

# 高速光ファイバー通信用直接変調半導体レーザー

佐藤 憲 史

## Directly Modulated Semiconductor Lasers for High-Speed Fiber Communication Systems

Kenji SATO

Direct modulation of semiconductor lasers at 40 Gbit/s has been reviewed. Directly modulated lasers have been used for short reach applications because of their compactness and low cost. Technologies and subjects for 40 Gbit/s direct modulation are described. Chirp and fiber dispersion tolerance are evaluated.

**Key words:** semiconductor lasers, direct modulation, distributed feedback lasers, chirp

光通信の大容量化、高速化が、基幹ネットワークからメトロ系やアクセス系ネットワークにわたって急速に進展している。これを支えている中心的な技術として、波長分割多重 (WDM: wavelength division multiplexing) がある。WDM システムでは、波長数の増大と同時に各チャネルのビットレートの増大によって大容量化が図られてきた。近い将来の課題として、10 Gbit/s のビットレートから 40 Gbit/s へのアップグレードが脚光を浴びている。このような高速化は、長距離 WDM システムに限らず、メトロ系などの短距離通信においても重要な課題である。また、イーサネット等のデータコム市場においても高速化が進展している。例えば、高速ルーター間通信等をターゲットにした 40 Gbit/s インターコネクが提案されており、ITU-T において標準化されている<sup>1)</sup>。伝送距離やビットレート等のシステム仕様に応じて、光源等の装置構成は大きく異なっている。長距離では、高性能の要求から外部変調方式が一般的である。一方、短距離通信では、大幅なコスト低減が求められており、半導体レーザーの直接変調方式が一般に用いられている。直接変調レーザーを用いることで、構成が単純となり小型化が可能となる。また、レーザーの温度特性の改善により温調なしの動作が可能となっており、省電力化が図られている。このように、短距離通信では、小型化・省電力化が経済性の点から最優先課題となっている。現在、10 Gbit/s 用直接変調レーザーが開発されているが、40 Gbit/s 用についてはようやく研究が開始し

た段階にある。半導体レーザーの小信号変調帯域は、歪量子井戸などの新構造・新材料によって拡大しており、40 GHz を超える変調帯域が報告されている<sup>2)</sup>。40 Gbit/s のビットレートにおいて、直接変調 DFB レーザーを短距離通信に適用する検討がいくつか報告されている。筆者らは、1.3  $\mu\text{m}$  帯分布帰還型 (DFB: distributed feedback) レーザーを用いて 40 Gbit/s 伝送を報告した<sup>3)</sup>。さらに、他の機関からも、直接変調 DFB レーザーを用いた 40 Gbit/s 伝送が報告されている<sup>4)</sup>。これらの報告は、直接変調レーザーによる 40 Gbit/s 伝送の可能性を示すものであるが、実用上は、検討すべき多くの課題がある。

本報告では、直接変調 DFB レーザーを用いた 40 Gbit/s 伝送の現状と課題について解説する。特に、DFB レーザーの直接変調で問題となるチャープとファイバー分散トランスについて実験的に評価した結果を述べる。

### 1. 半導体レーザーの変調帯域

#### 1.1 変調帯域の拡大

半導体レーザーでは、レーザー共振器内のキャリアとフォトンの寿命時間に起因した緩和振動周波数 ( $f_r$ ) によって、変調帯域が制限される。 $f_r$  は近似的に  $f_r = \sqrt{PGG_N} / 2\pi$  と表される<sup>5)</sup>。ここで、 $P$  はレーザー共振器内のフォトン数、 $G$  は光利得、 $G_N$  は微分利得 (キャリア数  $N$  の変化に対する利得変化の割合) である。 $PG$  は誘導放出レートを表し、誘導放出が強まることで  $f_r$  が増大する。これは、バイアス電流を増大することで変調帯域が拡大するこ

表1 長波長帯半導体レーザーの高速化技術.

結晶構造	材 料	その他
バルク		埋め込み構造
↓	InGaAsP	
MQW	↓	短共振器
↓	InGaAlAs	
歪 MQW		ドーピング
↓		
量子ドット		高周波実装

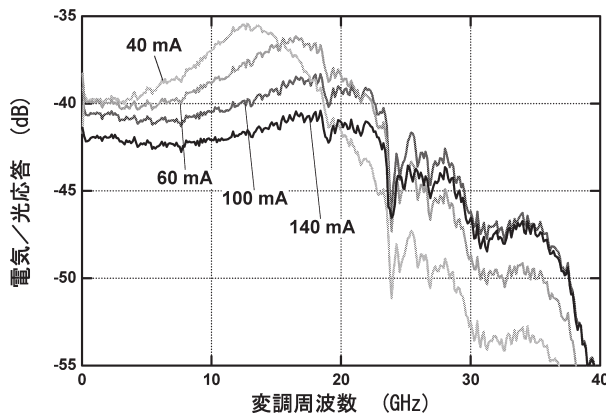
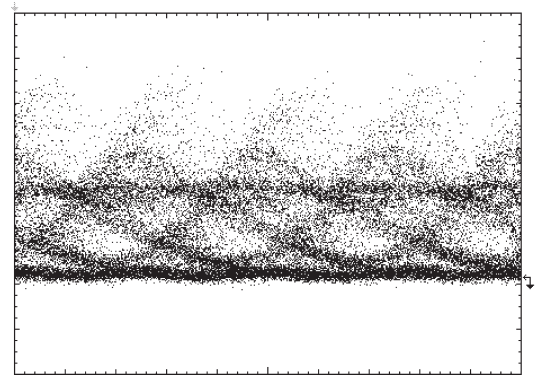


図1 1.55  $\mu\text{m}$  帯DFBレーザーの小信号変調応答特性.

