

# 100Gbpsデジタルコヒーレント伝送用 光源モジュール

望月敬太\*  
後藤田光伸\*\*  
上野雄鋭\*

Laser Module for 100Gbps Digital Coherent Optical Transmission System

Keita Mochizuki, Mitsunobu Gotoda, Yuto Ueno

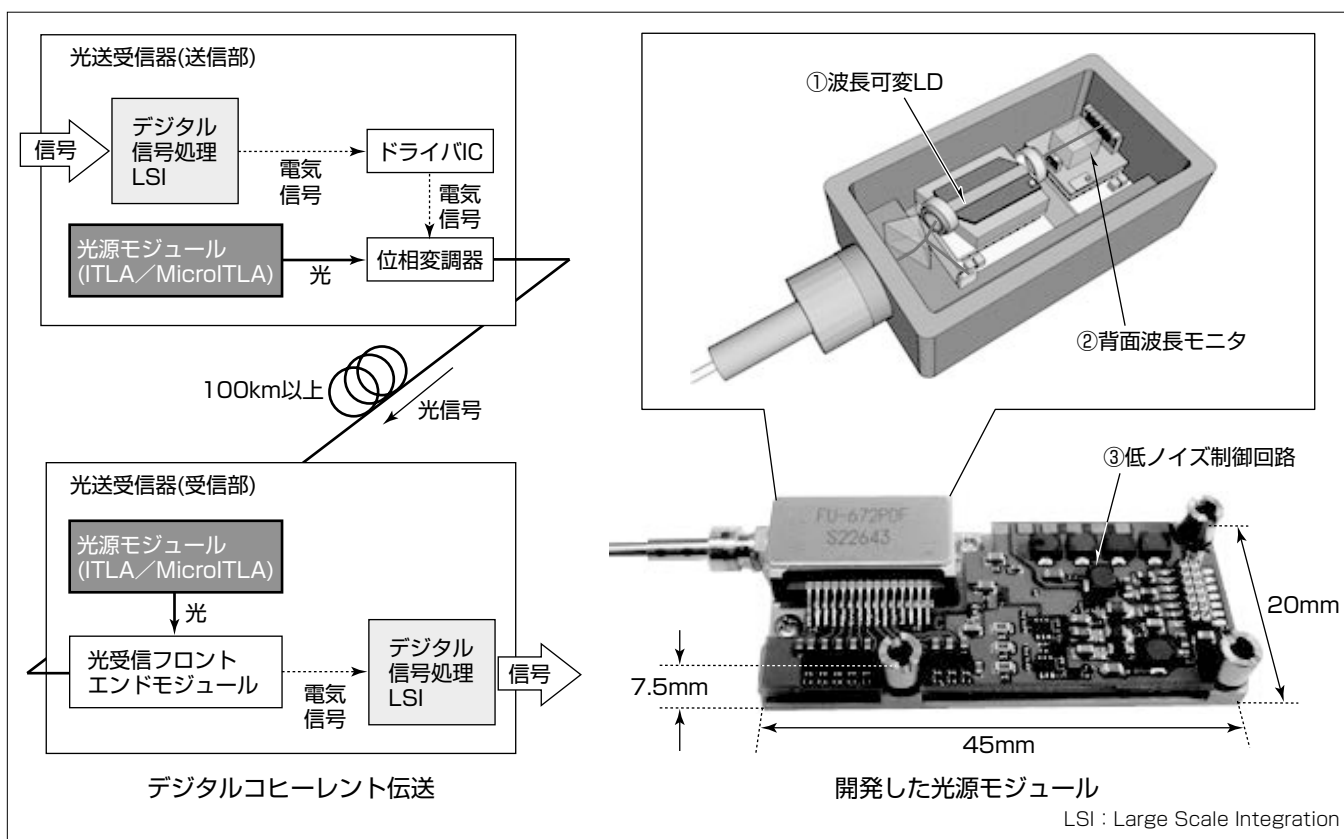
## 要 旨

データ通信量の急激な増大に対応するため、長距離光通信用に、デジタル信号処理技術を駆使した100Gbpsデジタルコヒーレント伝送方式が普及している。100Gbpsデジタルコヒーレント伝送方式では、光送受信器における送信部の光源及び受信部の局発光源として、出射光の波長を可変できる波長可変レーザが用いられ、OIF(Optical Internet-working Forum)でITLA(Integrable Tunable Laser Assembly)としてそのインタフェースが規格化されている。今回、第2世代の光送受信器に対応するために制定された、ITLAよりも一回り小さなMicroITLA規格に準拠する光源モジュールを開発した。光源モジュールは高い光出力や光周波数安定性、低ノイズが要求されるため、任意波長の光

を出射する波長可変LD(Laser Diode)とそれを内蔵するパッケージに加え、出射光波長をモニタする機能や制御回路を集積する。今回の光源モジュール実現の鍵となる3つの技術、

- (1) 低消費電力と高光出力を両立させた波長可変LD
- (2) 高精度・低光損失な背面波長モニタ
- (3) 低ノイズな制御回路

を開発し、外形サイズ45×20×7.5(mm)と十分に小さなサイズを達成したことに加え、光出力14.3dBm、消費電力3.6W以下、出射光線幅320kHz以下、光周波数安定度±0.6GHz以下と、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送に必要な特性を得た。



