

光デジタルコヒーレント通信用小型ITLAの開発

Development of a MicroITLA for Optical Digital Coherent Communication

山本 篤司*¹
Atsushi Yamamoto

岡庭 武男*¹
Takeo Okaniwa

屋富 祖良貴*¹
Yoshitaka Yafuso

西田 昌義*²
Masayoshi Nishita

〈概要〉

従来の波長可変レーザアセンブリ (ITLA: Integrable Tunable Laser Assembly) と同じ標準規格¹⁾の機能を維持したまま、高出力化・狭線幅化の性能向上を図るとともに、小型・低消費電力を特徴とする小型ITLA (MicroITLA) の標準規格²⁾に準拠した、小型パッケージモジュールの開発、制御回路技術の開発により、従来ITLAの約1/3のサイズ (37.5×20.0 mm²) を実現した。さらに、400 Gb/s以上のシステムで要求される、スペクトル線幅300 kHz以下、グリッドレス波長出力機能 (最小設定分解能: 0.1 GHz) を実現した。

1. はじめに

近年、スマートフォン等のモバイル機器の普及により、トラフィックが急増している。これに対応するために、基幹系の伝送システムでは、40 Gb/s、100 Gb/sのシステムが導入されている。さらなる伝送容量の拡大を実現するために、フィールドに敷設されている光ファイバを用いた400 Gb/s、1 Tb/sシステムの伝送実験に関する論文が発表されている^{3),4)}。400 Gb/sを実現する方式については、16 QAM変調+2サブキャリア構成が有力である。このような多値変調フォーマットを使用した長距離・大容量伝送に対応するために、DSPによるNyquist Filter技術や非線形補償技術が発表されている⁵⁾。

多値変調フォーマットを使用した400 Gb/s伝送を実現する上で、波長可変レーザに求められる特性は、スペクトル線幅: 300 KHz以下⁶⁾、及び0.1 GHz間隔での波長可変機能と周波数精度: ±1.5 GHzである。また、システム側からの要求により、小型・低消費電力を特徴とするMicroITLAが求められている。

2. MicroITLAの構成

図1にMicroITLAの模式図を示す。従来型ITLAのサイズが74.0×30.5 mm²に対して、開発したMicroITLAのサイズは37.5×20.0 mm²であり、面積比で1/3以下である。MicroITLAは大きく分けて、レーザモジュールと制御回路から構成される。

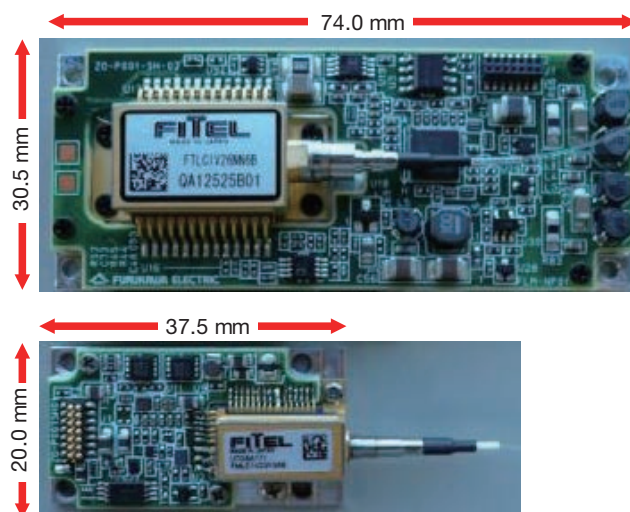


図1 従来型ITLA (上図) と Micro ITLA (下図)
Standard ITLA (Upper) and MicroITLA (Lower).

