

高速光ワイヤレス通信用発光デバイス

梁 吉 鎬*・笹 倉 賢*・中野 義昭**

High-Speed Light Emitting Diodes for Optical Wireless Communications

Ji-Hao LINAG, Ken SASAKURA and Yoshiaki NAKANO

An overview of research and development works on infrared LED and SLD for high-speed wireless communications has been introduced. The possibility to realize both of high-power and high-speed characteristics on an LED has been illustrated by optimizing quantum-well actives and developing technology to make transparent substrates for the LED. Characteristics of a new type SLD have also been introduced. The SLD keeps nearly the same threshold-current (~ 35 mA) and modulation bandwidth (~ 1.3 GHz) with LD. Due to incoherent light emission characteristics, the SLD shows very stable frequency responses in high power region.

Key words: wireless communication, infrared, SLD, LED, LD

近年の情報通信技術の進歩、通信需要の急激な増大、情報環境の進展に伴って自由度の大きい光ワイヤレス通信に対する要求が強まっている。通信用発光デバイスの開発は、従来、おもに石英系ファイバー通信に適用することを想定して行われてきた。しかし、光ワイヤレス通信を行うとする場合は、異なる観点でのデバイス性能が求められる。既存の光デバイスでは対応できない局面がある。本稿では、光ワイヤレス通信への応用をにらみ、筆者らが開発に取り組んできた発光素子の特性などについて報告する。

1. 光ワイヤレス通信用 LD, LED

光ワイヤレス通信に用いられる発光素子には、半導体レーザー (LD: laser diode), 発光ダイオード (LED: light emitting diode) と、本稿でおもに取り上げるスーパーluminescentダイオード (SLD: super-luminescent diode) などがある。比較的廉価なシリコン系の受光素子が利用できる。かつ視感度がほぼ無視できる波長領域を使うために、発光波長は 800~950 nm の短波長赤外光が選定されている。

通信距離、伝送速度、通信方式など、その使われ方により相違はあるが、高速ワイヤレス通信を行うには発光素子の高出力化と高速化は必須となる。発光デバイスとして LD を選定する場合、これらの問題は比較的容易に解決で

きるが、高出力時の周波数応答の安定性やアイセーフティーへの配慮が必要となり、コストにおいても不利な面がある。これに対して、LED は自然放出光を放射する面光源であるため LD が抱える問題点が解消でき、高出力化と高速化が両立できれば、光ワイヤレス通信における有力な候補デバイスとなりうる。

通常、LED の周波数応答を改善するには、活性層の厚みを減らすか、不純物密度を上げることで活性層のキャリア密度を向上させる必要がある^{1,2)}。しかし、これらの方法は、キャリアの over-flow を助長するうえ、非発光再結合センターも導入してしまうために、発光効率の低下をもたらす。結果的に、LED での高出力化と高速化は trade-off 関係となり、両者を両立させることには困難がある。

筆者らは、1996 年ごろから、光ワイヤレス通信用赤外 LED の開発に取り組んでいる。発光層に InGaAs/AlGaAs 量子井戸構造を導入し、最適化を行った。なお、光取出しを向上させるために、GaAs 基板を発光波長において透明な AlGaAs に置き換えるなどの対策を講じ、光出力と周波数応答の両立を目指した。開発前後における赤外 LED の主要特性を図 1 に示す。開発前に比べて新規開発 LED は、光出力と周波数応答の trade-off 関係がまったく新し

*スタンレー電気(株)研究技術研究所 (〒225-0014 横浜市青葉区荏田西 2-14-1) E-mail: ji-hao.liang@stanley.co.jp

**東京大学先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

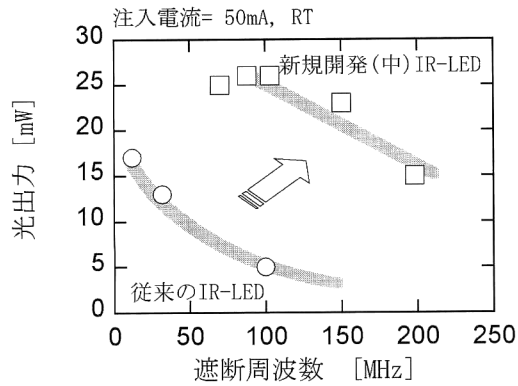


図1 赤外 LED の光出力と遮断周波数の trade-off 関係.

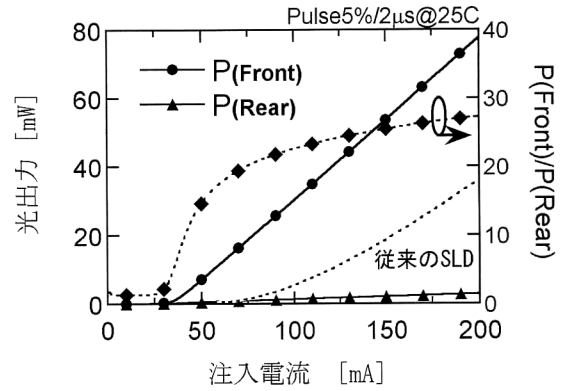


図3 SLD の光出力特性.