## デジタルコヒーレント伝送と開発した光源モジュール

長距離光通信用に普及している100Gbpsデジタルコヒーレント伝送方式では、左図にその構成を示すように、送信部の光源及び受信部の局発光源として出射波長を可変できる波長可変レーザが用いられる。右図が今回開発した光源モジュールであり、インタフェースを定めているMicroITLA規格に準拠する小型化を実現しつつ、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送に必要な諸特性を満足することを実証した。

### 1. ま え が き

100Gbpsデジタルコヒーレントシステム<sup>(1)</sup>では、直交する2つの偏波の光に対して4つの位相に信号を載せることでシンボル速度の4倍の大容量通信を実現する。図1にシステム構成の模式図を示す。送信側では光源モジュールの出射光を位相変調器で変調する。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、局発光源として内蔵された光源モジュールから出射した同波長の光とを合成して電気信号に変換する。この電気信号はデジタル信号処理LSIで種々の処理が施され、送信側で載せられた信号が復元される。送信部の光源及び受信部の局発光源として出射波長を可変できる波長可変レーザが用いられ、OIFでITLA<sup>(2)</sup>としてそのインタフェースが規格化されている。

本稿では、第2世代の光送受信器に向けて制定された、ITLAよりも一回り小さなMicroITLA<sup>(3)</sup>規格に準拠する光源モジュールの開発について述べる。

### 2. 光源モジュールの構造

開発した100Gbpsデジタルコヒーレント伝送用光源モジュールを図2に示す。光出力用のファイバを除いた外形サイズは45×20×7.5(mm)と、MicroITLA規格に準拠する。図3にパッケージ内部の構造を示す。光を出射する波

