

400Gデジタルコヒーレント通信用 1.55 μm 帯チューナブルDFBレーザ

永尾龍介*
Ryosuke Nagao
松本啓資*
Keisuke Matsumoto
上野貴寛*
Takahiro Ueno

奥畑 亮*
Ryo Okuhata
岡 俊英†
Toshihide Oka

1.55 μm Tunable DFB-LD for 400G Digital Coherent Optical Transmission System

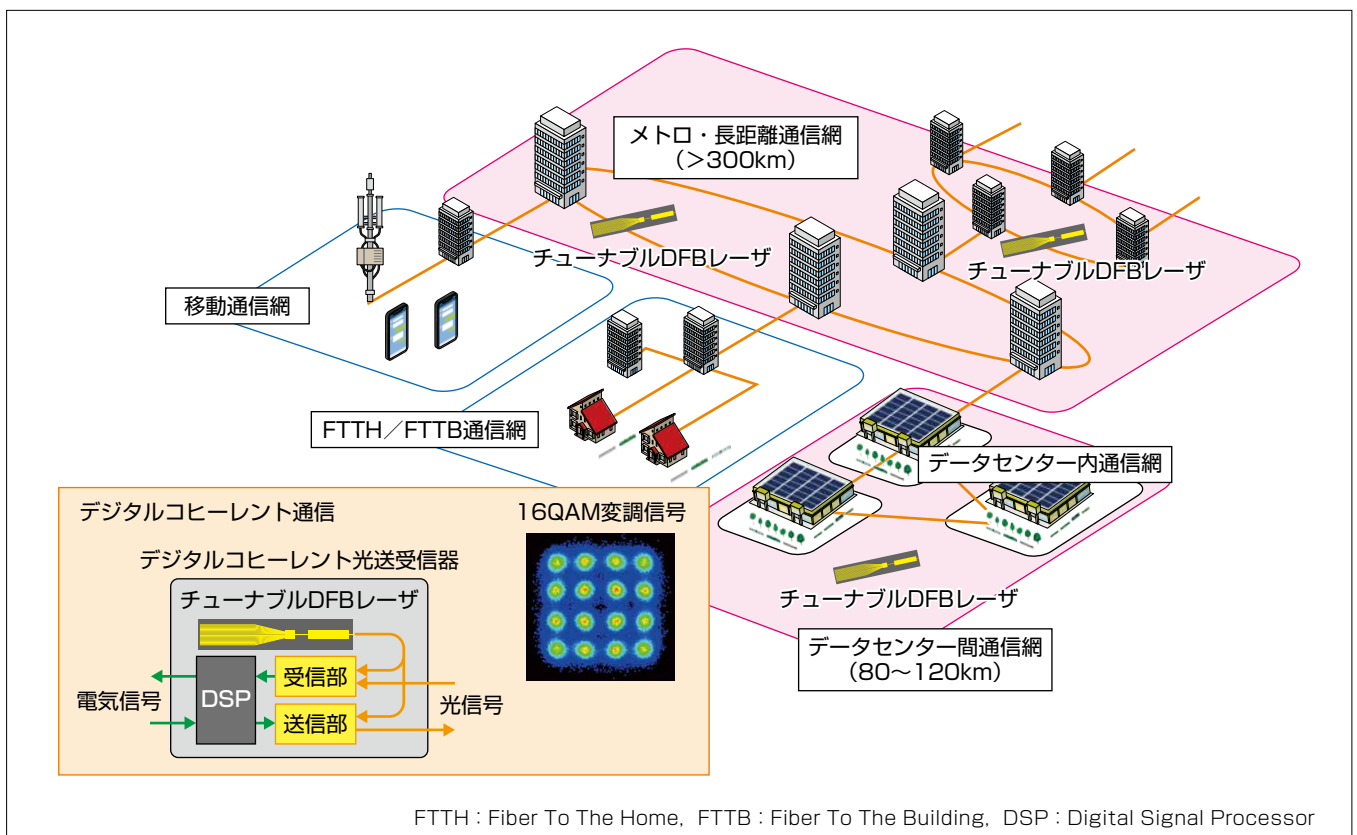
要 旨

第5世代移動通信システム(5G)の拡大や動画配信サービスの普及に伴い、通信ネットワークのデータ量は増加を続けている。通信ネットワークでは光ファイバを用いた光通信が用いられており、データ速度の向上や波長多重によって通信大容量化を支えている。最近では多値変調や光の偏波を用いて、変復調にデジタル信号処理を利用した16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)デジタルコヒーレント通信の適用が拡大しており、メトロ・長距離通信網やデータセンター間通信網で、従来の100Gbpsから400Gbpsへの高速大容量化が求められている。

