

# POF 対応高信頼性赤色半導体レーザー

大郷 毅\*, 向井 厚史\*, 向山 明博\*, 森島 嘉克\*, 浅野 英樹\*, 早川 利郎\*

## High-reliability 660 nm Band Laser Diodes for POF Data Links

Tsuyoshi OHGOH\*, Atsushi MUKAI\*, Akihiro MUKAIYAMA\*, Yoshikatsu MORISHIMA\*,  
Hideki ASANO\*, and Toshiro HAYAKAWA\*

### Abstract

Laser diodes for Plastic Optical Fiber (POF) data links are required stable operation >200,000h at 60°C, 5mW and the transmission speed beyond 1 Gbps. However, commercially available 660 nm band laser diodes have not met these requirements. By optimizing crystal growth conditions and device structures, we have successfully fabricated high-reliability laser diodes with 1.25 Gbps transmission speed. The median time before failure was estimated to be 800,000h. These results indicate that 660 nm band laser diodes are very promising light sources for POF data links.

### 1. はじめに

富士写真フイルム(株)は2002年に開催された「International POF Conference」にて、世界に先駆けてギガbps以上の高速伝送が可能な大口径グレーデッドインデックス型POF(Plastic Optical Fiber)「LUMISTAR」を発表した。そして、翌年の「InterOpt'03」ではファイバ単体だけでなく、富士ゼロックスの通信モジュール技術、フジノンのレンズ技術を融合させた光伝送システムを発表した。これらは、ブロードバンド時代のホームネットワーク用、および各種産業用の大容量信号伝達方法として有望な技術であることから、大きな注目を浴びた。そして、2004年の12月からはPOFとして初めて30mクラスの高速度デジタル映像光リンクを実現した「光DVI(Digital Visual Interface)リンクシステム」が販売されている<sup>1)</sup>。

POF通信光源としては、発光ダイオード、共振器型発光ダイオード、半導体レーザーなどが候補として挙げられている<sup>2)</sup>。しかし、発光ダイオードは変調速度が100Mbps程度であるため、より早いデータ伝送のためには高速変調が可能な半導体レーザーが必要となる。また、光ファイバにおける光伝送距離は伝送中の光吸収と拡散によって決まるが、POFではFig. 1のような伝

送損失の波長依存性を示し、660nm帯に損失の少ない領域が存在する。そのため、吸収損失の少ない660nm帯の赤色半導体レーザーがPOF通信光源として期待されている。しかしながら、一般的に光通信用半導体レーザーとして用いられている赤外レーザーと比較して、熱抵抗やキャリアオーバーフローが生じやすい赤色半導体レーザーは長期間駆動による特性劣化が大きく、光通信用としての寿命特性を満たすことは大きな技術課題であった。実際、DVD用半導体レーザーとして開発されている市販の660nm帯半導体レーザーの寿命特性は数千時間レベルであり、光通信用途として望まれる60°C、5mW駆動にて20万時間レベルの寿命特性にはほど遠いのが現状である。また、高速変調特性についても数100Mbpsレベルであり、高速光通信光源として使用できるものではなかった。

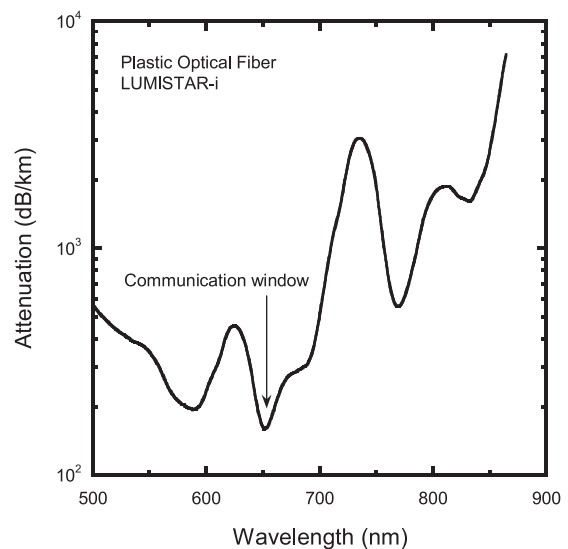


Fig. 1 Attenuation of a PMMA plastic optical fiber.