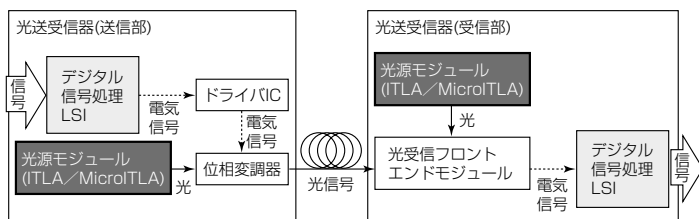


図1. 100Gbpsデジタルコヒーレント伝送システムの構成

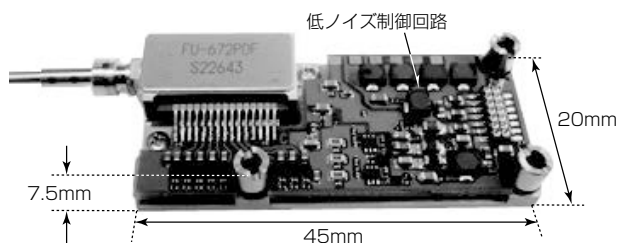


図2. デジタルコヒーレント伝送用光源モジュール

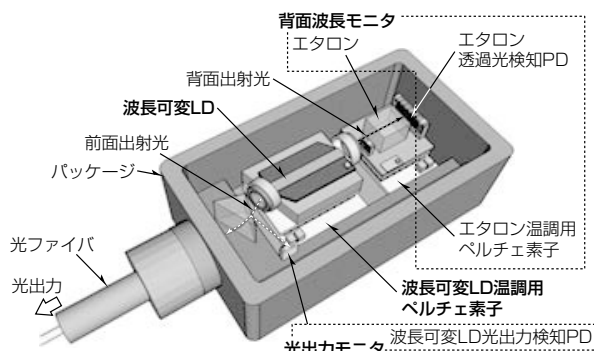


図3. デジタルコヒーレント伝送用光源モジュールの内部

長可変LD、波長可変LDの温度を調整するペルチェ素子、波長可変LDの光出力を検知するための光出力モニタ、出射波長を検知する背面波長モニタで構成される。波長可変方式としては、安定性、制御性に優れるとされる、DFB (Distributed Feedback) LDの温度調整方式を採用する。波長可変LDの光源モジュール出力側(前面)の出射光はレンズを介して出力用の光ファイバに結合され、波長可変LDの反対側(背面)の出射光は背面波長モニタに入射する。光出力モニタと背面波長モニタの検知情報を基に制御回路で波長可変LDの駆動電流と温度をフィードバック制御することで、光出力と波長を安定化できる。

一般的に100Gbpsデジタルコヒーレント伝送に必要とされる、光出力14.0dBm以上、消費電力5.0W以下、出射光線幅500kHz以下、光周波数安定度±2.5GHz以下の諸特性を実現するためには、主に次の3つの課題がある。

#### (1) 波長可変LDにおける低消費電力と高光出力の両立

DFB LDの出射光波長の温度依存性は0.1nm/°Cと小さいため、光通信で用いられるC帯(1,530~1,565nm)ないしL帯(1,565~1,625nm)全域をカバーするためには、DFB LDの温調範囲を広く設定するとともに、異なる波長の光を出射する複数のDFB LDを集積する必要がある。しかし、温調範囲の拡大はペルチェ素子の消費電力増大を、DFB LD数の増加は各LD出射光の合波部での損失増大を招くため、これらを抑える必要がある。

#### (2) 高精度な背面波長モニタの実現

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 (Photodiode) で構成される。エタロンの透過率は波長に依存するため、出射光波長の変動をPD受光パワーの変動として検知できる。この開発では、エネルギー利用効率を高めるため、通常であれば活用されずに迷光となる波長可変LDの背面出射光を用いた波長モニタ構造を開発した。しかし複数のDFB LDを集積した波長可変LDでは、各DFB LDで波長モニタ特性がばらつき、高精度な波長モニタの実現が困難である。

#### (3) 制御回路のノイズ低減

光源モジュールでは多くの制御を行っているが、各制御信号は相互に干渉してノイズとなる。このノイズで波長可変LDの駆動電流が揺らぎ、出射光線幅が増大する。線幅の増大は変調光の信号品質の低下をもたらすため、低ノイズ制御回路が必要である。

3章では、各課題を解決するためにこのモジュールに適用されている技術について述べる。

## 3. 光源モジュールの技術

### 3.1 波長可変LD

開発した波長可変LDの構造模式図を図4に示す<sup>(4)</sup>。InP (インジウムリン)基板上に集積された16本のDFB LDアレ

一、S字導波路、MMI(Multi Mode Interference)光クラ、SOA(Semiconductor Optical Amplifier)、背面波長モニタ用の不等間隔導波路からなり、チップサイズは4.8×0.5×0.1(mm)である。DFB LDからの出射光はS字導波路と16×1 MMIを経てSOAで増幅される。波長可変LD温度の調整幅30℃以下で、L帯における50GHz間隔の動作周波数(ITU-Tグリッド<sup>(5)</sup>)全88チャンネルをカバーできるよう、各DFB LDの回折格子ピッチを設計した。また出射光線幅500kHz以下と高い光出力を両立させるため、DFB LDの共振器長を1.2mmに長尺化するとともに、無反射コーティング付き端面窓構造を採用してSOAの導波路形状を設計した。

