

4.25 Gbps 850 nm VCSEL TOSAの開発

Development of 4.25 Gbps 850 nm VCSEL TOSA

岩井 則広*
Norihiko Iwai

有賀 麻衣子*
Maiko Ariga

池永 賀彦*
Yoshihiko Ikenaga

鈴木 宏明*
Hiroaki Suzuki

西片 一昭*
Kevin Nishikata

横内 則之*
Noriyuki Yokouchi

粕川 秋彦*
Akihiko Kasukawa

概要 近年、インターネットの爆発的な普及によりデータ伝送速度の高速化が求められている。また、デジタル家電の急速な普及にも後押しされ、今後、家庭内の各機器間通信への応用など、短距離データ通信の更なる普及が期待される。このような折、4.25 Gbpsで動作可能な850 nm VCSEL TOSAは、次世代のファイバチャンネル用光源として現在、世界の研究機関で開発が進められている。今回我々は、VCSEL素子構造の最適化及びTOSAの作製と特性評価を行った。その結果、4.25 Gbpsでの動作をはじめ、静特性、温度特性、信頼性等の各特性において、仕様を十分に満足することができた。

1. はじめに

近年、インターネットの爆発的な普及によりデータ伝送速度の高速化が求められている。また、デジタル家電の急速な普及にも後押しされ、今後、家庭内の各機器間通信への応用など、短距離データ通信の更なる普及が期待される。

一方、850 nm VCSEL¹⁾(vertical cavity surface emitting laser; 面発光レーザー)は、TOSA(transmitter optical sub-assembly)の形態で、ギガビットイーサやファイバチャンネルといったデータコミュニケーション用のトランシーバに搭載され、既に実用化されている。従来のVCSEL TOSAは伝送速度2.5 Gbps以下が主流であったが、ファイバチャンネルでは現在4.25 Gbpsへの高速化が精力的に行われており、今後4.25 Gbpsで動作可能なVCSEL TOSAが必要とされる。

今回我々は、4.25 Gbpsで動作可能な850 nm VCSEL TOSAを作製し、4.25 Gbpsでの動作をはじめ、静特性、温度特性、信頼性等の各特性の評価を行った。その結果、仕様を十分に満足する特性が得られたので以下に報告する。

2. VCSEL素子構造及びその最適化

TOSAの特性は、高周波の変調特性を除き、ほぼVCSEL素子の特性で決定される。本章では、850 nm VCSEL素子の構造と設計の最適化に関して報告する。

2.1 VCSEL素子の構造

今回開発を行った酸化層閉じ込め型構造²⁾では、Al酸化層に

より電流と光を有効に閉じ込めることで、低しきい値電流、高効率等の優れた特性が実現されている^{3), 4)}。また、電流対光出力(L/I)特性、電流対電圧(V/I)特性等の各特性は、前記Al酸化層により囲まれた発光領域の径(酸化アパーチャ径)に大きく依存する。即ち、酸化アパーチャサイズを調整することで所望の特性を得ることが可能である。

図1に、波長850 nm帯酸化層閉じ込め型VCSELの断面模式図を示す⁵⁾。p型GaAs基板上に、p型のAl_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 35ペアからなる下部多層膜反射鏡(distributed Bragg reflector; DBR-mirror)、GaAs/Al_{0.2}Ga_{0.8}As多重量子井戸からなる活性層(λ -cavity)、n型のAl_{0.2}Ga_{0.8}As/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 25ペアからなる上部多層膜反射鏡を積層した構造である。下部DBRミラー中の活性層に最も近い低屈折率層に、電流及び光閉じ込めを行うためのAlAs(水蒸気酸化によりAl酸化層を形成する)層を形成した。また、寄生容量低減のためポリイミド上にパッド電極を形成した。

今回は酸化アパーチャサイズを振った素子を作製し、各特性の評価を行い、素子(酸化アパーチャサイズ)構造の最適化を図った。

2.2 素子構造の最適化

表1に、4.25 Gbps VCSEL TOSAの仕様の一部を示す。今回は数ある特性の中から、トランシーバの設計において最も重要であり、酸化アパーチャサイズに対してトレードオフの関係にある、しきい値電流、微分抵抗について報告する。なお、測定はウエハ状態で25℃、DC駆動にて行った。また、しきい値電流、波長、スロープ効率、微分抵抗の温度依存性についても合わせて報告する。

