

# 高速POFデータリンク用InGaAlP赤色面発光レーザ

InGaAlP-Based Red Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers for High-Speed POF Data Links

高岡 圭児  
TAKAOKA Keiji

波多腰 玄一  
HATAKOSHI Gen-ichi

基板と垂直方向にレーザ光を出射する面発光レーザは、発光ダイオード(LED)と同様に実装が容易で、光送信モジュールの低コスト化に適した発光素子である。また、半導体レーザとしての高速応答性も兼ね備えていることから、高速光データ通信光源として期待されている。

今回、当社は、プラスチック光ファイバ(POF: Plastic Optical Fiber)を使った高速光データリンク用の送信光源に適した、インジウム - ガリウム - アルミニウム - リン(InGaAlP)赤色面発光レーザを開発した。発振波長670 nm以下の面発光レーザとしては、世界最高の60℃での連続発振に成功するとともに、面発光レーザ特有の円形、かつ広がり角の小さなレーザビームを得ることに成功した。

Vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are very attractive devices for use as light sources in low-cost, high-speed data links, because the output beam is emitted in a direction vertical to the substrate and the lasers can be as easily assembled as light-emitting diodes (LEDs).

Toshiba has successfully fabricated InGaAlP-based red VCSELs suitable for plastic optical fiber (POF)-based, low-cost, high-speed data links. A maximum continuous-wave (CW) lasing temperature of 60 °C, the highest value for red VCSELs emitting at wavelength regions shorter than 670 nm, has been realized with a very circular and narrow laser beam.

## 1 まえがき

光通信や光記録などの分野で幅広く使われている半導体レーザの大半は、レーザ光が基板側面から出射する端面発光型である。これに対して、基板と垂直方向からレーザ光を出射する面発光レーザ<sup>(1)(2)</sup>が、近年注目されるようになってきた。面発光レーザは、低しきい値動作、高い電力 - 光変換効率、円形狭広がり角出射光、実装容易性、二次元集積可能などの優れた特長があり、光情報処理や光通信伝送の分野で様々な応用の可能性がある。

波長0.6 μm帯の可視域で発振する赤色面発光レーザは、POFを用いた光データリンク、光メモリ、レーザプリンタなどの光源として期待されている。特に、安価なアクリル系POFの低損失領域が赤色波長帯であることから、高速POFデータリンク用光源としての期待は高い。高速POFデータリンクは、IEEE1394(IEEE: 米国電気電子技術者協会)をインタフェースとしたホームネットワーク、自動車・航空機内のLAN、及びFA(Factory Automation)機器などの分野で注目されており、いっそうの高速化に向けて高速赤色発光素子の開発が不可欠である。

これまでに、InGaAlP材料を用いた垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL: Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)では、630 ~ 690 nmでのレーザ発振が報告されている<sup>(3)(4)</sup>。VCSELは、活性層体積が非常に小さいために低しきい値化

が可能であるが、一方、高出力化や高温発振は端面発光型に比べると容易でない。特に、赤色波長帯では材料の熱抵抗やキャリアオーバーフローなどの影響が大きく、温度特性の確保は重要な課題の一つである。

今回、当社は、発振波長666 nmのInGaAlP系赤色VCSELで、60℃での連続発振に成功した。1 Gbpsを超える高速変調が可能であり、高速POFデータリンク用送信光源に適用可能であることを確認した。

## 2 赤色VCSELの素子構造

開発した赤色VCSELの素子構造を図1に示す。ガリウム - ヒ素(GaAs)基板を用いて、有機金属気相成長法により必要な積層構造を作製した。

活性層はInGaAlP多重量子井戸(MQW: Multi-Quantum Well)とし、PL(Photo Luminescence)ピーク波長(PL)が約655 nmとなるように調整した。また、活性層の上下には、共振器構造を形成するために、いわゆるDBR(Distributed Bragg Reflector)ミラーを配置した。DBRミラーは、屈折率の異なる半導体層を光学波長の1/4の厚さで交互に積層した構造であり、高屈折率層と低屈折率層にGa<sub>0.5</sub>Al<sub>0.5</sub>AsとGa<sub>0.05</sub>Al<sub>0.95</sub>Asをそれぞれ用いた。使用するGaAs基板が赤色波長帯では不透明なため、基板側DBRミラーの反射率がより高くなるように設計して、レーザ光を基

