

デジタルコヒーレント伝送用 二出力波長可変半導体レーザ

後藤田光伸*
望月敬太**
高林正和*

Dual-output Tunable Laser Diode for Digital Coherent Optical Transmission System

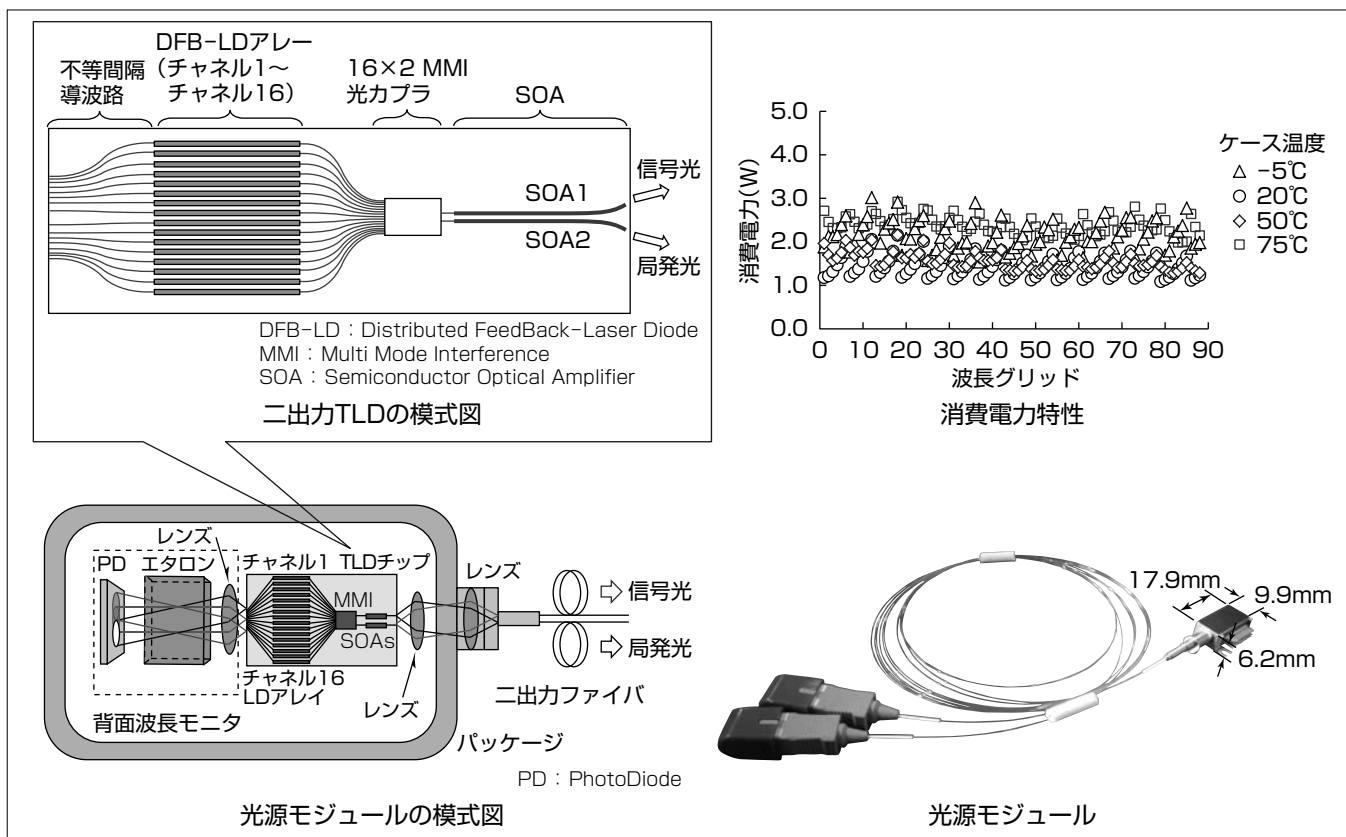
Mitsunobu Gotoda, Keita Mochizuki, Masakazu Takabayashi