本誌投稿論文(受理2005年11月30日)

\*富士写真フイルム(株) R&D統括本部  
先進コア技術研究所  
〒258-8538 神奈川県足柄上郡開成町宮台798

\*Advanced Core Technology Laboratories  
Research & Development Management Headquarters  
Fuji Photo Film Co., Ltd.  
Miyanodai, Kaisei-machi, Ashigarakami-gun, Kanagawa  
258-8538, Japan

われわれは結晶品質の向上、および素子構造の最適化により低動作電流化を行ない、他社の赤色半導体レーザーの寿命特性を大幅に凌駕する80万時間の寿命特性(60℃, CW, 5mW 駆動における平均寿命)を実現することに成功した。また、変調特性についても素子内部の寄生容量を低減することにより、1.25Gbpsの高速伝送特性を実現させ、赤色半導体レーザーが光通信光源として適用可能であることを明らかにした。本稿では、その素子性能と、高信頼性化および高速変調特性を実現させた技術について解説する。

## 2. 素子構造

赤色半導体レーザーの結晶成長には、減圧MOVPE(有機金属気相成長)法を用いた。この成長方法は、原料を有機金属の形で供給することに特徴があり、結晶の組成・膜厚の制御性および均一性にきわめて優れている。原料ガスは、トリエチルガリウム(TEG)、トリメチルアルミニウム(TMA)、トリメチルインジウム(TMI)、アルシン(AsH<sub>3</sub>)、ホスフィン(PH<sub>3</sub>)、p型ドーパントとしてジエチル亜鉛(DEZn)、n型ドーパントとしてシラン(SiH<sub>4</sub>)を用いた。

Fig. 2に、今回採用した埋め込みリッジ型半導体レーザーの構造を示す。このレーザーは、GaAsからなる電流狭窄層がリッジ部外領域にて活性層に近接しているため、GaAsによる吸収損失により実効屈折率実数部がリッジ部内領域に比べて小さくなり、これにより形成された実効屈折率差により光の閉じ込めを行なっている。



Fig. 2 Typical structure of a 660 nm band laser diode.

実際の成長方法を以下に述べる。n-GaAs基板の上にn-GaAsバッファ層、n-(Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Pクラッド層、GaInP多重量子井戸活性層、p-(Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>)<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Pクラッド層、p-GaAsキャップ層を順次成長する。次に、フォトリソグラフィ工程とエッチング工程によりリッジ構造を形成した後、2回目の結晶成長によってリッジ側面にn-GaAs電流狭窄層を成長する。その後、3回目の結晶成長によりp-GaAsコンタクト層を形成する。続いて、p型およびn型電極を形成し、へき開により端面を形成後、端面保護と反射率制御のために端面にコーティングを行なう。この端面がレーザー発振のための反射鏡となる。素子はチップ化したのち、9.0mmφキャンパッケージにジャンクションアップ実装を行なった(Photo 1)。



Photo 1 660 nm band laser diodes.

## 3. 高信頼性化技術

半導体レーザーをある一定の出力にて連続動作させると、素子劣化に伴い駆動電流値が増加していく。駆動電流値が増加すると素子内部における発熱が増加し、劣化がさらに加速される。赤色半導体レーザーは赤外半導体レーザーに比べて熱抵抗が高く、また、量子井戸層とp型クラッド層間での伝導帯側ヘテロ障壁が低く、電子のオーバーフローが生じやすい<sup>3)</sup>のために、駆動電流値の増加に伴う劣化増加の傾向が顕著である。

Fig. 3は、われわれが作製した赤色半導体レーザーにおける推定寿命と動作電流密度との関係を示したものである。比較のため、940nm帯赤外半導体レーザーにおける特性も示した。両者ともに推定寿命が駆動電流密度に対して相関を示すが、赤色半導体レーザーのほうが駆動電流密度の変化に対する推定寿命の変化が大きいことがわかる。これは、赤色半導体レーザーの信頼性化を向上させるためには動作電流の低減が重要であることを示している。そこで、われわれは動作電流を低減するためにAlGaInP結晶品質の向上、および素子構造の最適設計を行なった。ここでは、結晶品質の向上技術について述べる。

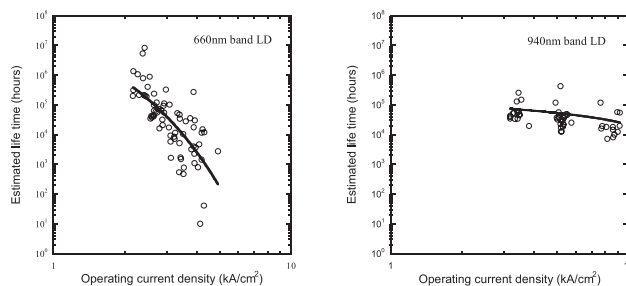


Fig. 3 Lifetime dependence on initial operation current density.