* 研究開発本部 横浜研究所

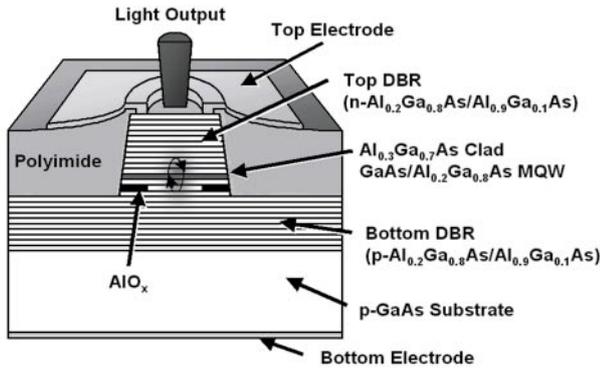


図1 酸化層閉じ込め型VCSELの断面模式図
Schematic structure of oxide confined VCSEL.

最終的にはTOSAにアッセンブルした状態での特性が重要となるが、ここで報告する各特性については、素子とTOSAにアッセンブルした状態での特性に差がほとんどないことから、今回は素子状態で最適化を行った。

表1 4.25 Gbps VCSEL TOSAの仕様
Specification of 4.25 Gbps VCCEL TOSA.

項目	最小値	最大値
しきい値電流 (mA)	-	2.5
微分抵抗 (Ω)	25	50
しきい値電流の温度依存性 (mA)	-1	+1
波長の温度依存性 (nm/°C)	-	0.07
スロープ効率の温度依存性 (ppm/°C)	-	-4500
微分抵抗の温度依存性 (ppm/°C)	-	-3000

図2に、しきい値電流の酸化アパーチャサイズ依存性の結果を示す。しきい値電流は酸化アパーチャサイズに対してほぼ線形の相関であり、表1に示したTOSAの仕様を満たすためには、酸化アパーチャサイズを130 μm²以下に設定すれば良いことが分かる。

また、図3に、微分抵抗の酸化アパーチャサイズ依存性の結果を示す。微分抵抗はアパーチャサイズに対して反比例の相関であり、表1に示した仕様を満たすためには、酸化アパーチャサイズを60 ~ 120 μm²の範囲に設定すれば良いことが分かる。

以上の結果から、しきい値電流と微分抵抗の仕様を満たすためには、酸化アパーチャサイズを60 ~ 120 μm²の範囲に設定すれば良いことが分かった。

次に、温度特性の結果について説明する。図4、5、6、7に、しきい値電流、波長、スロープ効率、微分抵抗それぞれの温度依存性の結果を示す。測定はウエーハ状態で、温度範囲20 ~ 70°C、DC駆動にて行った。

この結果、しきい値電流の変化量は±0.2 mA、波長の温度依存性は0.59 nm/°C、スロープ効率の温度依存性は-3300 ppm/°C、微分抵抗の温度依存性は-2500 ppm/°Cが得られ、すべての特性において表1の仕様を満たしていることが確認できた。

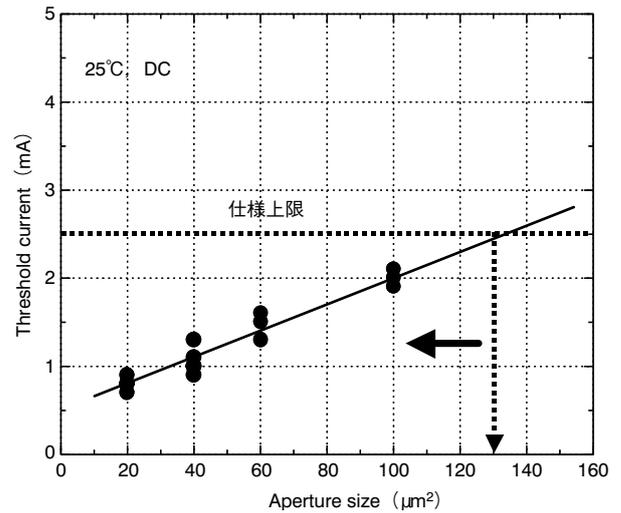


図2 しきい値電流の酸化アパーチャサイズ依存性
Oxide aperture size dependence of threshold current.