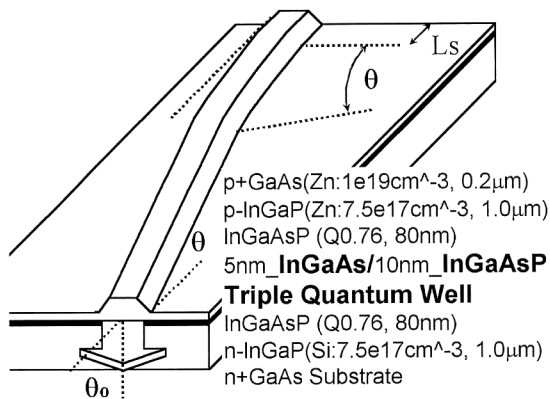


図2 SLD の積層構造および素子構造.

いベースに移行していることがわかる。紙数の都合上、詳細な紹介は省くが、単体素子のデータ伝送試験では、250 Mb/s のレートにおいて、十分なアイ開口が観察されている。さらに、実際の応用研究では、短距離通信において 500 Mbps の伝送レートが実証されている³⁾。

2. 高速光ワイヤレス通信用 SLD の特性概要

スーパールミネセントダイオード (SLD: super-luminescent diode) は、素子構造が LD とほぼ同様で、活性層を含む光導波路が電流注入によって利得媒質として働くために、半導体光増幅器として研究や実用化が行われている。その反面、素子の動作は LD と異なってレーザー発振の抑制を前提としているために、両端面からの反射を極力抑えることが最大の課題となる。結果的に出力光のコヒーレンス性は LED に類似して低く、光ファイバーへの結合が容易であることから、光ファイバージャイロ用光源としても長年研究されてきた。単体の発光デバイスとしてみた場合、SLD は、素子構造や発光メカニズム的には LD に、また発光スペクトルは LED にそれぞれ相似している。なお、発光特性もそれらの中間的性質をもつ。

筆者らが、光ワイヤレス通信用発光デバイスの候補とし

て SLD の開発に取り組んだ際に着目したのは、その出力光の性質にあった。いいかえれば、電流注入により反転分布された利得媒質で増幅される (one-pass gain) 誘導放出光は、レーザー光線のようなコヒーレンス性をもたないものの、高速変調が可能という点である。当時、従来型の SLD は発光閾値電流が大きく、光出力のリニアリティにも欠けていたために、通信デバイスとしての議論は少なかった⁴⁾。これらの背景を踏まえ、筆者らは、従来型 SLD の単純傾斜リッジに湾曲部分を導入した素子構造を提案し、半導体レーザーに匹敵する低い動作電流と高速変調特性を得ることができた。以下、新規開発 SLD の素子構造、発光特性および変調特性などを簡単に紹介する。詳細については、文献 5 を参照願いたい。

2.1 素子構造

図 2 に SLD の積層構造と素子構造を示す。積層構造は GaAs 基板上で MOCVD 法により成長させ、活性層として InGaAs/InGaAsP 歪み三重量子井戸を用い、それらを InGaAsP-SCH 層と InGaP-Clad 層で挟んだ構造にした。レーザー発振を抑えるために、光出射端面側はリッジを端面の垂直方向に対して $\theta=7^\circ$ 傾斜させた。さらに、SiO₂/TiO₂ 多層膜からなる AR コーティングを実施し、端面反射率を 4.6×10^{-6} 程度まで低減させた。後方側のリッジ導波路には、曲がり部分を設けて端面の垂直方向に沿うようにし、端面反射のフィードバックによる動作電流の低減を図った。なお、上記フィードバックを調整するために、素子の後方端面にも一定の反射率をもつ TiO₂ 単層膜をコーティングした。

2.2 発光特性

SLD の素子特性は、図 2 で示したような構造パラメータに依存して多様に変化し、特定の応用目的に合わせた最適化が可能である。以下、ワイヤレス通信用に作製した、発光ピーク波長が 930 nm で、リッジ幅 2 μm、素子

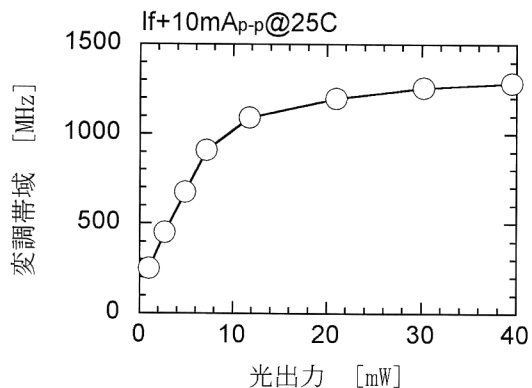


図4 小信号変調帯域の光出力依存性.

