

デジタルコヒーレント通信用狭線幅半導体レーザー

石井 啓之

Narrow Linewidth Semiconductor Lasers for Digital Coherent Communications

Hiroyuki ISHII

Wavelength tunable lasers are key components as light sources in large capacity optical core networks that employ dense wavelength-division-multiplexing techniques. Digital coherent technologies are now being developed in order to increase the transmission capacity for next generation optical networks. In such systems, an advanced modulation/detection technique will be used, and low phase noise characteristics will be essential for tunable laser sources. This article reviews techniques for reducing the phase noise of tunable lasers.

Key words: semiconductor lasers, tunable lasers, spectral linewidth

インターネットやブロードバンドサービスの普及により、光通信網のトラフィックは急速に増加している。この情報量増大に応えるため、光通信技術やそれを支える光デバイス技術の研究・開発も絶え間なく進められている。1990年代後半より長距離光通信システムでは、ファイバー1本あたりの伝送容量を増やすために、高密度波長多重 (dense wavelength division multiplexing; DWDM) 方式が用いられてきた。これは1本のファイバーに波長の異なる光信号を多重化して伝送する方式であり、波長数だけ伝送容量を拡大することができる。DWDM通信システムの送信器側光源としては、現在、単一モードで動作する1550 nm帯波長可変半導体レーザーが用いられている。DWDM通信システムの導入当初は固定波長の分布帰還型 (distributed feedback; DFB) レーザーが使用されていたが、現在では、使用する波長帯の中から任意の波長で発振できる波長可変レーザーの開発が進み、長距離通信用光源の主流となっている¹⁾。波長可変レーザーを光送信器に用いれば、光送信器の種類を単一にすることができるので、在庫コストを大幅に削減できるという利点があるからである。さて、伝送容量のさらなる拡大を考えた場合、光増幅器の使用可能な波長帯域の制限などから、波長数をさらに増やすことは困難なので、一波長あたりの信号速度を増や

す方向で開発が進められている。現在導入されている光通信システムで一波長あたりの信号速度が最高なのは40 Gbit/sであるが、次世代の光通信システムでは、100 Gbit/sとなるシステムの開発が進められている。このシステムでは、デジタルコヒーレント方式という新たな変調/復調方式が採用される見込みで、これに伴い、光源への要求性能が変わってくる。本稿では、デジタルコヒーレント通信における光源への要求性能について解説した後、次期システムに適用可能な波長可変レーザーの開発状況について紹介する。

1. デジタルコヒーレント方式と光源線幅

一波長あたりの信号速度が10 Gbit/sまでのシステムでは、変復調方式として、強度変調/直接検波 (on off keying/direct detection; OOK/DD) 方式が使用されてきた。図1(a)に示すように、光強度の強、弱にビットの1,0を割り当てて、受信器では光強度の強弱のみを判定する方式である。送受信部で使われる光部品の構成が簡単なので、10 Gbit/s以下のシステムで広く使われている。10 Gbit/sを超える光通信では、ファイバーの分散制限、電子回路の速度制限、50 GHzグリッドによる光周波数帯域の制限などを克服するため、光周波数利用効率の高い変調方

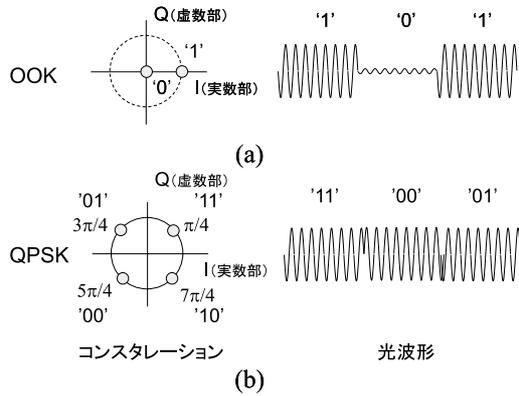


図1 (a) OOK, (b) QPSK 変調方式におけるコンスタレーションと光波形.