図5に前面出射光を結合した光ファイバ出力のSOA電流依存性を示す。ここで波長可変LDの温度は25℃と55℃、全16本のDFB LDの注入電流は180mA一定で測定した。どちらの条件でも15dBm以上の光ファイバ出力が得られた。また実使用条件の光ファイバ出力14dBmを満足するSOA電流は、25℃で190mA以下、55℃で280mA以下であった。

### 3.2 背面波長モニタ

図6に、従来技術である前面波長モニタと開発した背面波長モニタの構造を示す。従来構造では波長可変LDの前面出射光を分岐して用いるために過剰な分岐損が生じるが、

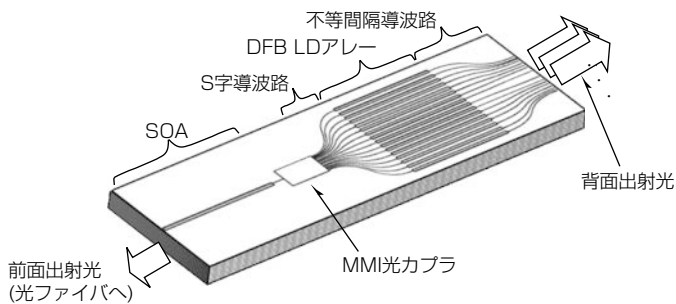


図4. 波長可変LDの構造模式図

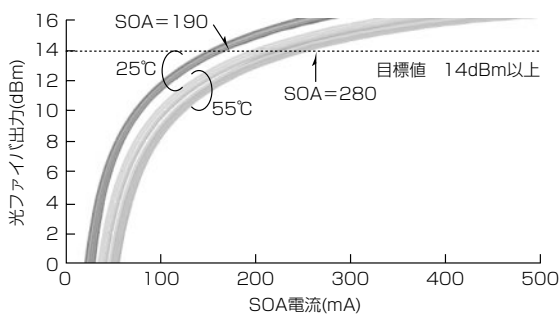


図5. 光ファイバ出力のSOA電流依存性

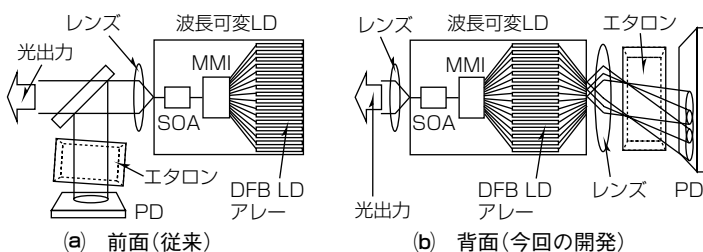


図6. 波長モニタ構造

背面波長モニタではこの光損失を抑制できる。一方背面波長モニタは駆動するLDによって波長モニタ特性がばらつくという課題がある。これは、図6(b)のように各DFB LDの背面光の出射位置が異なるため、レンズ透過後の光線伝搬角度が異なり、エタロンへの入射角度がばらつくことに起因する。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ようにDFB LDごとの光線伝搬角度を設計した。光線伝搬角度はレンズ中心と出射点の位置ずれ量に依存するため、実際の光線角度の調整はDFB LDの出射点ピッチを不等間隔に配置することで実現する<sup>(6)</sup>。さらに、エタロンの実装角度ずれによる波長モニタ特性ばらつきを緩和するため、エタロン透過率の正負両方のスロープを用いる<sup>(7)</sup>。図7に、エタロン実装ずれ0.05°を想定した時の等間隔及び不等間隔DFB LD出射点の波長モニタ特性を計算した結果を示す。出射点を不等間隔にすることで、ITU-TグリッドでLDごとの波長モニタ特性ばらつきを目標±2.5GHz以下の±2.2GHzに抑えることができ、波長モニタが可能となる。試作した光源モジュールの波長モニタ特性を図8に示す。各波長モニタ特性のピーク周波数がスロープの正、負を用いる場合それぞれでそろっており、ITU-TグリッドでLDごとの波長モニタ特性のばらつきは±1.2GHzと理論検討通りの結果を得た。