要旨

コアメトロ系などの幹線系光通信では、波長の異なる複数の信号を同時に伝送する高密度波長分割多重伝送システムが用いられている。さらに、近年のデータ通信量の急増に対応するために、位相変調方式を採用した100Gbps(ギガビット/秒)デジタルコヒーレント伝送方式が普及しつつある。

デジタルコヒーレント伝送では、光送信部の信号光源及び光受信部の局発光源として、広帯域の波長可変半導体レーザ(Tunable Laser Diode: TLD)が用いられる。初期の光送受信器には、2つのTLDモジュールを搭載していたが、CFP(Centum Gbps Form-factor Pluggable)やCFP2などモジュールの小型化進展に伴い、1つのTLDモジュールで2つの光源の役割を兼用する必要が出てきた。

高出力TLDモジュールに出力分岐用の光カプラを接続する構成が考えられるが、挿入損失発生、モジュールサイズや消費電力の増大等の課題がある。今回、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送向けに、外部光カプラ不要で、送受信の光信号強度を独立に制御可能な、二出力TLD、及びそれを用いた光源モジュールを新たに開発した。低消費電力動作可能な素子、背面波長モニタ、高効率な二出力光学系の実現によって、モジュールサイズは17.9×9.9×6.2(mm)となり、信号光出力13.8dBm、局発光出力10.8dBmでのモジュール消費電力3.0W、光周波数安定度-0.69~0.46GHzと、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送に好適な特性を得た。



二出力TLD及び光源モジュール

デジタルコヒーレント伝送方式での送信部の信号光源と受信部の局発光源を1つの素子で兼用できる二出力TLDを開発した。左図が二出力TLD、及びそれを用いた光源モジュールの模式図、右図が波長チャンネルごとの消費電力特性及び光源モジュールの外観写真である。OIF(Optical Internetworking Forum)の標準規格に準拠した小型化を実現し、100Gbpsのデジタルコヒーレント伝送に必要な諸特性を満足できた。

1. ま え が き

近年、インターネットやスマートフォンの利用拡大を背景に、高密度波長分割多重伝送(DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing)システムの大容量化が進んでいる。また、データ通信量に合わせ、柔軟に再構成可能な通信網の実現が求められている。これに伴い、従来の固定波長光源である分布帰還型(DFB: Distributed FeedBack)半導体レーザから、30nm以上波長を変えられるTLD及び位相変調を用いるデジタルコヒーレント伝送方式への移行が進行している。

デジタルコヒーレント方式では、直交する2つの偏波の光に対して4種類の位相信号を載せる。送信側では、TLDの出射光を位相変調器で変調し、受信側では光受信フロントエンドモジュールで信号光と局発光源TLDの出射光を合波して電気信号に変換する。この電気信号に種々のデジタル信号処理が施されて、送信信号が復元される。

このシステム向けの初期の光送受信器では、光送信部及び光受信部で用いる2台のTLDモジュールを搭載していた。制御回路を含むTLDアセンブリ(ITLA: Integrable Tunable Laser Assembly)の入出力インタフェースは、OIFの標準規格であるOIF-ITLA-MSA(Multi-Source Agreement)で規定されている。一方、CFP, CFP2, CFP4等、送受信モジュールの小型化進展に伴い、1つのTLDモジュールで2つの光源を兼用する必要が出てきた。しかし、高出力なTLDモジュールに定偏波の光ファイバカプラで出力を分岐する構成では、外部光部品付加による挿入損失、モジュールサイズ及び部材コストの増大、高出力動作時の消費電力増大等の課題がある。

今回、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送向けに、光出力強度を独立に制御可能な二出力のTLDを新たに開発した。信号光と局発光への割当てが、外部カプラなしに可能であり、小型化に有利である。