式が用いられる。次世代 100 Gbit/s システムで採用されるデジタルコヒーレント方式では、光の位相情報を用いた位相変調方式が用いられ、受信側では、ローカル光と信号光をミキシングして信号光の振幅・位相情報を検出するコヒーレント検波方式が用いられる。さらに、偏波多重、偏波ダイバーシティー技術を用いて、光周波数利用効率を2倍にする。検波後の波形は、高速のAD (analog to digital) コンバーターによりデジタル信号に変換され、DSP (digital signal processor) により光周波数オフセットの補正や各種分散の補正が行われる。位相変調方式としては、四値の QPSK (quadrature phase shift keying) 方式が用いられる。図1 (b) に示すように、1 タイムスロット中の光の位相が4つの値 ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$) のいずれかとなるようにし、2ビット分の意味をもたせる。これによりボーレート (変調速度) の2倍の速度のデータ伝送が可能となる。次世代 100 Gbit/s システムでは、ボーレート 25 Gbaud で四値の変調方式を用いることにより、倍の 50 Gbit/s のデータ速度となり、さらに偏波多重を行うことによって 100 Gbit/s のデータ信号が扱われる。

従来の OOK/DD 方式では光の位相情報は用いていないので、光源の位相ノイズに関しては問題とはならなかったが、デジタルコヒーレント方式では、信号光源およびローカル光源の位相ノイズ、すなわちスペクトル線幅が問題となる。図2に示すように、スペクトル線幅が十分狭い光源を用いた場合は、コンスタレーション (複素振幅平面) 上で四値のシンボルを識別可能だが、線幅が広がると、コンスタレーション上で位相角が変動してしまうため、シンボルの識別ができなくなっていく。このように、次世代高速伝送システムにおいては、波長可変光源への要求仕様に線幅が付け加わる。100 Gbit/s システムでは、1 MHz 以下の線幅が送信光源およびローカル光源に要求される。

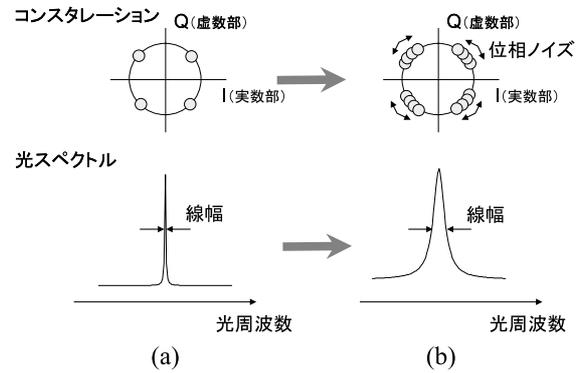


図2 コヒーレント通信における光源線幅の影響. (a) 光源線幅が十分狭い場合, (b) 不十分な場合を示す.

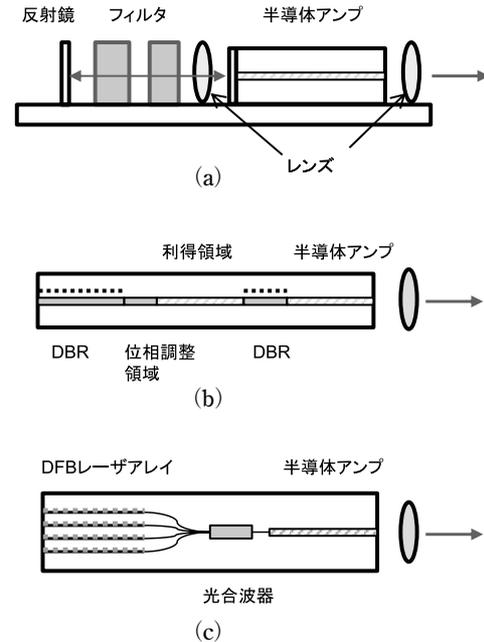


図3 主要な波長可変半導体レーザーの構造. (a) 外部共振器型レーザー, (b) DBR レーザー, (c) DFB レーザーアレイ.

2. 各種波長可変レーザー

波長可変レーザーは、光に利得を与える半導体利得領域と、発振波長を選択する波長可変フィルターから構成される。波長可変フィルターの透過波長もしくは反射波長を何らかの手段を用いて変化させることによって、発振波長を変化させる。光増幅器の帯域 35~40 nm の中の任意の波長で発振できることが、標準的な要求仕様である。半導体レーザーの線幅は、共振器内に存在するコヒーレント光の全光子数に、自然放出光によるインコヒーレントな光子がどの程度混入するかによって定まる。一般に、レーザー共振器長を長くすれば共振器内の全光子数が増えるので、線幅特性が改善される。

現在 WDM 通信システムで使用されている波長可変レーザーを構造別に分類すると、外部共振器型レーザー、分布

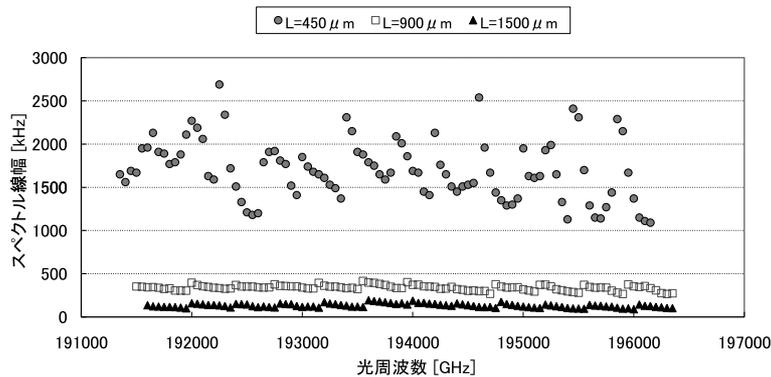


図4 DFB レーザーアレイにおけるスペクトル線幅のレーザー共振器長依存性.