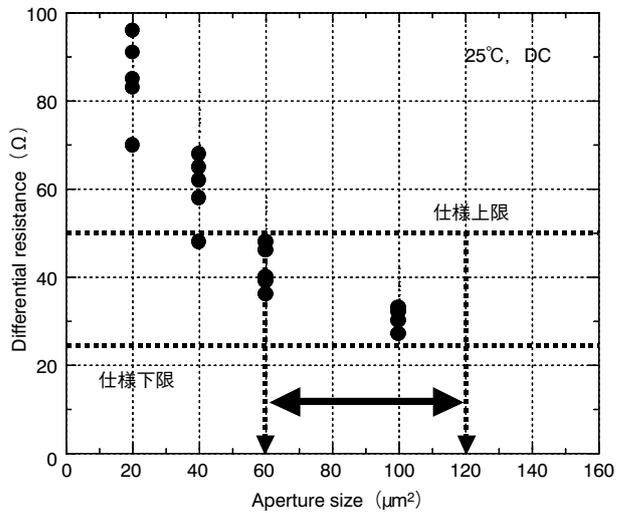


図3 微分抵抗の酸化アパーチャサイズ依存性
Oxide aperture dependence of differential resistance.

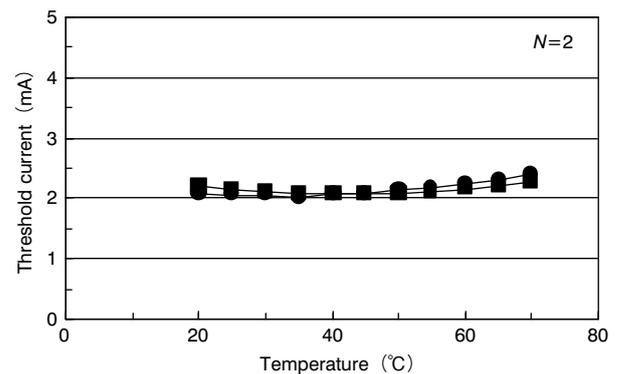


図4 しきい値電流の温度依存性
Temperature dependence of threshold current.

3. VCSEL TOSA (速度4.25Gbps)

現在の市場での主流は、速度2.5 Gbps以下のTOSAであるが、今後4.25 Gbps(ファイバチャネルの規格)への移行が急速に進むものと思われる。そこで、今回は最大変調速度4.25 Gbps以上を目標に開発を行った。本章では、TOSAの構造、評価結

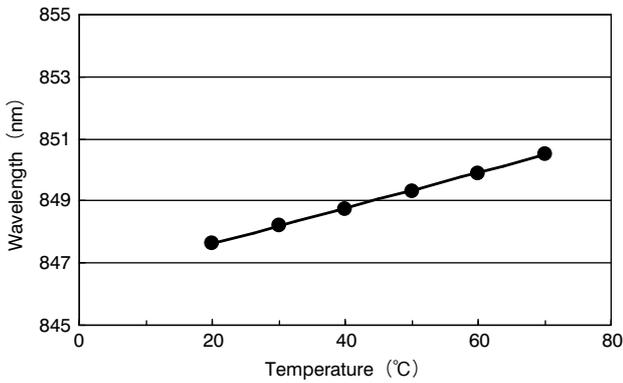


図5 波長の温度依存性
Temperature dependence of wavelength.

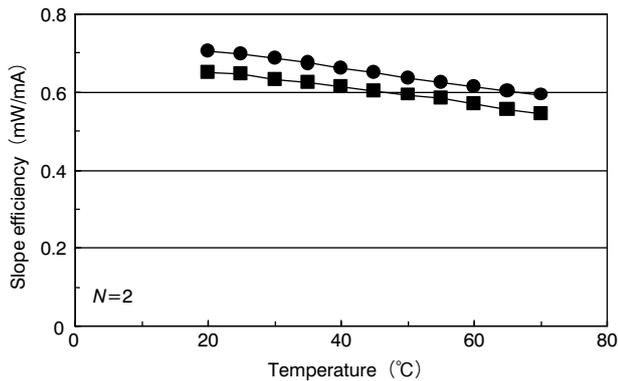


図6 スロープ効率の温度依存性
Temperature dependence of slope efficiency.