本稿では、二出力TLD、及びそれを用いた光源モジュールの開発について述べる。

2. 二出力TLD

2.1 素子の構造

開発した二出力TLDの素子構造を図1に示す⁽¹⁾。波長の長期安定性、制御性に優れるDFB-LDアレー型を採用しており、チップサイズは $4.8 \times 0.5 \times 0.1$ (mm)である。InP(インジウムリン)基板上に、発振波長の異なる16本のDFB-LDアレー及びS字導波路、LDの光出力を2本の出力ポートに結合させる 16×2 MMI光カプラ、光カプラで発生する損失を補償し、光出力を増幅するための2本の半導体光増幅器(SOA)等が集積されている。

LDチャンネルの選択とペルチェ素子(Thermo Electric

Cooler: TEC)を用いたチップ温度調整の組合せによって波長可変動作を行い、光通信で用いられるLバンド帯(1,565~1,610nm)全域をカバーする。DFB-LD出射光波長の温度依存性は $0.1\text{nm}/^\circ\text{C}$ と小さく、アレー数が少ない場合、温度調整範囲を広く取る必要があり、ペルチェ素子の消費電力が増大する。アレー数が多いと、光カプラ部での損失は増大するものの、温度調整範囲を狭めることができ、低消費電力化に有利である⁽²⁾。今回、アレー数を16として、温度調整範囲 30°C 以下($27\sim 55^\circ\text{C}$)で、ITU-T(the International Telecommunication Union-Telecommunication standardization sector)グリッド(Lバンド帯、周波数50GHz間隔、全88チャンネル)に設定できるように、各DFB-LDの回折格子ピッチを設計した。また、発振線幅500kHz以下を実現するため、回折格子長を1.2mmに長尺化した。

図2に 16×2 MMI光カプラの形状を示す。二出力TLDではLDチャンネル間の挿入損失の均一性に加え、出力導波路間の均等な分岐を実現する必要がある。チャンネル間均一性と分岐比バランスを両立させるように、MMI多モード導波路部分の形状を入力側導波路の位置に応じて最適化し、出力導波路間隔も最適化した。

16×2 MMI光カプラからの出射光は、独立に電流注入可能な2本のSOAで増幅される。MMIの分岐比のわずかなずれは、容易に補正できる。外部光ファイバカプラを用いて分岐する場合、分岐損や挿入損を補償するため、特に高温動作時にはSOAの利得飽和領域で動作させる必要がある。一方、二出力TLDではLD電流を増やさず、MMIの最適化によってSOAの利得飽和領域での動作を回避でき、素子の消費電力を下げるができる。

2本のSOA導波路の間隔は、出射端を除き、熱的なクロストークの少ない間隔である $80\mu\text{m}$ 以上に広げた。出射

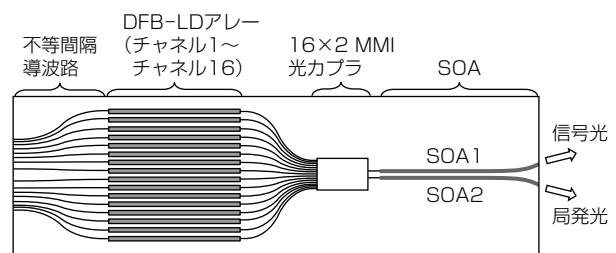


図1. 二出力TLDの素子構造模式図

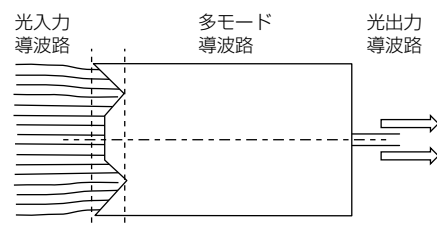


図2. 16×2 MMI光カプラの形状模式図

端での導波路間隔は40 μm 、出射角度が互いに外向きに20°傾斜するように導波路形状を設計した。また、レーザ背面出射光を用いて波長モニタを行うため、背面側には不等間隔導波路を採用した⁽³⁾。前後端面は、無反射コーティング付き窓構造としている。