2.1 レーザモジュール

レーザモジュールに内蔵されているレーザチップは、異なる発振波長のDFB (Distributed Feedback) レーザアレイと、DFBレーザアレイからの出力を結合するMMI (Multimode Interference) カプラ、MMIカプラ内での損失を補償する半導体増幅器: SOA (Semiconductor Optical Amplifier) を集積した構造となっている。DFBレーザのアレイ数は12素子であり、設定したい波長に応じて出力するDFBレーザを選択し、レーザチップを温調することにより、フルCバンドまたはフルLバンドの波長を出力する。更にレーザモジュール内には、上記レーザチップに加え、レーザの経時変化による波長ドリフトを抑えるための波長ロッカーが搭載されている。波長ロッカーは、2つの光ダイオード (PD)、エタロンフィルタから構成され、一方のPDにより光出力をモニタし、他方のPDでエタロンを透

*¹ 研究開発本部 コア技術融合研究所

*² 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

過した光出力をモニタすることにより、光出力と波長のフィードバック制御をおこなう。また、本モジュールには2台のTEC (Thermo Electric Cooler) が搭載されレーザチップ温度及びエタロン温度の独立制御ができる⁷⁾。

2.2 制御回路

図2に制御回路ブロックを示す。マイクロコントローラとDFB, SOA, TEC1, TEC2の各制御回路から構成される。マイクロコントローラでは、ホストモジュールからのコマンド情報に基づいて、適切な目標値・補正パラメータを算出して、各制御回路の駆動条件を決定する。DFB制御回路では、設定波長情報に基づいて、適切なDFBレーザを選択した上で、電流を一定値に制御する。SOA制御回路では、PDモニタパワーに基づいて、光出力パワーを一定値に制御する。TEC1制御回路では、エタロン透過PDモニタパワーに基づいて、出力波長を一定値に制御する。TEC2制御回路では、エタロン温度を一定値に制御することによって、波長弁別特性の基準位置を制御する。

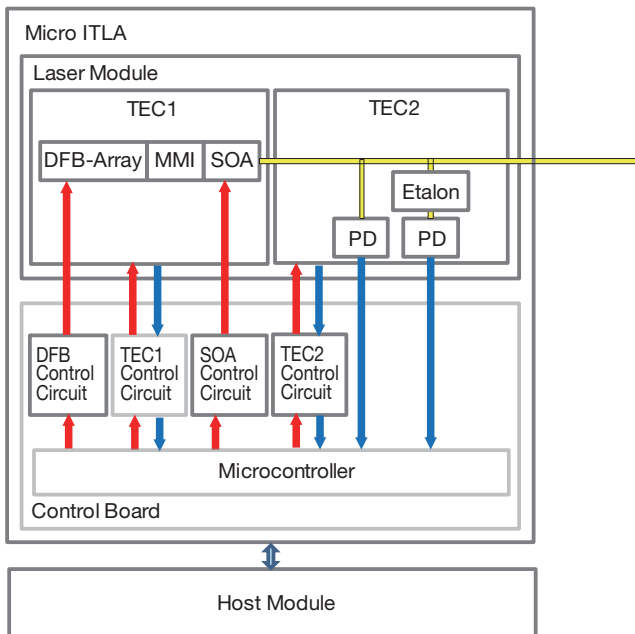


図2 制御回路ブロック
Control circuit block.

従来型ITLAの機能を維持しつつMicroITLAサイズに収めるために、制御処理の簡略化や電気フィルタ構成の最適化、チップ部品の定数最適化、ソフトウェアによる制御回路機能代替等を行った。設計変更による影響については、シミュレーションと評価実験を併用して、最終的な制御回路構成を決定した。

3. 特性

表1にMicroITLAの標準仕様と開発した100 Gb/s及び400 Gb/s用の波長可変レーザMicroITLAの特性一覧を示す。

表1 古河MicroITLA仕様
Specification of the Furukawa MicroITLA.

項目	MicroITLA標準仕様	古河MicroITLA仕様
光出力	13.5 dBm	16 dBm
スペクトル線幅	<500 kHz	<300 kHz
サイドモード抑圧比 (SMSR)	>40 dB	>40 dB
平均相対強度雑音 (RIN)	< -135 dB/Hz	< -140 dB/Hz
周波数精度	< ± 2.5 GHz	< ± 1.5 GHz
グリッド	50 GHz	0.1 GHz (最小値)
消費電力	5.0 W	4.5 W
サイズ	45 × 20 × 7.5 mm ³	37.5 × 20 × 7.5 mm ³

3.1 スペクトル線幅/平均相対強度雑音 (RIN: Relative Intensity Noise)