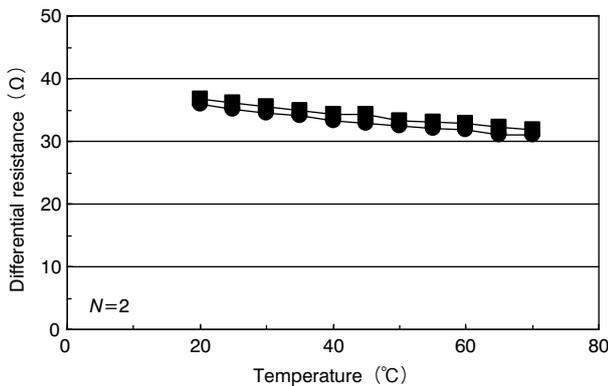


図7 微分抵抗の温度依存性
Temperature dependence of differential resistance.

果(静特性, 温度特性, 変調特性, アイパターン, 信頼性)について報告する。

3.1 TOSAの構造

図8に, 今回開発したTOSAの写真(左上: SCバレル, 右下: LCバレル)を示す。波長850 nm帯では, 一般的にマルチモードファイバ(コア径50 μmもしくは62.5 μm)が用いられることから, シングルモードファイバ(コア径7 μm)に比べコア径が大きく, 結合が容易である。そこで, ファイバとの結合部にはプラスチック製のバレルを採用した。また, APC(auto power control)駆動を可能とするために, モニタPD(photo diode)を内蔵している。VCSEL素子はサブマウントを介してTO-46ヘッダ上に実装されている。また, 波長850 nm帯レーザではFDA(Food and Drug Administration; 米国食品医薬品

局)により, アイセーフティレベルがクラス1以下での使用が規定されているため, 本構造では光出力を350 μW(ファイバカップルドパワー)以下での使用を可能としている。

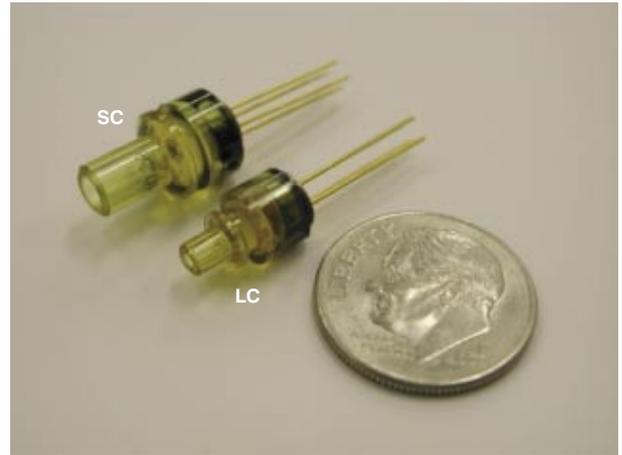


図8 4.25 Gbps 850 nm VCSEL TOSAの写真
Photograph of 4.25 Gbps 850 nm VCSEL TOSA.

3.2 TOSAの評価結果

3.2.1 静特性

図9に, 25°C, DC駆動における電流対光出力, 電圧, モニタ電流特性を示す。しきい値電流1.8 mA, 光出力450 μW @ 6 mA(GI-50マルチモードファイバとの結合効率約70%, 即ちファイバ結合パワーは300 μWとなる), 動作電圧1.9 V @ 6 mA, 微分抵抗40 Ω @ 6 mA, モニタ電流400 μA @ 6 mAとなり, 仕様を十分に満足する特性が得られた。

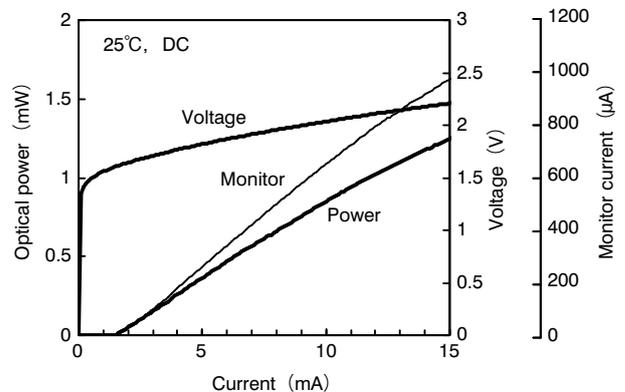


図9 電流対光出力, 電圧, モニタ電流特性
Current v.s. optical power, voltage and monitor current.