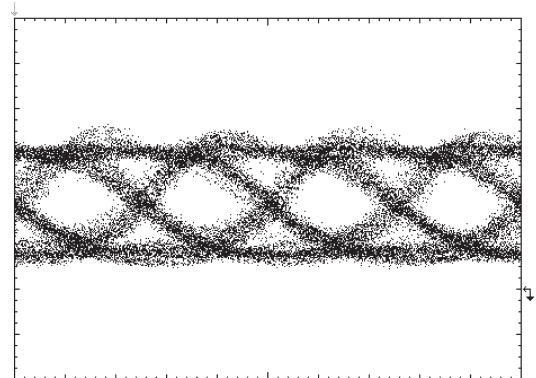
とを意味する。レーザーの変調帯域を拡大するために、利得特性を改善し微分利得  $G_N$  を増大させるという視点から多くの研究がなされてきた。表1に、長波長帯半導体レーザーの高速化技術の概略を示す。結晶構造では、バルクから多重量子井戸 (MQW: multi-quantum well), 歪超格子の導入, さらに量子ドットへと研究が進展してきた。これらは、おもに、キャリアのエネルギー分布を狭めることで利得分布を狭窄化し、誘導放出の効率を高めることをねらっている。材料ではInGaAsP系が一般的であるが、InGaAlAs系による電子閉じ込め効果が注目されている<sup>6)</sup>。ほかに、重要な技術として、半絶縁性半導体埋込み構造による浮遊容量の低減、短共振器化によるフォトン寿命の低減、ドーピングによる微分利得増大、高周波実装技術などがあげられる。実用的には、歪InGaAsP-MQWを用いたレーザーが一般的であり、構造最適化による特性向上が図られてきた。その結果、長波長帯レーザーの小信号変調帯域は、30 GHz以上が実現されている<sup>7)</sup>。量子ドットレーザーでは、さらなる広帯域化が期待されている<sup>8)</sup>。

## 1.2 変調帯域の評価

10 Gbit/s以上の高速光伝送用に開発された1.55  $\mu\text{m}$  帯DFBレーザーについて、変調特性を評価した。デバイスは歪InGaAsP-MQWレーザーであり、閾値電流は10 mA程度、光出力は10 mW以上が得られている。小信号変調測定によって得られた電気/光応答 (RF パワーの相対値)



(a)



(b)

図2 40 Gbit/s アイパターン. (a) バイアス電流: 53 mA, (b) バイアス電流: 92 mA.

の周波数特性を図1に示す。ここで、注入電流のバイアス値をパラメータとしている。バイアス電流の増大に伴って帯域が拡大されており、3 dB ダウンの帯域として29 GHzの値が得られている。測定結果では、バイアス電流の増大に伴い、帯域が飽和する傾向がみられる。この要因としてレーザーの高周波実装の問題が考えられ、素子構造の最適化と実装技術の改善によって、さらなる帯域拡大の可能性はある。

## 2. 40 Gbit/s 変調とチャープ

### 2.1 40 Gbit/s 変調

冒頭で述べたDFBレーザーモジュールを用いて、40 Gbit/s変調実験を行った。パルスパターンジェネレーターから発生される40 Gbit/sの電気信号をドライバーを用いて4.5 Vp-pの振幅に増幅し、レーザーに供給している。得られた光信号を高速フォトディテクターで電気信号に変換し、サンプリングオシロスコープで観測したアイパターンを図2に示す。図2(a)では、バイアス電流値を53 mAとしており、大きな波形乱れが観測されている。レーザーの変調帯域が低いため、信号劣化が起きている。図2(b)では、バイアス電流値を92 mAに増大することで、明確なアイ開口が得られている。この条件でビットエラーレー

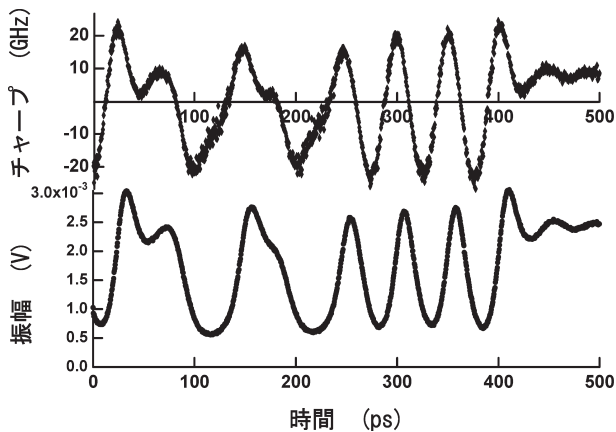


図3 チャープと信号振幅の時間波形.