デジタルコヒーレント通信では、光の位相と振幅に情報をのせるため、周波数の広がり幅(スペクトル線幅)が狭く、平均相対強度雑音の小さな光源が求められる。図3に自己遅延ヘテロダイン法で測定したスペクトル線幅を示す。全12 ch分のDFBアレイとそれぞれLD温度が最大・最小になる条件の全24通りの測定結果である。最も線幅が広い条件においても250 KHz程度である。図4に平均相対強度雑音の測定結果を示す。1 KHz ~ 20 GHz の範囲において、-140 dB/Hz以下である。

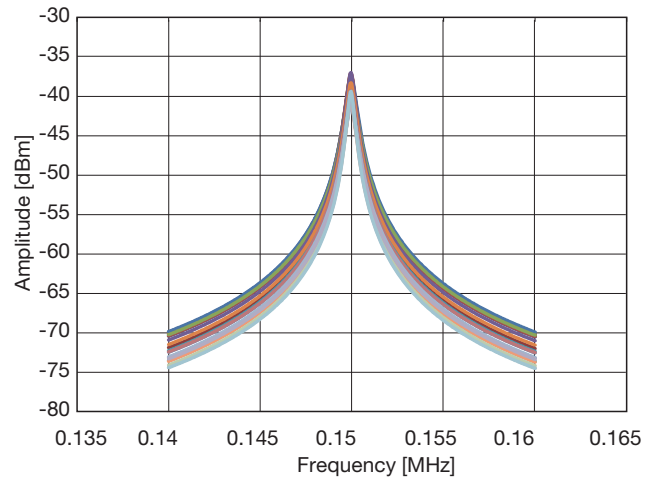


図3 スペクトル線幅
Spectrum linewidth.

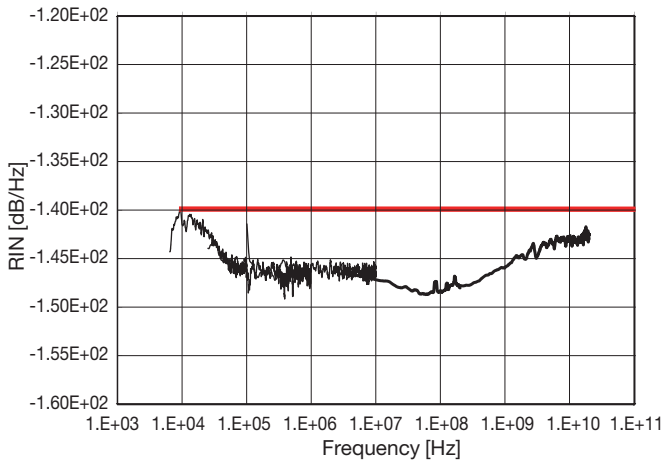


図4 平均相対強度雑音
Relative intensity noise.

3.2 周波数精度

MicroITLAの標準仕様には、周波数トランジェントマスクが規定されており、特に光立ち上げの過程で詳細な制御状態管理が必要になる。このため、マイクロコントローラで各制御回路情報の同期を取りながら補正パラメータを微調整することによって、周波数精度の向上を実現している。

また、現在の光通信システムでは、Cバンドの波長を50 GHz間隔に分けて、トラフィック毎にそれぞれ50 GHzの帯域に割り当てているため、データ量と伝送距離に関わらず、50 GHzの帯域を占有する。400 Gb/s以上のシステムでは、帯域の割り当てをフレキシブルに設定可能にして、長距離伝送ではBPSKやQPSKの変調方式で広い帯域を割り当て、短距離で大容量のデータを伝送したい場合には16 QAMや64 QAMの変調方式で周波数使用効率を向上させる等の方式が導入される。MicroITLAとしては、フレキシブルな帯域設定に対応するために、0.1 GHz間隔の出力波長設定が求められている。開発した周波数精度補償アルゴリズムによる周波数精度の評価結果を図5に示す。横軸を設定周波数、縦軸を周波数偏差とした。0.1 GHz間隔の出力波長において周波数精度: ± 0.3 GHzである。さらに、全周波数範囲・全出力パワー範囲において、周波数精度: ± 1.5 GHz以内を実現した。