3.2.2 温度特性

データストレージ(SAN; storage area network)用のトランシーバでは, 主にファイバチャネルの規格が用いられ, 動作温度範囲は0~70°Cで規定されている。このトランシーバに搭載されるTOSAでは, トランシーバ内の温度上昇を考慮し, 0~80°Cでの安定動作が必要である。また, 用途によっては, 温度範囲-40~95°Cという非常に厳しい条件での使用を考慮しなければならない。そこで今回は, -40~100°Cの広範囲にわたって温度特性の評価を行った。

図10, 11に, しきい値電流及びモニタ電流の温度依存性の結果を示す。

しきい値電流の温度に対する変化量は, ファイバチャネルの

規格値0～80℃の温度範囲では±0.2 mAと非常に小さく、今回の主目的である仕様(±1 mA)を十分に満たしている。しかし、-40～100℃の温度範囲では低温側(-10℃以下)でのしきい値電流の上昇が影響を及ぼし、しきい値電流の変化量が±1.5 mAとなり、仕様に対して大きい。これは、ゲインピーク波長と共振器波長の差により決定されるディチューニングの量が大きいため(0～80℃の温度範囲で最適化設計のため)、設計により適宜調整可能である。

また、モニタ電流の変化量は0.1%/℃と非常に小さく、仕様の0.3%/℃を十分クリアしている。

なお、波長、スロープ効率、微分抵抗の温度依存性に関しては、素子での測定結果とほぼ同等の結果であった。

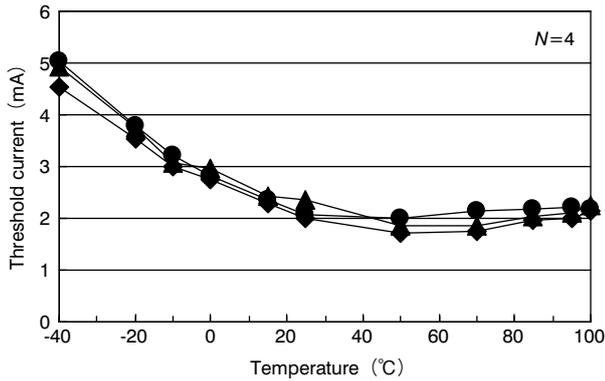


図10 しきい値電流の温度依存性
Temperature dependence of threshold current.

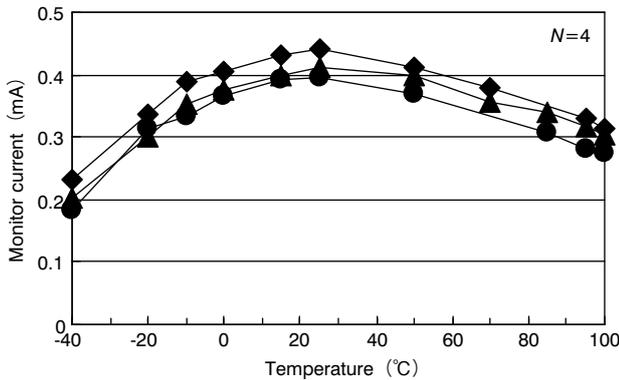


図11 モニタ電流の温度依存性
Temperature dependence of monitor current.

3.2.3 変調特性

TOSAの形態では、ワイヤのインダクタンスやTOヘッダ自体のインダクタンス及びキャパシタンスの影響により、素子単体での周波数特性に比べ、変調帯域が制限されてしまう。特に変調速度が2.0 GHzを超えると、急激にその影響が現れてくる。今回開発したVCSEL素子単体での f_{3dB} 帯域は約8 GHzであることから、素子単体での4.25 Gbps動作では支障がないものの、先に述べた実装による影響で変調帯域が制限を受けてしまう。

図12に、小信号変調特性の測定結果を示す。この結果、バイアス電流5 mA以下では緩和振動の共振ピークが4 GHz以下となっており、アイパターンへの影響が懸念される。一方、バイアス電流6 mA以上では4 GHz以上の緩和振動周波数が得られ、また f_{3dB} 帯域は5 GHz以上が得られている。この結果は、理論上4.25 Gbps動作に必要な3.0 GHzを十分にクリアしてい

る。今回の測定に用いた素子のしきい値電流は1.8 mAであることから、理論上4.25 Gbpsで動作させるためには、規格化したバイアスレベル((バイアス電流値-しきい値電流)/しきい値電流)で、約2.3以上が必要であると見積もられる。

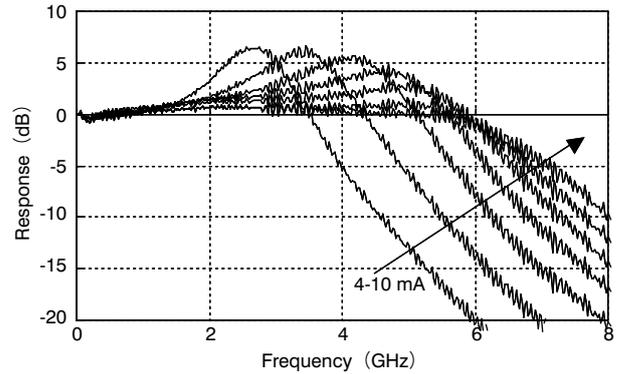


図12 小信号変調特性
Small signal modulation characteristics.