赤色半導体レーザーに用いられているAlGaInP系材料は、結晶成長条件により表面モフォロジが大きく変化することが知られている。半導体レーザーの発光部とな

る量子井戸層は、このAlGaInPクラッド層およびガイド層上に形成されるが、AlGaInP結晶の表面上に凹凸が存在するとヘテロ接合界面における散乱損失の要因となるだけでなく、量子井戸層のような厚さ数十オングストロームの薄膜を形成する際に、膜厚揺らぎを生じさせて半導体レーザの特性を悪化させる要因になると考えられる。そこで、われわれはAlGaInP結晶の表面平滑性を向上させるため、結晶成長条件の最適化を行なった。Fig. 4は、異なる条件にて成長したAlGaInP結晶における表面モフォロジのAFM像を示したものである。この成長条件により、作製した赤色半導体レーザの電流-光出力特性をFig. 5-1、およびFig. 5-2に示すが、表面モフォロジの平滑化によって電流閾値および駆動電流値が大幅に低減し、最高発振温度が20度上昇していることがわかる。

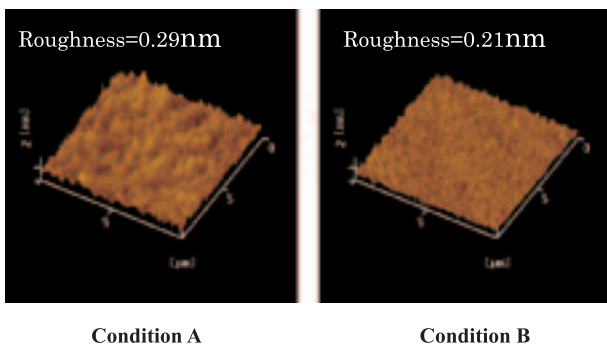


Fig. 4 AFM images of AlGaInP bulk's surfaces.

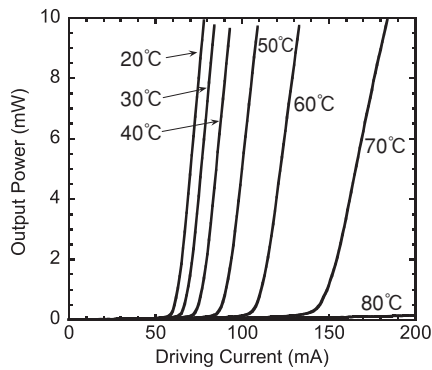


Fig. 5-1 Temperature dependence of output power vs cw current (Condition A).

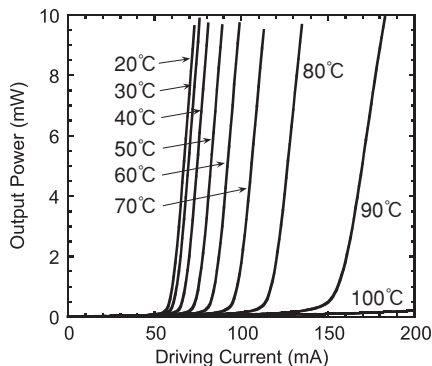


Fig. 5-2 Temperature dependence of output power vs cw current (Condition B).

低駆動電流値化した素子の寿命試験結果をFig. 6に示す。グラフの縦軸は、5mW出力に必要な駆動電流値を初期駆動電流値で規格化した値である。5mW、70℃という実駆動条件よりも厳しい試験条件にもかかわらず、1万時間を経過しても目立った劣化はなく、安定動作が得られている。次に、試験環境温度Ta=70℃、80℃、90℃で行なった5mW出力の通電試験によって得られた素子の推定寿命をプロットした結果をFig. 7に示す。平均寿命が長い半導体レーザでは、このように高温環境下での動作により、素子の劣化を物理的、時間的に加速させた加速寿命試験がよく用いられる。温度による劣化の加速係数は、各試験条件における半導体レーザの劣化率から算出した。しかし、試験環境温度Ta=50℃と70℃とではレーザの劣化率に顕著な違いが見られなかったため、文献より加速係数(活性化エネルギー)を1eVと仮定した<sup>4)</sup>。この結果から、本素子の60℃、5mWにおける平均寿命は80万時間、故障率1%において24万時間と見積もることができる。この値は、寿命仕様(60℃、5mWにおいて平均寿命20万時間)を大幅に超える値であり、赤色半導体レーザとして世界最高の寿命性能を達成している。

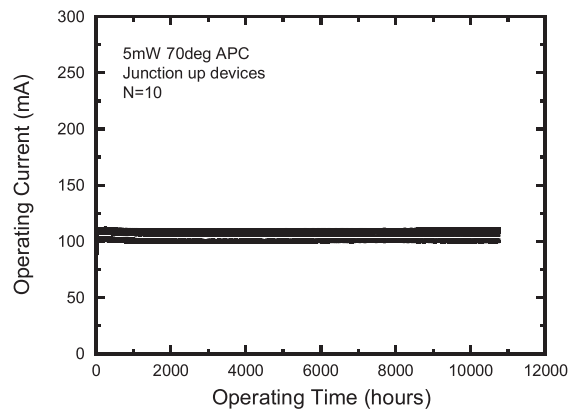


Fig. 6 Lifetime test results for 660 nm band laser diodes.