デジタルコヒーレント通信では、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が用いられている。

今回、三菱電機は簡易な制御で安定した光出力を実現できるDFB(Distributed FeedBack)アレー方式を採用し、400G対応1.55 μm 帯チューナブルDFBレーザを開発した。アレー化した発振波長の異なる16本のDFB-LD(Laser Diodes)と光強度を補うSOA(Semiconductor Optical Amplifier)を集積することで光出力 $\geq 17\text{dBm}$ 、SMSR(Side Mode Suppression Ratio) $\geq 45\text{dB}$ 、線幅 $\leq 300\text{kHz}$ 、波長範囲1,526.49~1,567.94nmを実現し、400Gbpsデジタルコヒーレント通信用途に好適な特性を得た。



チューナブルDFBレーザの適用市場

5Gの拡大や動画配信サービスの普及に伴い、メトロ・長距離通信網やデータセンター間通信網で、デジタルコヒーレント通信方式の適用が拡大している。従来の100Gbpsから400Gbpsへの高速大容量化が求められており、400G対応1.55 μm 帯チューナブルDFBレーザを開発した。

1. ま え が き

5Gの拡大や動画配信サービスの普及に伴い、通信ネットワークのデータ量は増加を続けている。通信データが集約され、大容量かつ長距離伝送が必要なネットワークの根幹部分では、伝送損失の小さい光ファイバを利用した光通信が用いられており、データ速度の向上や波長多重によって通信大容量化を支えている。最近では多値変調や光の偏波を用いて、変復調にデジタル信号処理を利用したデジタルコヒーレント方式⁽¹⁾が用いられており、1本の光信号で1.84Tbpsの通信容量を実現した報告⁽²⁾もある。

デジタルコヒーレント方式では光の位相状態を変更して信号を付加するQPSK(Quadrature Phase Shift Keying)変調に加えて、光スペクトル強度にも信号を付加した16QAMや64QAM変調が用いられるため、光源には位相雑音が少なく光スペクトル線幅が細いことや十分な光強度も要求される。ほかにも光通信に必要な波長多重時のグリッドや波長安定度などの仕様も含めて、業界標準団体OIF(Optical Internetworking Forum)によってMicroITLA⁽³⁾(Integrable Tunable Laser Assembly)等の光源に対する仕様が提案されている。特に近年、メトロ・長距離通信網やデータセンター間通信網で、従来の100Gbpsから400Gbpsへの高速大容量化が求められている。

光源のキーパーツであるチューナブルレーザには外部共振器型、DBR(Distributed Bragg Reflector)型、DFBアレー型などがある。各方式の特徴を表1に示す。

外部共振器方式は共振器長を長く取ることが可能で比較的細い光スペクトル線幅を得ることが可能な一方で、波長可変量を大きくすることが難しい。DBR方式は小型で波長可変範囲を広く取りやすいが、高い波長安定度を実現するために低雑音で緻密な制御が必要になる。DFBアレー方式は複数のDFB-LD出力を合波するMMI(Multi-Mode Interference)などの挿入損によって高い光出力を得にくい一方で簡易な制御で再現性の高い光出力を得られるメリットがあるなど、方式によって特徴があり各社独自の方式で光源を実現している。

今回、デジタルコヒーレント通信用光源として、簡易な制御で安定した光出力を実現可能なDFBアレー方式を

表1. チューナブルレーザ方式

	光強度	線幅	波長可変	制御性
外部共振器型	△	○	△	△
DBR型	○	△	○	×
DFBアレー型	△	△	○	○

採用し、光強度を補う半導体光増幅器(SOA)を集積したチューナブルDFBレーザML9CP61を開発した。

2. チューナブルDFBレーザ素子設計

開発したチューナブルDFBレーザの素子構造を図1に示す。波長の長期安定性、制御性に優れたDFB-LDアレー型を採用しており、チップサイズは3.8×0.75×0.1mm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、S字曲がり導波路、LDの光出力を出力ポートに結合させる16×1MMI光カプラ、及び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SOAが集積されている。