3.2.4 アイパターン

実際のトランシーバでの動作においては、アイパターンにおける立ち上がり、立ち下がり時間とジッタが重要である。これらの特性は、トランシーバに搭載する際の回路や、VCSELを駆動するドライバICによって大きく特性が左右される。トランシーバに使用する回路やドライバIC等は、客先の設計により異なるため、今回は標準的な評価手法であるパルスパターンジェネレータを用いた擬似ランダム信号により評価を行った。測定に際し、TOヘッダのピンによるインダクタンスの影響を最小限に抑えるため、TOSAはピンを短く切ってマイクロストリップライン上にはんだにて固定している。

図13に、4.25 Gbps擬似ランダム信号(2³¹-1)におけるアイパターンの測定結果を示す。動作条件は、バイアス電流6 mA、消光比10 dB、変調電圧0.5 Vで、測定は室温でフィルタなしの状態である。

この結果、測定が理想的な状態ではあるものの、立ち上がり、立ち下がり時間(20～80%)はそれぞれ、38 ps、70 psで、ジッタは20 ps以下という仕様(立ち上がり時間:90 ps、立ち下がり時間:90 ps)を十分に満足する良好な結果が得られた。

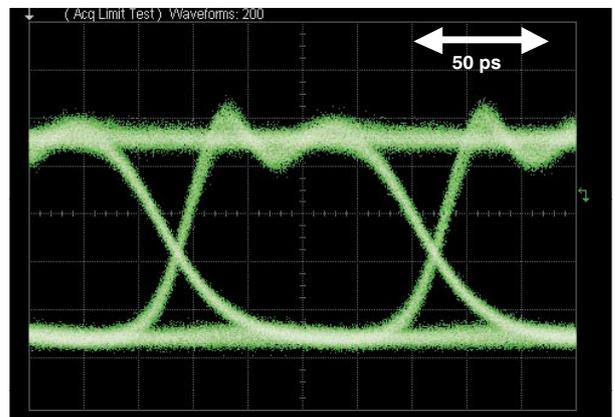


図13 4.25 Gbps アイパターン (消光比10 dB)
Eye diagram of 4.25 Gbps (Extinction ratio : 10 dB).

次に、4.25 Gbps擬似ランダム信号(2³¹-1)のアイパターンの温度依存性の結果から求めた、立ち上がり時間、立ち下がり

時間、ジッタの温度依存性について説明する。図14、15、16に温度範囲-40～100℃のそれぞれにおける結果を示す。測定は、消光比10 dB、変調電圧0.5 V、ファイバアウトの光出力が0.3 mW一定(APC駆動)の条件で行った。

この結果、ファイバチャネルの規格である温度範囲0～80℃(トランシーバ自体は0～70℃、内部温度+10℃を想定)では、立ち上がり時間が35～40 ps、立ち下がり時間が67～73 ps、ジッタが18～22 psであった。また、温度範囲を-40～100℃に拡大した場合においても、最大で立ち上がり時間40 ps、立ち下がり時間78 ps、ジッタ24 psとなり、-40～100℃の温度範囲において十分に仕様を満足していることが確認できた。

ただし、先に述べたように、実際の使用においてはトランシーバの回路やドライバICとのマッチングが重要であることから、最終的にはトランシーバに搭載した状態での評価が必須である。

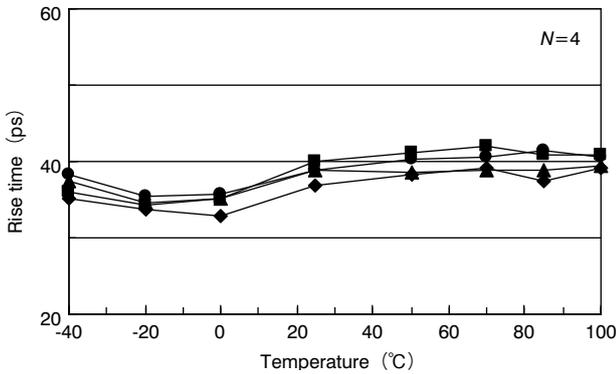


図14 立ち上がり時間の温度依存性
Temperature dependence of rise time.