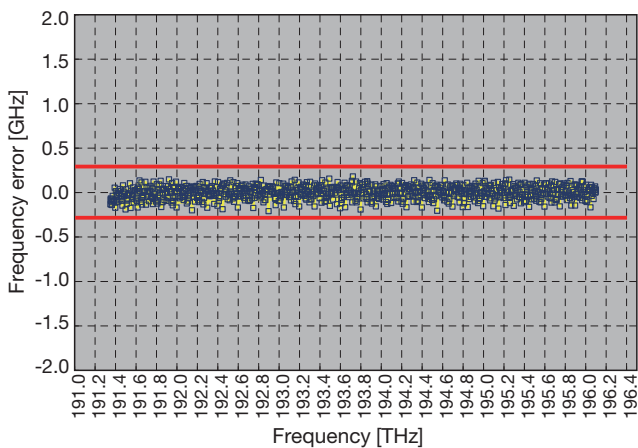


図5 周波数精度
Frequency error.

3.3 電源ノイズ耐性

MicroITLA標準仕様には、電源ノイズの仕様として最大1%と規定されている。電気的な変動成分がレーザの出力光に重畳すると、変調信号の位相揺らぎとして現れるためにBit Error Rate (BER)が劣化する。開発した制御回路では、小型化と低ノイズを両立するために、フィルタ構成と部品実装位置及び配線パターンを最適化した。

図6に電源ノイズ耐性の評価結果を示す。電源ノイズとして、①3.3 V $\pm 1\%$ @500 KHz, ②3.3 V $\pm 5\%$ @5 MHz, ③1.8 V $\pm 1\%$ @500 KHz, ④1.8 V $\pm 5\%$ @5 MHzを与えて、位相雑音の標準的な評価指標であるFrequency Noise PSDにより評価した結果、印可した電源ノイズの周波数成分のピークが検知出来ないレベルまで抑制された。

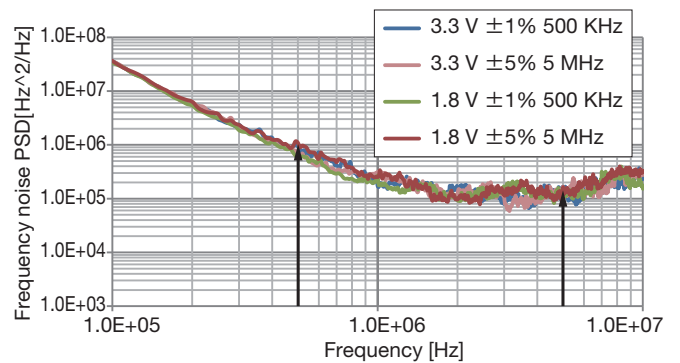


図6 電源ノイズ印可時の周波数雑音
Frequency noise PSD with voltage noise of power supply.

3.4 BER計算

QPSKや16 QAMの変調方式を使った400 Gb/s伝送では、300 KHz以下のスペクトル線幅が求められている。しかしながら、波長可変レーザを制御回路に搭載したMicroITLA形態では、波長可変レーザの出力に電気的なノイズが重畳するため、一般的な位相雑音特性のように1/f雑音成分と白色雑音成分では表現できない。そのため、スペクトル線幅が300 KHzであっても、システムとして運用した際に伝送エラーを誘発する可能性がある。そこでOffline処理によりQPSK信号をコヒーレント受信した際のBERを算出⁸⁾して、MicroITLAとしての性能評価を行った。図7に横軸をEsNo (Symbol to noise ratio) 縦軸をSER (Symbol Error Rate)とする算出結果を示す。EsNoはノイズ対シンボル比を表しており、OSNRの劣化を模擬したSERを評価する上で標準的に使用される指標である。SERはSymbol誤り率を表しており、BERと同等の評価指標として扱える。理論値からの劣化量はなく、伝送用の光源としての性能を満足している。

