Nagashima, and Y. Ishikawa: *IEEE J. Lightwave Technol.* **31** (2013) 4111.
- 15) X. Chen, S. R. Bickham, H-F Liu, O. I. Dosunmu, J. E. Hurley, and M-J Li: *Technical Digest of ECOC 2013* (2013) PD-4-F5.