2.2 素子の特性

素子のLD電流を180mA(27°C)又は220mA(55°C)、片側SOA電流300mAで動作させ、前端面出力を結合光学系を用いて、結合損失2.8dBで片側ずつ光ファイバに結合させた。16チャンネル分のファイバ出力(P_i)を図3に示す。二出力間のばらつきは27°Cで0.5dB以下、55°Cで1dB以下となっており、Lバンド帯の全域でほぼ均等に分岐できている。2つのファイバ出力を13dBm、10dBmとした時の全チップの消費電力は、0.58W(27°C)又は0.91W(55°C)と十分に低い値が得られることが確認できた。

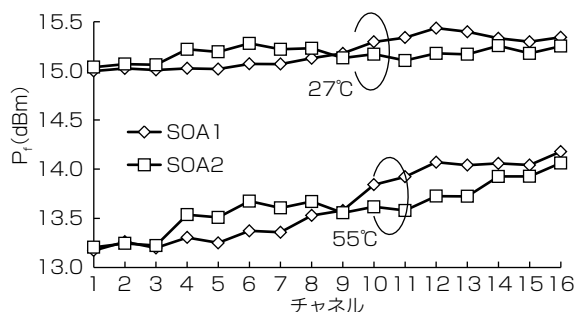


図3. MMI光カプラの分岐特性

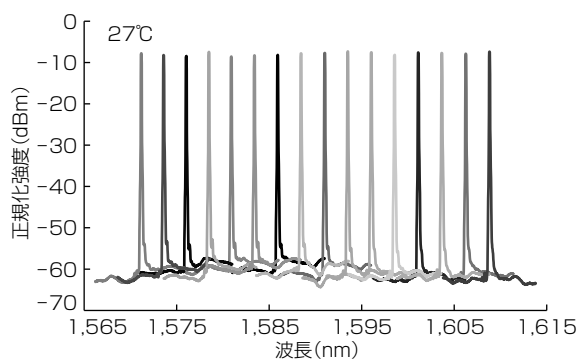


図4. 重ね合わせた出力光スペクトル(16チャンネル分)

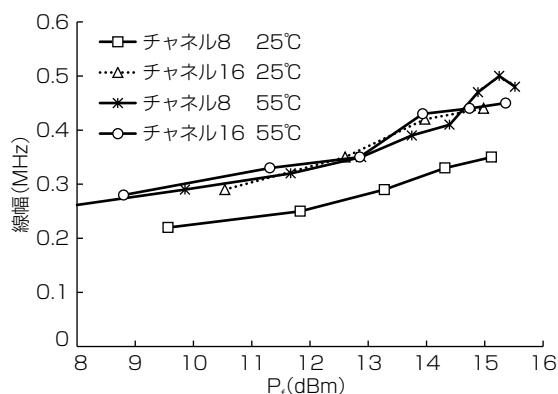


図5. 発振線幅の P_i 依存性(2チャンネル分)

次に27°Cで個別に動作させ、16チャンネル分を重ね合わせた出力光スペクトルを図4に示す。サイドモード抑圧比(Side Mode Suppression Ratio : SMSR)は、27°Cから55°Cまでの全ての動作温度で、50dB以上を維持している。

自己ヘテロダイン法で評価した、発振線幅の P_i 依存性を図5に示す。実使用条件に近いファイバ出力15dBmまで、線幅はデジタルコヒーレント伝送に必要な500kHz以下を保持していることが確認できた。

3. 二出力波長可変レーザ光源モジュール

3.1 モジュールの構造

図6は、開発した光源モジュール⁽⁴⁾の内部構造を示す。モジュールは、二出力TLD、素子温度とエタロン温度制御用のペルチェ素子、光出力モニタ、背面波長モニタ、出力用の二芯ファイバ及び結合光学系で構成される。図7は、出力用ファイバも含めたモジュールの外観写真であり、出力用ファイバ以外の外形サイズは17.9 \times 9.9 \times 6.2(mm)である。モジュールの仕様としては、信号光出力： $>+13.0\text{dBm}$ 、局発光出力： $>10.0\text{dBm}$ 、波長安定性： $<\pm 2.5\text{GHz}$ 、消費電力： $<5.0\text{W}$ を満足する必要がある。