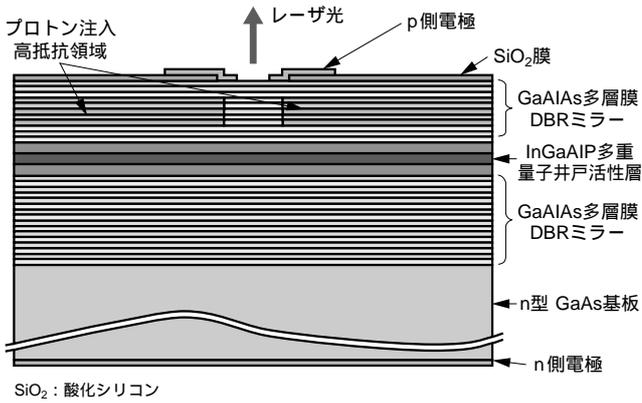


図1. 赤色面発光レーザの素子構造 活性層の上下に設けたDBRミラーにより、基板と垂直方向に共振器が形成され、レーザー光は基板表面から出射する。

Schematic diagram of red VCSEL

板表面側から取り出す構造とした。なお、DBR構造は多数のヘテロ障壁を持つので、各ヘテロ界面のわずかな電圧降下が、全体としては大きな素子抵抗の原因となる。この電圧降下を低減するために、DBRミラーの各層の境界には組成を連続的に変化させたグレーデッド層を設けた。

二つのDBRミラーにより構成される共振器構造の共振波長( $\lambda_c$ )は、高温での特性を考慮して、 $\lambda_{PL}$ より10 nm長波長の約665 nmになるように設計した。 $\lambda_{PL}$ と $\lambda_c$ はいずれも温度上昇とともに長波長側にシフトするが、そのシフト量は $\lambda_{PL}$ のほうが大きい。室温での $\lambda_c$ を $\lambda_{PL}$ より長波長にすることで、高温での $\lambda_{PL}$ と $\lambda_c$ を一致させることができるわけである。

活性層への電流注入は、基板の上下に設けた電極からDBRミラーを通して行う。レーザー発振させるためには、活性層の注入キャリア密度を高くする必要があるため、プロトン注入により形成した高抵抗領域により電流狭窄(きょうさく)を行う構造とした。なお、レーザー光は基板表面側電極に設けた開口部から出射する。

### 3 赤色VCSELの諸特性

試作した素子の電流 - 電圧特性を図2に示す。電流注入径が小さい素子ほど素子抵抗は高くなり、10  $\mu\text{m}$ 径の素子の微分抵抗は100  $\Omega$ 以上である。しかしながら、電流注入面積と抵抗値の積は従来のLEDと同程度であり、活性層の上下にDBRミラーを持つVCSELとしては、非常に低抵抗な特性を実現することができた。

次に、測定した発振スペクトル及び遠視野像強度分布の例をそれぞれ図3と図4に示す。発振波長は666 nmであり、共振波長の設計値とほぼ一致した。遠視野像広がり角の半値幅は6.6°と小さく、図4の挿入図に示すように円形の射出ビームが得られた。このようなビーム特性により、射出光を