DFB-LDの選択とTEC(ThermoElectric Cooler)を用いたチップ温度調整の組合せによって発振波長変更を行い、光通信で用いられる1.55μm帯全域をカバーする。DFB-LD出射光波長の温度依存性は0.1nm/℃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、TEC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。今回、アレー数を16として、温度調整範囲30℃(25~55℃)でOIF-IC-TROSA⁽⁴⁾及びOIF-400ZR-01.0⁽⁵⁾準拠の1.55μm帯(1,527.99~1,567.13nm)に対応するよう、各DFB-LDの回折格子ピッチを設計した。また、デジタルコヒーレント伝送に必要な発振線幅500kHz以下を実現するため、回折格子長を1.4mmに長尺化した。

16×1MMI光カプラは、16本のDFB-LDとMMIの間の導波路損失を小さくするように、MMI形状及び入力側導波路位置を最適化した。

チップ前後端面からの反射戻り光低減のために、SOA導波路を傾斜させるとともに、チップ端面は無反射コーティング付き窓構造にしている。

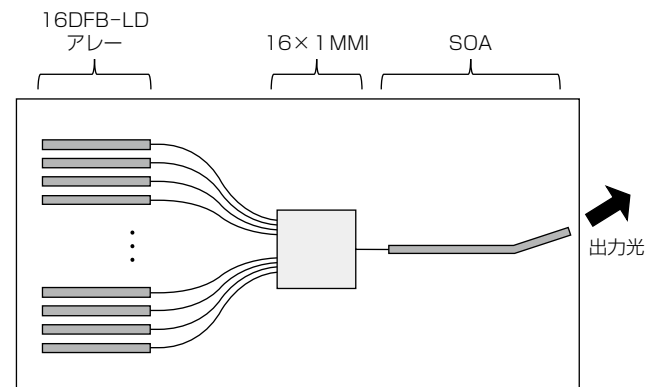


図1. チューナブルDFBレーザの素子構造模式図

3. 素子特性

チューナブルDFBレーザのLD電流を220mA(チップ温度25 $^{\circ}\text{C}$)又は250mA(チップ温度55 $^{\circ}\text{C}$), SOA電流400mAで動作させた。16本のDFB-LDのチップ光出力特性を図2に示す。16本のDFB-LD間の光出力ばらつきは1 dB以下になっており, 1.55 μm 帯全域にわたって17dBm以上の光