背面波長モニタは、光フィルタであるエタロンと、エタロン透過光を受光するPDから構成される。エタロンの透過率は波長に依存するため、出射光の波長変動をPD電流値の変動として検知できる。DFB-LDアレー型のTLDでは、各LDの背面出射位置が異なるため、波長モニタ特性がばらつき、背面光の活用が難しかった。そこで、エタロンの透過率が周期的であることを利用し、異なる次数のピーク周波数が重なる光線伝搬角度になるようDFB-LD背面側の不等間隔導波路を設計した。これによって、ITU-TグリッドでLDごとの波長モニタ特性のばらつきが $\pm 2.2\text{GHz}$ 以下の、高精度な波長モニタが実現できた。

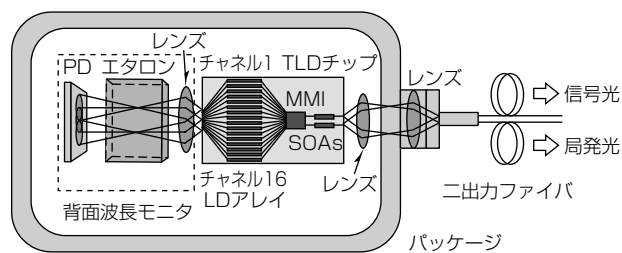


図6. 光源モジュールの内部構造模式図

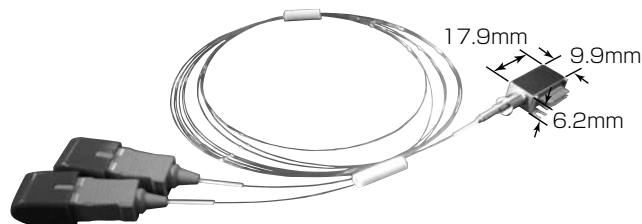


図7. 光源モジュール

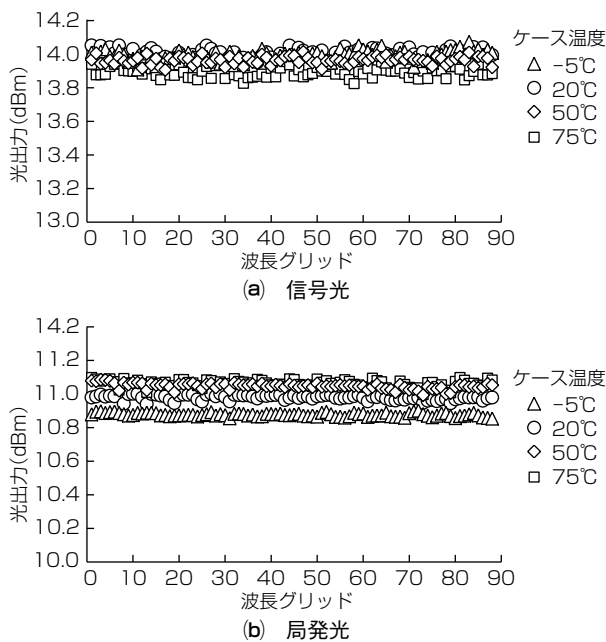


図8. ファイバ出力の波長グリッド依存性

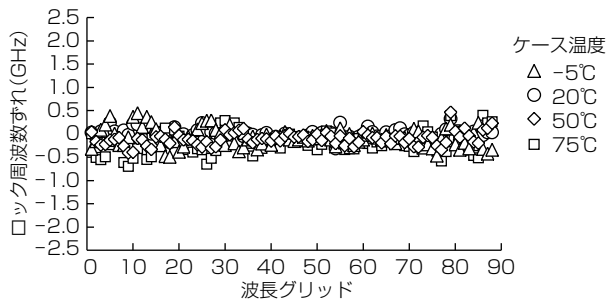


図9. 光周波数安定度の波長グリッド依存性

前面波長モニタが不要になったため、2つの出射位置を40 μ mまで近接させ、1つのレンズでまとめて二芯ファイバに結合させるコンパクトな前面光結合系を実現できた。1出力の場合と比べた結合損失の増加は、外部カプラの挿入損失0.8dBよりも小さい0.3dB以下と見積もられ、従来構造よりも高い光出力が期待できる。