### 3.3 低ノイズ制御回路

出射光線幅は、外部から流入するノイズと基板内部で発生するノイズに悪影響を受ける。波長可変LD駆動回路の外部雑音耐力を向上させるため、オペアンプと電界効果トランジスタで構成されるアクティブフィルタを電流源回路

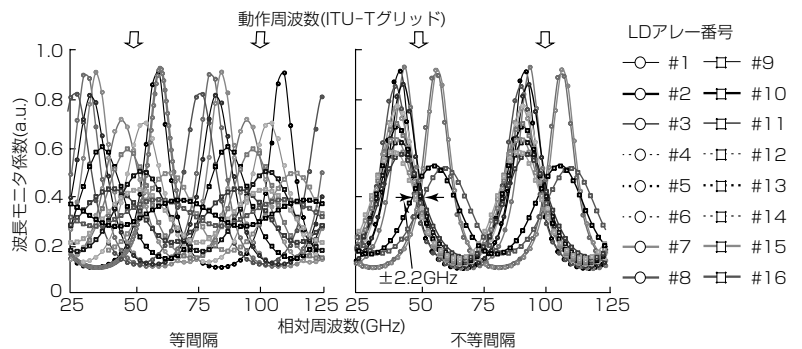


図7. 波長モニタ特性(計算結果)

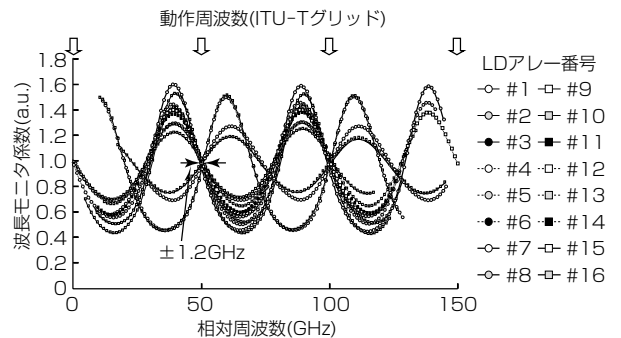


図8. 試作した光源モジュールの波長モニタ特性(測定結果)

に、インダクタとコンデンサで構成されるパッシブフィルタを電源回路に用いて適切な帯域制御を行い、ノイズを低減した。また、グラウンドの1点接続やノイズレベルの異なる配線パターンの空間的分離などによって基板内で発生するノイズ成分の回り込みを抑制し、低雑音環境を構築した。

4. 光源モジュールの特性

開発した100Gbpsデジタルコヒーレント伝送用光源モジュールの特性を評価した。図9に各波長チャンネルにおける光出力を、図10に消費電力を、図11に出射光線幅を、図12に光周波数安定度をそれぞれ示す。波長可変範囲はL帯全域の全88チャンネルである。光出力は全チャンネルで14.3dBm以上、消費電力は最悪条件であるケース温度75℃で3.6W以下、出射光線幅は、測定チャンネルが各LDで線幅が最悪となる条件に限られているが320kHz以下、光周波