長 $750\ \mu\text{m}$ の素子特性について述べる. 図3に, 素子の注入電流に対する光出力特性を示す. 従来型 SLD の出力特性も比較用に載せた.

左側の縦軸が光出力を示すが, 発光閾値は半導体レーザーと同程度の $35\ \text{mA}$ 前後で, COD (catastrophic optical damage) 出力レベル ($100\sim 130\ \text{mW}$) までリニアな出力特性を示した. 右側の縦軸は front と rear 端面の光出力比を示すが, 両端面の反射率に非対称性をもたらすことにより, 全出力の 95% 以上を front 端面に集中させることが可能であった. 光出力特性に比較的明確な閾値が観察されるのは, 導波路へ結合する自然放出光成分がリッジ形成により少なくなり, レーザー発振に先立って出力損失による急峻な利得飽和が発生しているからである. 素子の発光半値幅は発光閾値近辺で $10\ \text{nm}$ 前後まで減少するが, その後の注入電流ではほぼ一定した値を示した. また, 残余反射による spectral ripple の振幅は注入電流に依存して増加するが, $100\ \text{mA}$ 以降では飽和傾向を示す.

2.3 変調帯域特性

図4に, SLD の光出力と小信号変調帯域幅の関係を示す. 発光閾値近辺 ($0\sim 8\ \text{mW}$) での変調帯域は, 光出力に比例して $1\ \text{GHz}$ まで単調に増加するが, 高出力領域 ($> 10\ \text{mW}$) では若干の増加傾向はみられるものの, ほぼ飽和していることがわかる. 以上の振る舞いは, 低出力時は光子密度の増加により誘導放出光の成分が増え続け, その後は光出力損失の増大により利得が飽和状態に近づき, キャリヤー密度もほぼクランプされた結果とみられる. 測定は出力端面の COD レベルまで行ったが, 変調帯域は $1.4\ \text{GHz}$ 前後に飽和し, 緩和振動に起因する周波数応答のピークシフトなどは観察されなかった. 出力光の低コヒーレンス性のために, 高出力状態においても非常に安定した周波数特性を示すことが, 新規開発 SLD の特徴といえる.

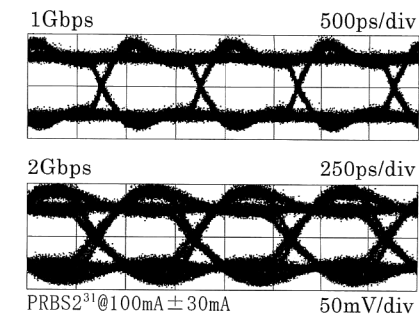


図5 単体 SLD のデータ伝送アイパターン.

図5に, 単体 SLD を用いたデータ伝送実験の結果を示す. 素子のバイアス電流を $100\ \text{mA}$ に設定し, 入力信号レベルを $60\ \text{mA}_{p-p}$, パターンデータとしては PRBS 2^{31} を用いた. $2\ \text{Gbps}$ の伝送レートにおいても良好なアイ開口が得られ, 半導体レーザー並みの伝送レートが確保できるものと考えられる.

光ワイヤレス通信に発光素子として用いられている LD, LED および SLD に言及した. それぞれが固有の利点と不利な面をもっているのが, 現状のように思われる. 特性評価において, SLD は, 通信用発光デバイスとして高い可能性を示していることは確認できたが, 今後の適応性については実際の通信により確認を行っていくしかない. その点についても, 今後の光ワイヤレス通信応用の廣がり期待したい.

文 献

- 1) T. P. Lee and A. G. Dentai: "Power and modulation bandwidth of GaAs-AlGaAs high-radiance LED's for optical communication systems," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14** (1978) 150-159.
- 2) T. J. de Lyon, J. M. Woodall, D. T. McInturff, R. J. S. Bates, J. A. Kash, P. D. Kirchner and F. Cardone: "Doping concentration dependence of radiance and optical modulation bandwidth in carbon-doped $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}/\text{GaAs}$ light-emitting diodes grown by gas source molecular beam epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1991) 353-355.
- 3) "赤外線で 500 M ビット/秒を実演," *日経エレクトロニクス*, 10月27日号 (2003) 68-69.
- 4) I. P. Kaminow, G. Eisenstein, L. W. Stulz and A. G. Dentai: "Lateral confinement InGaAsP super-luminescent diode at $1.3\ \mu\text{m}$," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19** (1983) 78-82.
- 5) J.-H. Liang, T. Maruyama, Y. Ogawa, S. Kobayashi, J. Sonoda, H. Urae, S. Tomita, Y. Tomioka, S. Kon and Y. Nakano: "High-power high-efficiency super-luminescent diodes with J-shaped ridge waveguide structure," *2002 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials Conference Proceedings*, PI5 (2002) pp. 119-122.

(2004年5月11日受理)