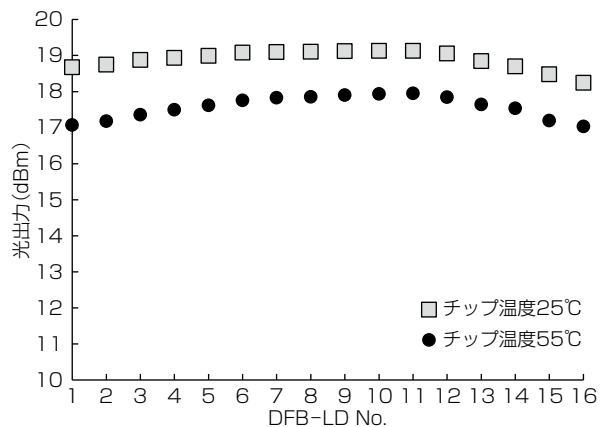


図2. チップ光出力特性

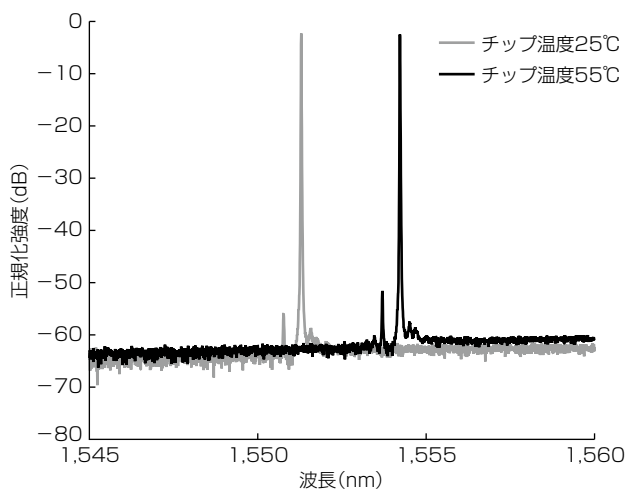


図3. 出力光スペクトル特性

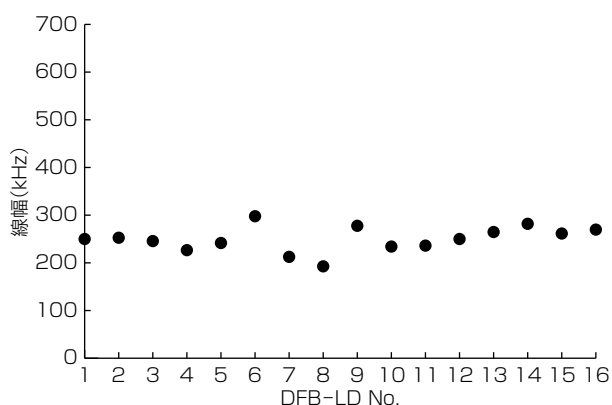


図4. 光スペクトル線幅特性

出力が得られることを確認した。

次に, DFB-LDアレーのうち1本を動作させた出力光スペクトル特性を図3に示す。チップ温度25 $^{\circ}\text{C}$ 及び55 $^{\circ}\text{C}$ で動作させた結果を重ね書きしている。温度調整範囲30 $^{\circ}\text{C}$ でのDFB-LD 1本当たりの波長可変幅は2.9nmである。4章で述べるように, 16本のDFB-LDアレーを用いることでOIF-IC-TROSA及びOIF-400ZR-01.0をカバーする波長可変範囲を実現している。またSMSRは, 25~55 $^{\circ}\text{C}$ の動作温度範囲で, 45dB以上を維持している。

図4に55 $^{\circ}\text{C}$, LD電流250mA, SOA電流400mAでの光スペクトル線幅特性を示す。受信器を用いて位相雑音スペクトルを測定し, 線幅は測定された位相雑音スペクトルの白色雑音成分から計算した。16本全てのDFB-LDで線幅は300kHz以下であり, 性能目標の500kHz以下の線幅を実現していることを確認した。

4. LDモジュール化

開発したチューナブルDFBレーザチップの波長可変範囲とそのときに必要になるTECの消費電力を確認するために, LDモジュールを試作した。外観写真を図5に, 内部構造のブロックを図6に示す。チューナブルDFBレー

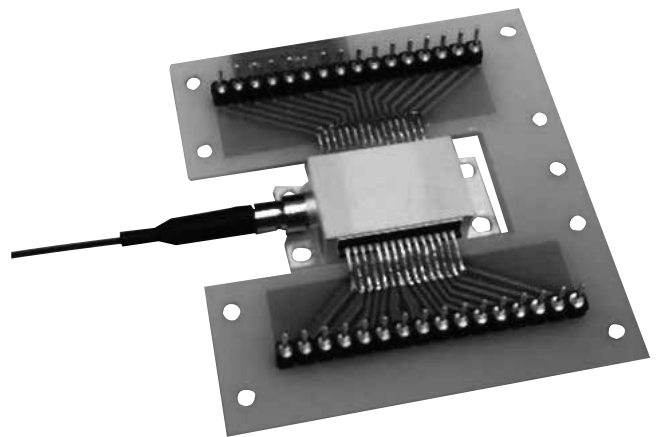
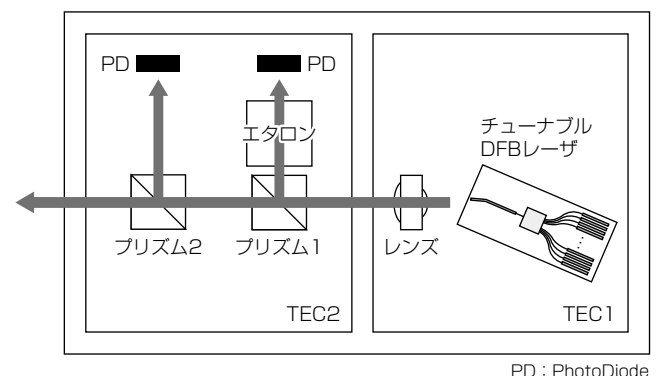


図5. LDモジュール



PD : PhotoDiode

図6. LDモジュールの内部構造のブロック図

チップはTEC1上に配置され、出力レーザ光を平行化するレンズも備えている。平行光化されたレーザ光はプリズムを介してLDモジュールの外部に取り出す光と波長モニタに用いる光に分岐される。波長モニタには波長変化を強度変化に変換する光フィルタとしてエタロンを用いて、チューナブルDFBレーザとは独立して温度制御するために別のTEC2上に配置した。