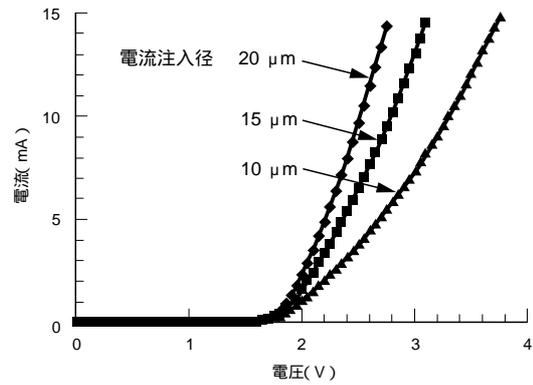


図2. 電流 - 電圧特性 電流注入径が小さくなるにつれて、素子の微分抵抗が高くなることわかる。

Current-voltage characteristics

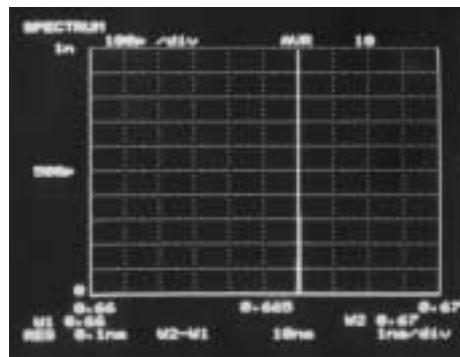


図3. 発振スペクトル 発振波長は666 nmであり、共振波長の設計値とほぼ一致する(横軸は660 ~ 670 nm)。

Oscillation spectrum

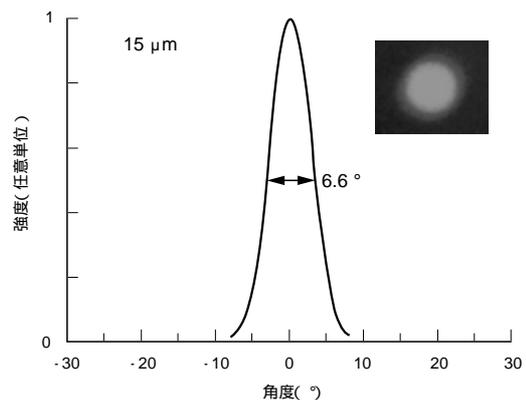


図4. 遠視野像強度分布 円形で、広がり角の非常に小さなレーザービームが得られていることわかる。

Far field profile of output beam

容易にPOFと結合させることが可能である。

次に 試作した赤色VCSELの高速変調特性を図5に示す。この図は、1 Gbpsの擬似ランダム信号で変調したときのアイ

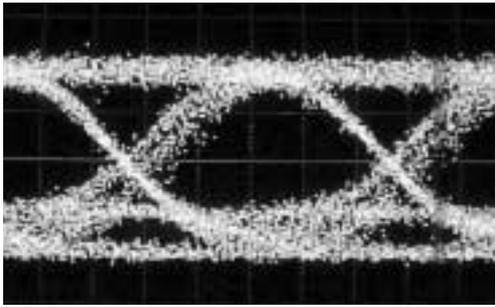


図5. 1 Gbpsにおける変調特性(アイパターン) 良好なアイ開口が得られており,1 Gbpsの高速変調が可能であることがわかる。

Eye pattern of 1 Gbps pseudo-random signals

パターンで,良好なアイ開口が得られていることから,1 Gbpsでの高速変調が可能であることが確認できた。

#### 4 赤色 VCSEL の温度特性

最初に述べたように,赤色 VCSEL では温度特性が重要課題の一つである。VCSEL は,素子の構造的な要因から熱抵抗が大きく,通電による発熱の素子特性に与える影響が非常に大きい。ここでは,温度特性の電流注入径(発光径)依存性と熱抵抗の解析結果について述べる。

連続発振時の電流 - 光出力特性の温度依存性は,図6に示すように電流注入径に大きく依存する。電流注入径が大きくなるとともに,しきい電流は上昇し,最高発振温度は低くなる。10  $\mu\text{m}$  径の素子では,発振しきい電流 2.5 mA,最高発振温度 60  $^{\circ}\text{C}$  の良好な特性が得られた。ただし,このもっとも温度特性の良い 10  $\mu\text{m}$  径の素子では,電極の開口率が小さいために十分な光出力が得られていない。POF データリンクへの応用を考えると 1 mW 程度の光出力が必要であり,光出力を増大させることが課題である。

図7は,10  $\mu\text{m}$  径の素子におけるしきい電流の温度依存性である。発熱の影響が無視できるパルス電流駆動の場合

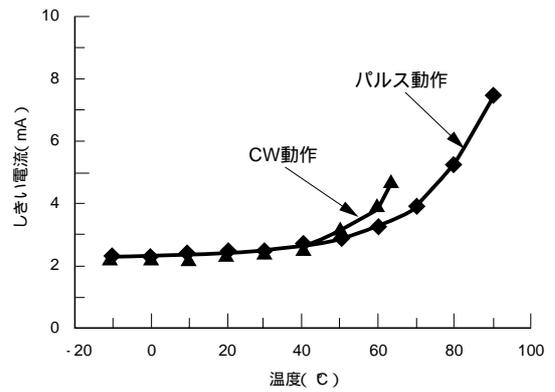


図7. しきい電流の温度依存性 しきい電流は室温付近ではほぼ一定だが,高温では急激に増加する。CW動作とパルス動作の違いはジュール発熱による。

Temperature dependence of threshold current

についても示した。室温付近でのしきい電流はほぼ一定で,これは VCSEL 特有の温度依存性である。しかしながら,一定温度以上になると急激にしきい電流が増大し,レーザ発振しなくなることがわかる。また,高温領域ではパルス動作と CW(Continuous Wave)動作の違いがより顕著であることもわかる。