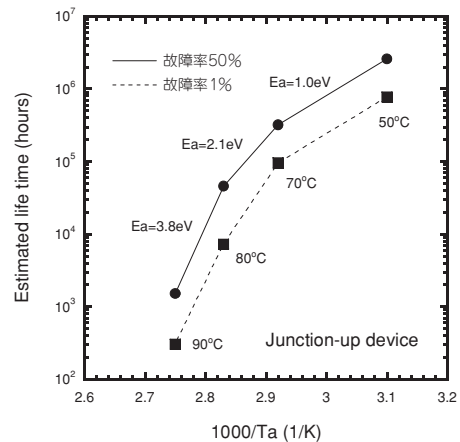


Fig. 7 Estimated Lifetime of 660 nm band laser diodes.

## 4. 高速変調技術

半導体レーザにおける高速変調特性は、周波数依存性を有しているボンディングワイヤにおけるインダクタンス成分、およびSiO<sub>2</sub>絶縁膜と電流狭窄層のpn接合部におけるキャパシタンス成分により決まる。そこで、われわれはFig. 2の素子構造から等価回路モデル(Fig. 8)を立て、高速変調特性のシミュレーションを行なって、電流狭窄層のpn接合部におけるキャパシタンスが最も変調特性を律速している要因であることを見出した。つまり、半導体レーザを高速変調させた時に、高周波成分が電流狭窄層のpn接合部におけるキャパシタンスを通して流れてしまうため、変調特性が数100Mbpsに制限されてしまうのである。

そこで、電流狭窄層のpn接合部におけるキャパシタンスを電気的に分離するため、Fig. 8に示すように発光領域の外側に溝の形成を行なった。Fig. 9は溝形成後の素子を1.25Gbpsのランダム信号で変調したときのアイパターンを示したものであるが、良好なアイ開口が得られている。これは、本レーザにて1.25Gbpsでの高速変調が可能であることを示している。

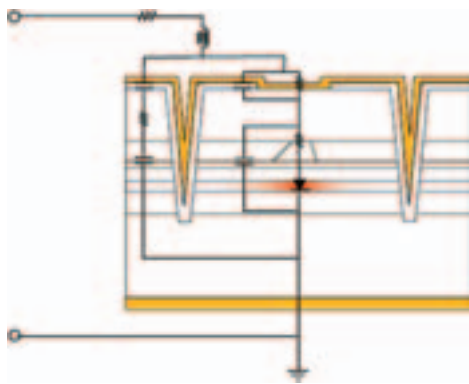


Fig. 8 Schematic diagram of electrically equivalent circuit.

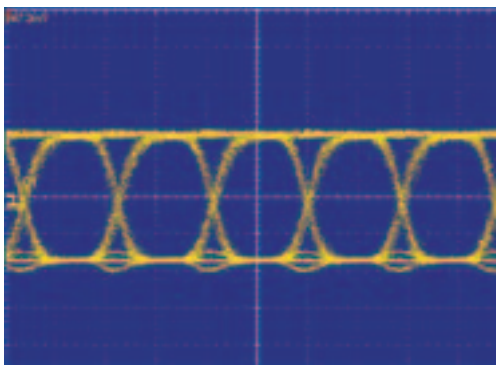


Fig. 9 Eye pattern of 1.25Gbps pseudo-random signals.

## 5. まとめ

POF光通信用光源として要求される波長特性(660nm帯)、高速変調特性(1.25Gbps)、高信頼性(60℃, 5mWにて平均寿命20万時間以上)を満たす赤色半導体レーザを開発した。信頼性については、放熱特性の改善が期待できるジャンクションダウン実装により、さらなる長寿命化が期待できる。

### 参考文献

- 1) 中村善貞, 水嶋康之, 佐藤真隆, 加藤三紀彦, 大橋雄一. 富士フイルム研究報告. No.50, 64-68 (2005).
- 2) John D. Lambkin, Thomas McCormack, Timothy Calcert, Thomas Moriarty, ICPOF. 15-18 (2002).
- 3) Gen-ichi Hatakoshi; Kazuhiko Itaya; Masayuki Ishikawa; Masaki Okajima; Yutaka Uematsu. IEEE J.Quantum Electron. **27**, 1476-1482 (1991).
- 4) K.Endo; K.Kobayahi; H.Fujii; Y.Ueno. Appl. Phys. Lett. **64** (2) 146-148 (1994).

(本報告中にある“LUMISTAR”は、富士写真フイルム(株)の商標です。)