図7に試作したLDモジュールの波長可変幅の評価結果を示す。アレー化している16本のDFB-LDを順番に選択してLD駆動電流を供給し、チューナブルDFBレーザチップ温度を25~55℃に変更することで波長変更を行った。このLDモジュールの波長可変範囲は1,526.49~1,567.94nmであり、OIF-IC-TROSA-01.0(1,527.99~1,566.72nm)、OIF-400ZR-01.1(1,528.77~1,567.13nm)の規格を満足していることを確認した。

図8にLDモジュール消費電力のシミュレーション結果と評価結果を示す。チップ温度を25℃又は55℃になるようにTEC1を駆動しながらLDモジュール温度を-5~+75℃で変化させた場合のLDチップ消費電力とTECの消費電力の合計値を示している。シミュレーションではチップ温度25℃、LDモジュール温度75℃の条件で最大4.0Wになった。一方、測定結果は同条件で4.3Wであり、設計に近い値が得られるとともに、OIFのMicroITLAの消費電力仕様に適合可能な見込みを得た。

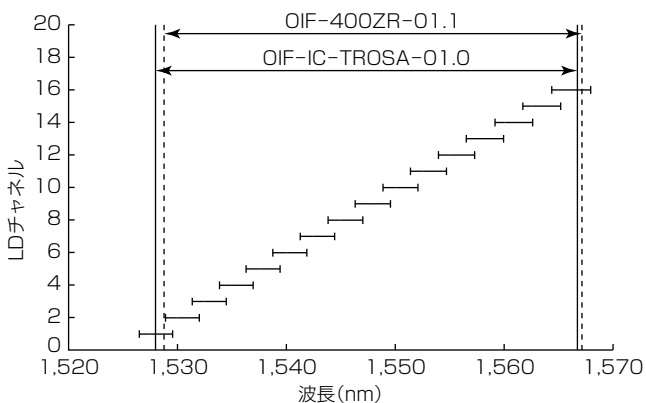


図7. LDモジュールの波長可変幅の評価結果

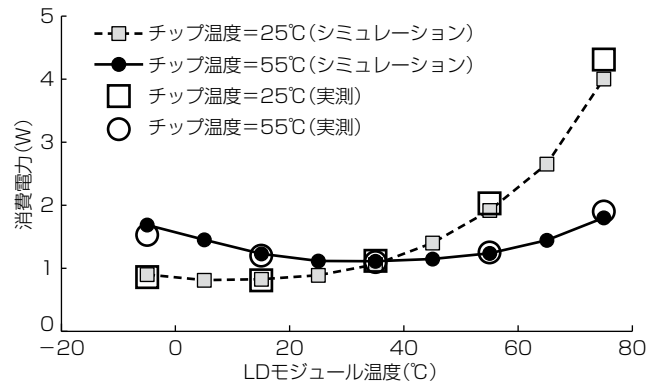


図8. LDモジュール消費電力のシミュレーション結果と評価結果

5. むすび

400Gデジタルコヒーレント通信用1.55μm帯チューナブルDFBレーザを開発した。波長可変方式として、波長の長期安定性、制御性に優れたDFB-LDアレー型を採用した。発振波長の異なる16本のDFB-LDアレー及び16×1 MMI光カプラ、SOAを集積することで光出力 ≥ 17 dBm、SMSR ≥ 45 dB、線幅 ≤ 300 kHz、波長範囲1,526.49~1,567.94nmを実現し、400Gbpsデジタルコヒーレント通信用途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通信の大容量化に貢献するとともに、顧客の光トランシーバに最適なパッケージ設計に寄与することを期待する。

参考文献

- (1) 鈴木扇太, ほか: 光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発, 電子情報通信学会誌, 95, No.12, 1100~1116(2012)
- (2) Mardoyan, H., et al.: First 260-GBd Single-Carrier Coherent Transmission over 100km Distance Based on Novel Arbitrary Waveform Generator and Thin-Film Lithium Niobate I/Q Modulator, ECOC2022, Th3C.2 (2022)
- (3) OPTICAL INTERNETWORKING FORUM: MicroITLA-01.1 (2015)
<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/2019/01/OIF-Micro-ITLA-01.1.pdf>
- (4) OPTICAL INTERNETWORKING FORUM: IC-TROSA-01.0 (2019)
<https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-IC-TROSA-01.0.pdf>
- (5) OPTICAL INTERNETWORKING FORUM: 400ZR-01.0 (2020)
https://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-400ZR-01.0_reduced2.pdf