次に,最高連続発振温度は図8に示すように,電流注入径の増大とともに直線的に低下する。このような,温度特性の電流注入径依存性が生ずるメカニズムを考察するために,熱流分布の計算機シミュレーションを実施した。図9は,シミュレーションの結果の一例で,熱流分布と等温線を示したものである。活性領域近傍で発生した熱が,活性領域の横方向に広がりながら,ヒートシンクへ流れていくようすがよくわかる。また,図10はシミュレーション結果から得られた,熱抵抗の電流注入径依存性である。一般に,熱が活性領域からヒートシンクへ直線的に流れるとすると,熱抵抗は熱源面積に反比例することになるが,熱の横方向への広がりの効果が大きいことから,熱抵抗は熱源面積ではなく熱源の直径にほぼ反比例することがわかった。一方,発振しきい

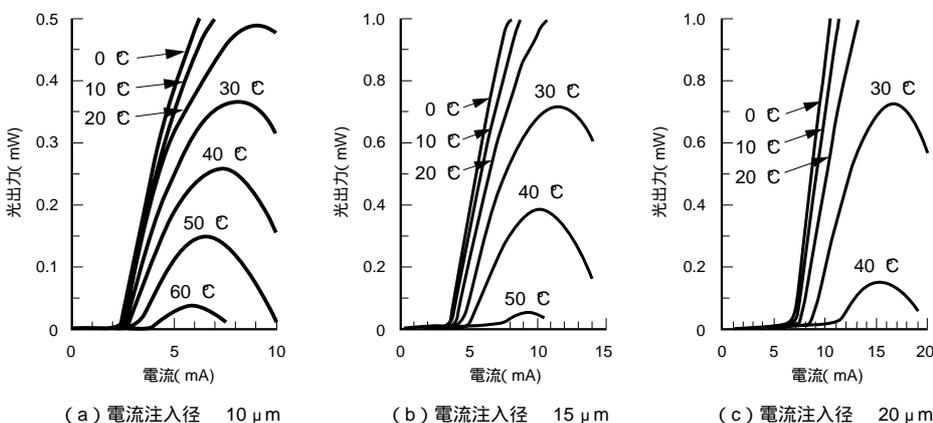


図6. 電流 - 光出力特性の温度依存性 温度上昇とともに光出力は徐々に低下する。また,温度特性は電流注入径に強く依存することがわかる。

Temperature dependence of light-current characteristics

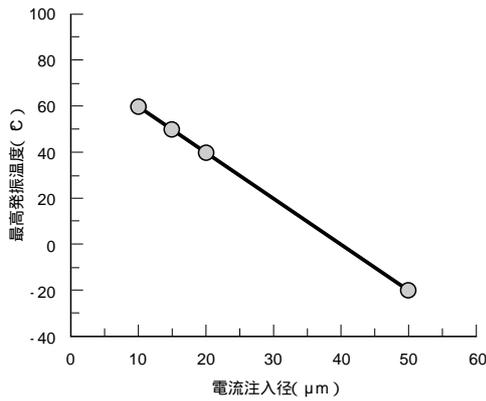


図8．最高連続発振温度の電流注入径依存性 最高連続発振温度は、電流注入径の増大とともに直線的に低下する。

Maximum CW lasing temperature as function of current aperture size

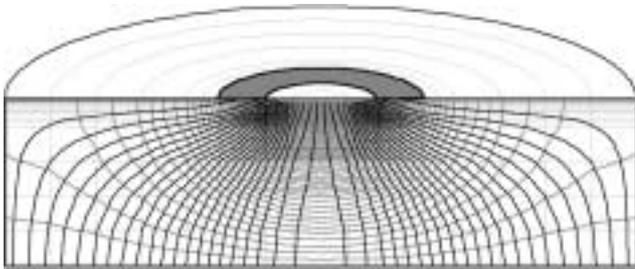


図9．熱流分布のシミュレーションによる解析例 熱流の分布と等温線を示した。熱が横方向へ拡散しながら基板( ヒートシンク )側へ逃げるようすがわかる。

Heat flow simulation for red VCSEL

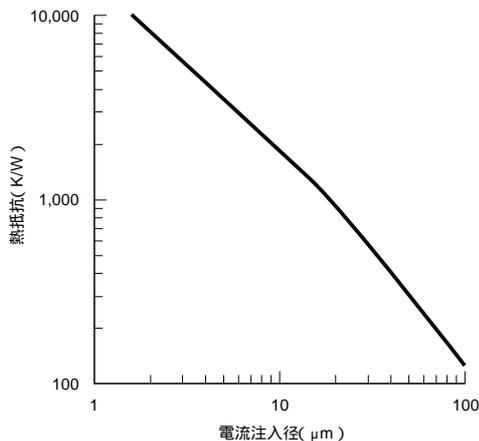


図10．熱抵抗の電流注入径依存性の計算結果 計算によると、熱抵抗は電流注入面積ではなく電流注入径にほぼ反比例する。

Calculated thermal resistance as function of current aperture size

電流は面積にほぼ比例するので、しきい値において発生する熱は、電流注入面積に比例すると考えられる。この結果、活性層の温度上昇は電流注入径に比例することになり、図8

の最高連続発振温度の電流注入径依存性を説明することができる。

## 5 あとがき

今回開発した InGaAlP 材料を用いた赤色面発光レーザについて述べた。プロトン注入電流狭窄型の赤色 VCSEL で、発振波長 666 nm において、しきい電流 2.5 mA、最高発振温度 60 °C が得られた。また、通電による発熱が素子の温度特性に与える影響の、電流注入径（発光径）依存性を明らかにした。実用化に向けては、動作温度として 70 °C 程度以上が必要であり、低しきい値化と熱抵抗低減などにより、温度特性を更に改善していく必要がある。