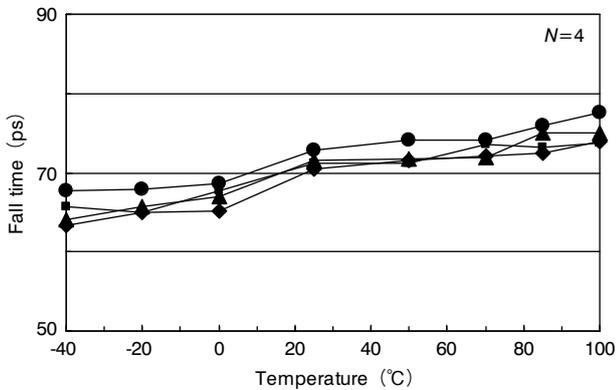


図15 立ち下がり時間の温度依存性
Temperature dependence of fall time.

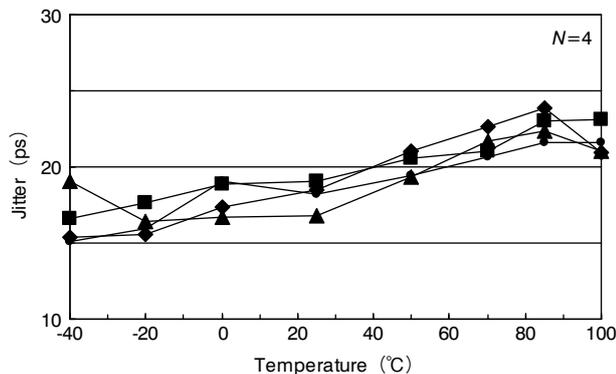


図16 ジッタの温度依存性
Temperature dependence of jitter.

3.2.5 TOSAの信頼性

信頼性は偶発故障と磨耗故障に大別されるが、ここでは磨耗故障の信頼性について報告する。図17に、VCSEL素子の高温エージング試験の結果(5,000 h)を示す。また図18に、4.25 Gbps VCSEL TOSAの高温エージング試験の経過(2,000 h)を示す。試験の条件は、温度100℃、動作電流密度10 kA/cm²、ACC駆動(auto current control)で、サンプル数はそれぞれ20個、50個である。

この結果、VCSEL素子及びTOSAの寿命を光出力の変化量が初期値から2 dB減少した時点と仮定した場合に、今回の両者の推定寿命は、100℃の環境下にて約50,000時間と見積もられる。この結果は室温の寿命に換算すると、約9,000万時間(条件を変えた試験により導出した活性化エネルギーは1.0 eV)に相当する。

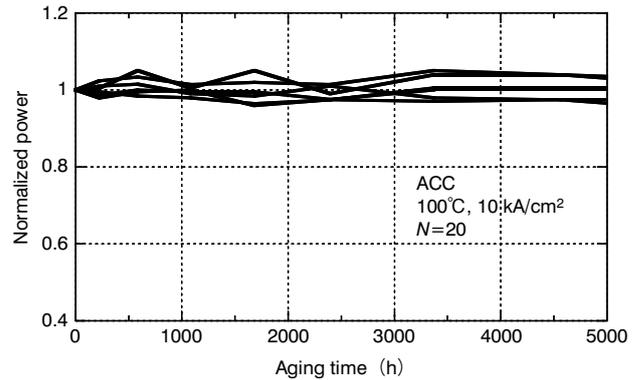


図17 VCSEL素子のエージング試験結果
Aging test results of VCSEL chip.

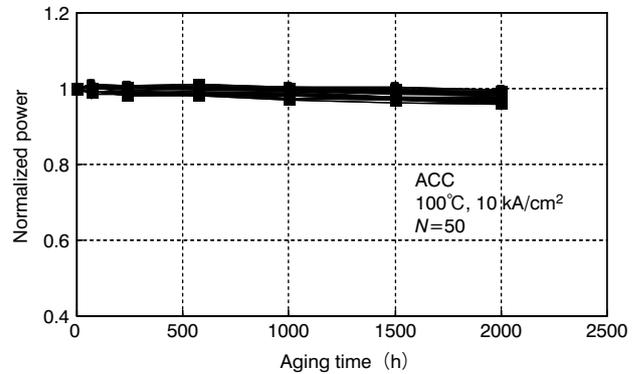


図18 TOSAのエージング試験経過
Aging test results of TOSA.