3.2 光源モジュールの特性

Lバンド帯(1,572.06~1,608.76nm, 全88チャンネル)における100Gbpsデジタルコヒーレント伝送用光源モジュールの諸特性を、ケース温度-5, 20, 50, 75 $^{\circ}$ Cの4通りで評価した。信号光及び局発光のファイバ出力の波長グリッド依存性を図8に示す。光出力は、信号光側がSOA電流460mAで13.8dBm以上、局発光側がSOA電流330mAで10.8dBm以上が全チャンネルで達成されている。

図9に光周波数安定度の波長グリッド依存性を示す。ITU-Tで規定される動作グリッド周波数からのずれが-0.69~0.46GHz以下と、目標値に対して十分なマージンを持ち、従来の固定波長DFB-LDと遜色のない光周波数安定度が得られた。

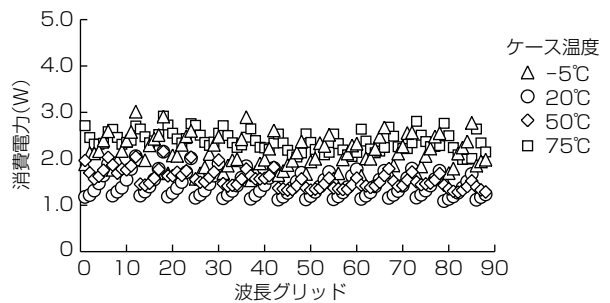


図10. モジュール消費電力の波長グリッド依存性

制御回路を除く、モジュール消費電力の波長グリッド依存性を図10に示す。最悪条件であるケース温度75 $^{\circ}$ Cを含め、消費電力は3.0W以下であった。制御回路を含む全体の消費電力見積りは4.5W以下で、Micro-ITLAの規格を満足する。

4. むすび

100Gbpsデジタルコヒーレント伝送向けに、2つの独立な光出力を持つ、新たな二出力TLD、及びそれを用いたモジュール構造を提案した。MMI光カプラ形状の最適化によって、低チップ消費電力と高光出力とを両立させた。背面光を用いた高精度な波長モニタを実現し、前面側二芯ファイバに高効率結合できるコンパクトな二出力光学系を実現した。

TLD光源モジュールのサイズはCFP2にも適用可能な17.9 \times 9.9 \times 6.2(mm)となり、信号光出力13.8dBm、局発光出力10.8dBm、線幅500kHz以下、モジュール消費電力3.0W以下、光周波数安定度-0.69~0.46GHzと、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送に好適な特性を得た。

今回開発した技術は、デジタルコヒーレント用送受信モジュールの小型、低消費電力化の実現と、普及促進に有望である。

参考文献

- (1) Gotoda, M., et al.: Dual Output Tunable Laser Diode for Simultaneous Optical Transmission and Detection, The 25th ISLC, WE26 (2016)
- (2) Horiguchi, Y., et al.: Low Power Consumption L-Band Tunable Laser Diode with Backside Waveguides, The 24th ISLC, TC2 (2014)
- (3) Mochizuki, K., et al.: A Wavelength Monitor using Unequally Spaced back-emitting Light for Tunable LD Array, The 17th OECC, 6D3-3 (2012)
- (4) Mochizuki, K., et al.: Wavelength-tunable Dual-output Laser Module with Rear-side Wavelength Monitor for Micro-ITLA, The 41st ECOC, We.1.5.6 (2015)