POF データリンクは、民生用・産業用の様々な応用分野で、ますます高速化の要請が高まってきている。光源に LED を用いて、伝送速度 125 Mbps までの製品化が進み<sup>(5)</sup>、500 Mbps 程度の伝送速度では、共振器型 LED (RCLED: Resonant-Cavity LED) が光源として本命視されている<sup>(6)</sup>。今回述べた赤色 VCSEL は、更に高速の 1 Gbps 以上の次世代 POF データリンク用光源として有望である。

## 文献

- (1) Iga, K., et al. Surface emitting semiconductor lasers. IEEE Journal Quantum Electronics. 24, 9, 1988, p.1845 - 1855.
- (2) 伊賀研一, 小山二三夫( 編著 ). 面発光レーザの基礎と応用 . 東京 , 共立出版 , 1999 , 216p .
- (3) Choquette, K.D., et al. Continuous wave operation of 640-660 nm selective oxidized AlGaInP vertical-cavity lasers. Electronics Letters. 31, 14, 1995, p.1145 - 1146.
- (4) Takaoka, K., et al. "60 °C continuous-wave operation of InGaAlP-based red vertical-cavity surface-emitting lasers." Fifth Optoelectronics and Communications Conference (DECC2000) Technical Digest. Makuhari, 2000-07, 電子情報通信学会通信ソサイティ / エレクトロニクスソサイティ . 2000, p.536 - 537.
- (5) 岩上哲也 . オーディオ・ビデオ・コンピュータネットワーク用光伝送デバイス . 東芝レビュー . 55 , 1 , 2000 , p.53 - 56 .
- (6) 高岡圭児 , ほか . InGaAlP 赤色 VCSEL/RCLED . 電子情報通信学会技術研究報告 LQE2000 - 120 ~ 130 [ レーザ・量子エレクトロニクス ] . 100 , 626 , 2001 , p.51 - 56 .



高岡 圭児 TAKAOKA Keiji

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー主任研究員。光半導体デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



波多腰 玄一 HATAKOSHI Gen-ichi, D.Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー研究主幹, 工博。光半導体デバイスの研究・開発に従事。応用物理学会、日本光学会、電子情報通信学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.