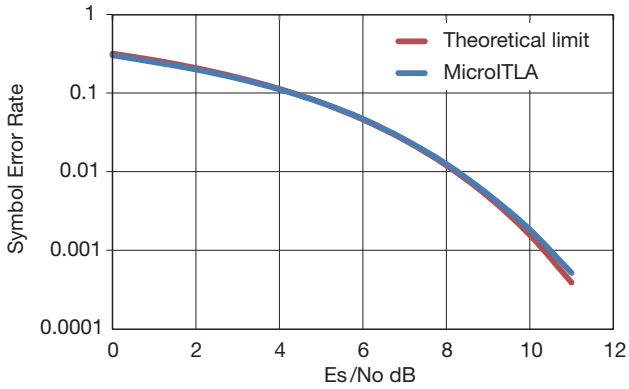


図7 MicroITLAのQPSK伝送でのBERシミュレーション
Offline symbol error rate simulation of MicroITLA with QPSK transmission.

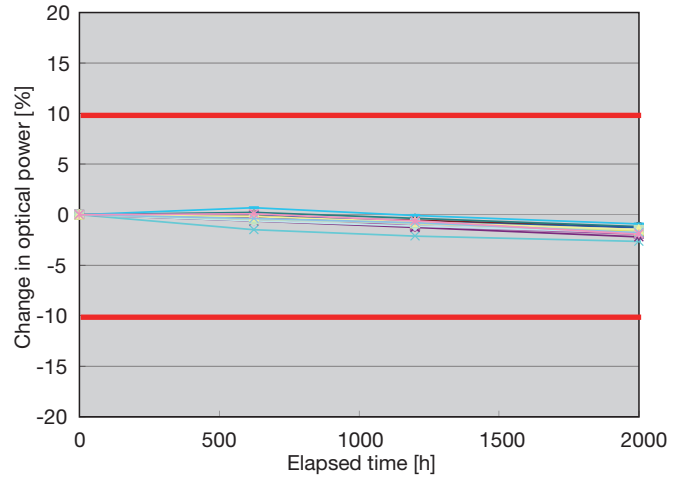


図8 高温動作での光出力変化
Power change in high temperature operation test.

3.5 信頼性

表2に光通信業界において標準的に採用されている信頼性評価規格である Telcordia GR-468-CORE⁹⁾の項目一覧を示す。評価結果の代表例として、図8、図9に高温動作での経過時間による、光出力変化と波長変化を示す。75℃・2000時間経過後に、Fiber Output Power: ±10%, と Wavelength: ±10 pmの規格内であった。次に図10、図11にESD試験による光出力変化と波長変化の結果を示す。6000 V印可後に、Fiber Output Power: ±10%, と Wavelength: ±10 pmの規格内であった。その他についても、すべて規格内であることを確認した。

表2 Telcordia GR-468-CORE信頼性評価規格
Reliability test of telcordia GR-468-CORE⁹⁾.

Test	Test condition	Criteria
Mechanical shock	500 G, 1 msec, 5 times/axis	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
Vibration	20 G, 20-2000 Hz, 4 min/cycles, 4 cycles/axis	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
Thermal shock	$\Delta T=100 \text{ degC}$, 15 cycles	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
Fiber Integrity - Twist	0.5 kgf, 10 cycles	$\Delta Pf < \pm 10\%$
Fiber Integrity - Side Pull	0.25 kgf, 90°, 5 sec	$\Delta Pf < \pm 10\%$
Fiber Integrity - Cable Retention	0.5 kgf, 1 min	$\Delta Pf < \pm 10\%$
High Temperature Operation	$Pf=40 \text{ mW}$, $Tc=75 \text{ degC}$, 2000 H	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
High Temperature Strage	$Ta=85 \text{ degC}$, 2000 H	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
Temperature Cycling	$Ta= -40/+85 \text{ degC}$, 500 cycles	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
Damp Heat	$Ta=85 \text{ degC}$, 85%RH, 1000 H	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
ESD	$C=100 \text{ pF}$, 1.5 kohm, HBM, 0 ~ ± 6 kV	$\Delta Pf < \pm 10\%$ $\Delta \lambda < \pm 10 \text{ pm}$
Internal Moisture	-	Water vapor content <5,000 ppm