4. 量産体制の紹介

VCSELの場合、通常の端面発光型レーザと違い、基板と垂直方向に光を出射することから、ウエハレベルでの検査が可能であるという特長を持つ。ここでは、この特長を生かしたウエハレベルで実施するバーニン試験について紹介する。図19に、ウエハバーニン試験時の写真を示す。ウエハ上のパッド電極に直接プロービングし通電を行う。また、ウエハはヒータテーブル上に設置され過熱されている。通常バーニン試験は、TO-CANに実装した後に行われるため、膨大な試験装置や、部材のコストが発生する。これに比べ本方法では、ウエハレベルで一括してバーニン試験を行うことができるため、不良品

発生時の部材コスト等の削減が可能となり、量産時のコスト低減においては有効な手段である。

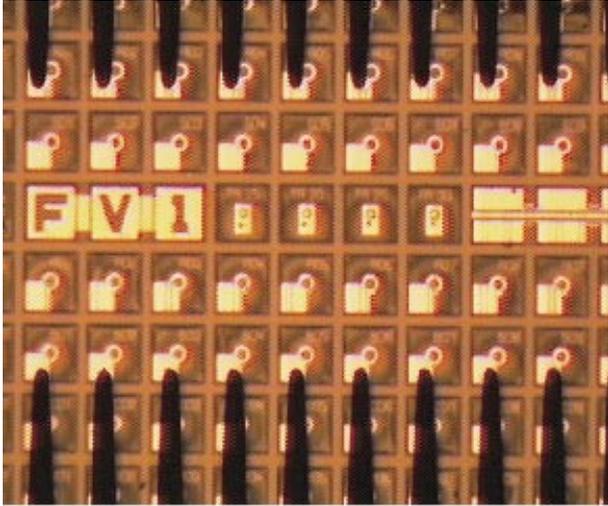


図19 ウエハバーンイン試験例
Example of burn-in test on wafer.

- 4) G. M. Yang, M. H. MacDougal, and P. D. Dupkus: "Ultra low threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation," *Electron. Lett.*, **31**(1995), 886.
- 5) N. Ueda, M. Tachibana, N. Iwai, T. Shinagawa, M. Ariga, Y. Sasaki, N. Yokouchi, Y. Shiina, and A. Kasukawa: "Transverse Mode Control and Reduction of Thermal Resistance in 850 nm Oxide Confined VCSELs," *IEICE Trans. Electron.*, E85-C, No.1, (2002), 64.

5. おわりに

今後、市場の立ち上がりが期待されるデータコミュニケーション用トランシーバに搭載される4.25 Gbps 850 nm VCSEL TOSAの開発を行った。

素子構造を最適化し、最終的にTOSAでの評価を行った結果、4.25 Gbpsでの動作をはじめ、静特性、温度特性において、仕様を十分に満足する良好な結果が得られた。また、信頼性試験においては、25℃の環境下で9,000万時間、100℃の環境下で50,000時間の推定寿命が得られた。

謝辞

本研究を進めるに当たり、ご指導、ごべんたつをいただいた東京工業大学小山二三夫教授に感謝いたします。また、貴重なご意見、議論をいただいた半導体研究開発センター清水均博士、影山健生博士、カシミルスセティアグン氏、品川達志博士、生産技術部尹栄徳氏に、試作及び評価を担当した半導体研究開発センター濱威氏、関口智則氏、平岩浩二氏、徳永訓雄氏、植田菜摘氏、佐藤正之氏、半導体デバイス開発部の生産技術・作業組の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Iga, F. Koyama, and S. Kinoshita: "Surface emitting semiconductor Lasers," *IEEE. J. of Quant. Electron.*, **24**(1988) , 1845.
- 2) K. D. Choquette, R. P. Schneider, Jr., K. L. Lear, and K. M. Geib: "Low threshold voltage vertical-cavity lasers fabricated by selective oxidation," *Electron. Lett.*, **30**(1994), 2043.
- 3) Y. Hayashi, T. Mukaiharu, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga: "Record low-threshold index-guide InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser with a native oxide confinement structure," *Electoron. Lett.*, **31**(1995), 560.