反射型 (distributed Bragg reflector; DBR) レーザー, DFB レーザーアレイの3つに大別される. これらのレーザーの特徴とデジタルコヒーレント通信への適用性について, 以下に簡単に記す.

2.1 外部共振器型レーザー

外部共振器型レーザーは, 外部の光フィルターと半導体光増幅器とをレンズを用いて空間的に結合させ, 共振器を構成する (図3 (a)). 高性能の外部フィルターを用いることができるので, 比較的広い波長可変域を得ることができる²⁾. 共振器長が長いため線幅特性にすぐれており, 10~60 kHz 程度の線幅を容易に得ることができるので, デジタルコヒーレント通信用光源として有力な構成である. 欠点としては, モード間隔が狭いためモードの安定化制御が必要なことと, 他のモノリシック型波長可変レーザーと比べて構成部品が多く, 組立てコストの点で不利であることが挙げられる.

2.2 DBR レーザー

DBR レーザーは, 半導体導波路上に反射型のフィルターを集積した構造をもつモノリシック集積型のレーザーである (図3 (b)). 電流注入により屈折率を変化させることで発振波長を高速 (ナノ秒オーダー) に変化させることができることが特徴である. 線幅特性に関しては, 電流注入による波長チューニング時に, 注入キャリアのゆらぎの影響で線幅が劣化してしまうという問題がある. しかし, ヒーター電極を用いた熱による屈折率変化を利用して 170 kHz の狭線幅動作を実現した例が報告されており³⁾, デジタルコヒーレント通信用としても有用である.

2.3 DFB レーザーアレイ

DFB レーザーアレイは, 通信用光源として実績のある DFB レーザーをアレイ化して, 広い波長可変特性を実現したものである (図3 (c)). 波長の異なる DFB レーザー複数個 (12 個程度) と光合波器, 半導体アンプを 1 チップに集積した構成となっている. 特徴は, 波長可変時にモー

ド跳びがないことと, 波長可変のための制御が簡便なことから, レーザーの長期的な安定動作にすぐれる点であることである. 通常の共振器長の DFB レーザーの線幅は数 MHz だが, 長共振器化によって数百 kHz への狭線幅化が可能である⁴⁾.

一例として, 図4に DFB レーザーの共振器長を 450, 900, 1500 μm とした DFB レーザーアレイの線幅特性を示す. 光周波数は, 50 GHz 間隔の C 帯 WDM グリッド上に設定し, ファイバー光出力が 20 mW となるような条件で動作させた. DFB 長 450, 900, 1500 μm の素子の線幅は, それぞれ 1~3 MHz, 300~600 kHz, 90~160 kHz となっており, 長共振器化により線幅特性が改善される. DFB 長 900 μm 以上の素子で, 1 MHz を十分下回る線幅となっており, 100 Gbit/s システムへの要求条件を満足する.

以上に示した波長可変レーザーに関しては, いずれも一長一短があり, 現用の 10 Gbit/s システムでもシェアを分け合って使用されている. デジタルコヒーレント通信用光源として, 性能改善やコスト低減のための研究開発が今後も続けられていくものと考えられる.

文 献

- 1) J. Buus and E. J. Murphy: "Tunable lasers in optical networks," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 5-11.
- 2) A. Daiber, C. Shulz, J.-C. Lo, P. Ludwig and S. Xu: "Tunable DWDM XFP with an external cavity laser transmitter and transmission performance matching 300-Pin transponders," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2010*, OThC5 (San Diego, 2010).
- 3) T. Kaneko, Y. Yamauchi, H. Tanaka, T. Machida, T. Ishikawa, T. Fujii and H. Shoji: "High-power and low phase noise full-band tunable LD for coherent applications," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2010*, OWU7 (2010).
- 4) H. Ishii, K. Kasaya and H. Oohashi: "Spectral linewidth reduction in widely wavelength tunable DFB laser array," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **15** (2009) 514-520.

(2011 年 4 月 5 日受理)