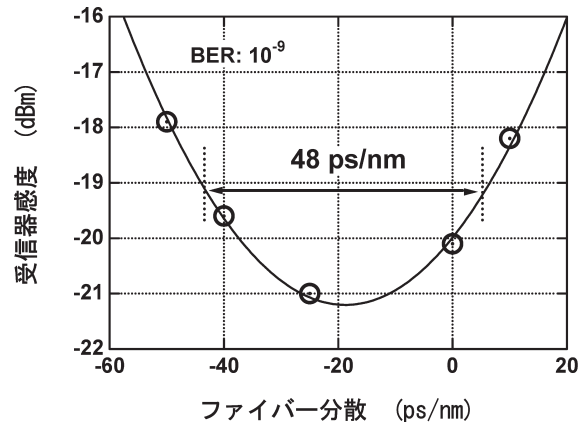


図4 ファイバー分散に対する受信器感度.

ト (BER: bit error rate) を評価し,  $10^{-12}$  以下のエラーフリーを確認している. 図1に示したように, バイアス電流の増大により帯域が拡大し, 40 Gbit/s 変調が可能になった. しかし, 大きなバイアス電流ではオフ時の光出力を低くできないため, 消光比が劣化する問題がある. 図2(b)では, 消光比は 4.5 dB 程度である. 消光しない光パワーは信号伝送に寄与しないため, パワーペナルティとなる. 伝送路のロスや受信器の特性から消光比の許容値が決まるが, パワーマージン拡大の視点から検討すべき課題である.

## 2.2 チャープの評価

半導体レーザーの直接変調では, チャープ特性が問題となる. チャープとは, 変調時にキャリア変動に伴って光周波数が変動する現象である. 光ファイバー通信では, ファイバーのもつ波長分散によって光信号が劣化し伝送距離が制限される. 信号にチャープが含まれる場合, 信号劣化はより顕著になるため, チャープ特性が問題となる. 前節で述べたレーザーの 40 Gbit/s 変調時について, チャープを評価した結果を図3に示す. チャープの測定は, 光フィルターを利用した方法<sup>9)</sup>によった. 0101 ビットパターンに対応した部分で,  $\pm 20$  GHz の大きなチャープが観測された. パルスのピーク近傍で周波数が減少する方向に変化しており, レッドチャープである.

## 2.3 ファイバー分散トレランス

分散値の異なるファイバーに対して伝送後の BER を評価し, 直接変調による 40 Gbit/s 信号の分散トレランスを見積もった. 図4は,  $BER=10^{-9}$  における受信感度を総分散値に対して示している. 分散なしの場合と比較して, 1 dB の感度劣化を与える分散値から, 48 ps/nm の分散トレランスが得られた. これは, 10 Gbit/s 伝送と比較して

1桁程度小さい値である. 一般に, 分散トレランスはビットレート<sup>2)</sup>の二乗に反比例することが知られており, その理論に沿った結果となっている. また, レッドチャープを反映して, 最適分散値が負の分散領域にシフトしている.

DFB レーザーの直接変調による 40 Gbit/s 伝送の現状と課題について述べた. 40 Gbit/s というレートは半導体レーザーの直接変調では限界への挑戦であり, ようやく可能性が示された段階にある. 今後の高速化技術の進展と適応領域を明確にした応用の展開が期待される.

## 文 献

- 1) ITU-T Draft Recommendation G. 693: Optical interfaces for intra-office systems (2001).
- 2) S. Weisser, *et al.*: "Damping-limited modulation bandwidths up to 40 GHz in undoped short-cavity  $In_{0.35}Ga_{0.65}As$ -GaAs multiple-quantum-well lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 608-610.
- 3) K. Sato, *et al.*: "40 Gbit/s direct modulation of distributed feedback laser for very-short-reach optical links," *Electron. Lett.*, **38** (2002) 816-817.
- 4) B. Wedding, *et al.*: "43 Gbit/s transmission over 210 km SMF with a directly modulated laser diode," *ECOC-IOOC 2003*, Mo4.3.7 (2003) pp. 98-99.
- 5) R. Paiella, *et al.*: "10 Gbit/s transmitter based on directly modulated InGaAlAs laser operating up to 126°C," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1653-1654.
- 6) G. P. Agrawal and N. K. Dutta: *Semiconductor Lasers*, 2nd ed. (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993).
- 7) Y. Matsui, *et al.*: "30 GHz bandwidth 1.55  $\mu$ m strain-compensated InGaAlAs/InGaAsP MQW laser," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **9** (1997) 25-27.
- 8) 荒川泰彦, 塚本史郎: "低次元量子構造作製技術とデバイス応用の現状と展望", *応用物理*, **74** (2005) 293-306.
- 9) R. A. Saunders, *et al.*: "Wideband chirp measurement technique for high bit rate sources," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 1336-1338.

(2005年8月8日受理)