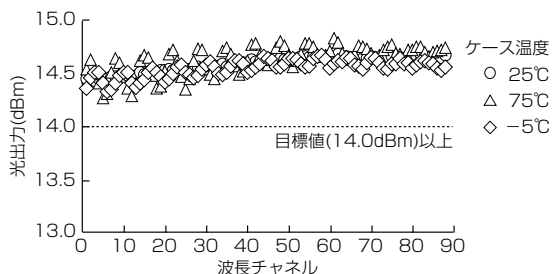


図9. 試作した光源モジュールの光出力

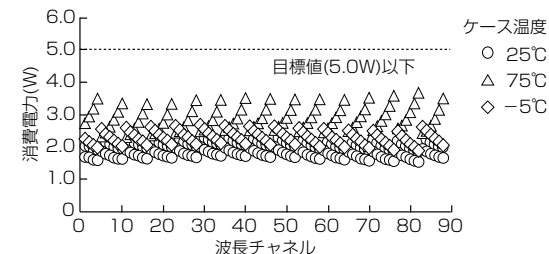


図10. 試作した光源モジュールの消費電力

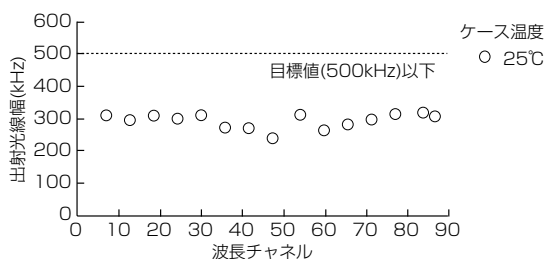


図11. 試作した光源モジュールの出射光線幅

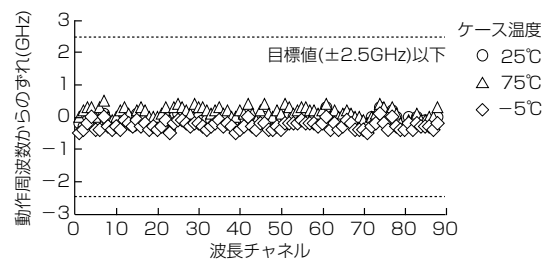


図12. 試作した光源モジュールの光周波数安定度

数安定度はITU-Tで規定される動作グリッド周波数からのずれが±0.6GHz以下と、いずれも目標値に対して十分なマージンを持って満足する結果が得られた。

5. むすび

100Gbpsデジタルコヒーレント伝送用光源モジュールを開発した。小型、低消費電力、高出力、低ノイズを実現する鍵として3つの技術について述べた。波長可変LDでは、16本のDFB LDアレーを用いて温度調整幅を30℃以下に低減し、SOAの導波路形状を最適化することで、高い光出力と低消費電力を両立させた。背面波長モニタでは、DFB LDアレーの出射点ピッチを不等間隔に配置することで波長モニタ特性ばらつきを抑え、通常の構造では不可能であった背面出射光を用いた高精度な波長モニタを実現した。これによって一般的な前面出射光を用いた波長モニタで課題であった光の分岐による過剰損失を抑えた。制御回路では、ノイズを除去するフィルタの最適化や回路パターン上での異なる信号線路の空間的分離によって低ノイズ環境を実現した。これらの技術を確立し、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送に必要な特性を満足した。今回の開発品がキーデバイスとなって、100Gbpsデジタルコヒーレント伝送方式の小型、低消費電力化が実現し、ますますの普及が進むことを期待する。

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) OIF-ITLA-MSA-01.2 (2008)  
<http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-ITLA-MSA-01.2.pdf>
- (3) OIF-MicroITLA-01.0 (2011)  
<http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-microITLA-01.0.pdf>
- (4) Horiguchi, Y., et al.: Low Power Consumption L-band Tunable Laser Diode With Backside Waveguides, The 24th ISLC, TC2 (2014)
- (5) ITU-T G. 694. 1: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid (2012)  
<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>
- (6) Mochizuki, K., et al.: A Wavelength Monitor using Unequally Spaced Back-emitting Light for Tunable LD Array, The 17th OECC, 6D3-3 (2012)
- (7) Mochizuki, K., et al.: Highly Accurate Rear-side Wavelength Monitor for Tunable 16 LD Array with Unequally Spaced Waveguides, The 24th ISLC, TC3 (2014)