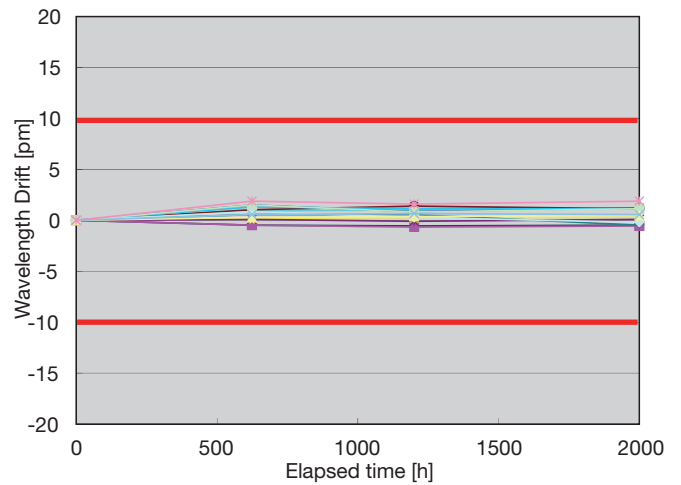


図9 高温動作での波長変化
Wavelength change in high temperature operation test.

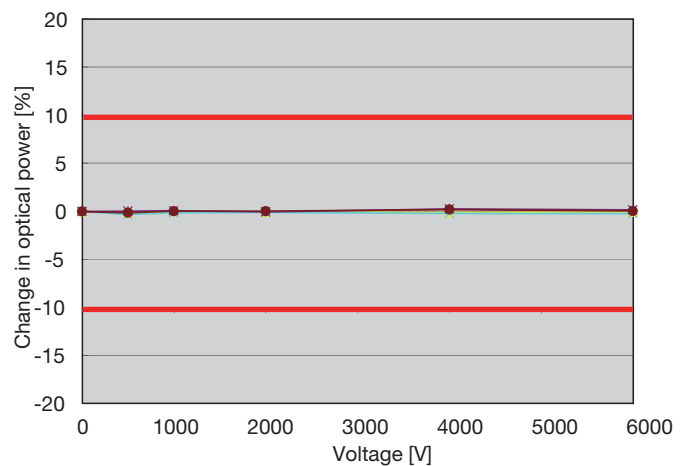


図10 ESD試験での光出力変化
Power change in ESD test.

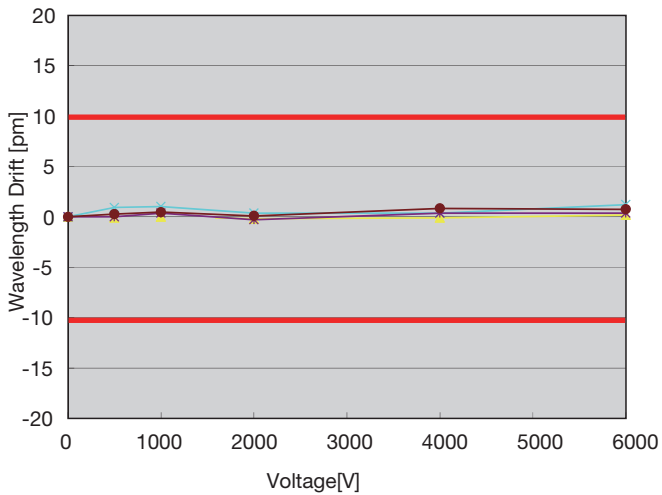


図 11 ESD 試験での波長変化
Wavelength change in ESD test.

参考文献

- 1) OIF-ITLA-MSA-01.2 - Integrable Tunable Laser Assembly MSA June 26, 2008
- 2) OIF-ITLA-MSA-01.0 - Micro Integrable Tunable Laser Assembly Implementation Agreement September 20, 2011
- 3) Y. R Zhou, et al.: Proc. Optical Fiber Communications Conf., OFC2014, Th5A.9 (2014)
- 4) A. Pagano, et al.: Proc. Optical Fiber Communications Conf., OFC2014, Tu2B.4 (2014)
- 5) NEC/NTT/Fujitsu Press Release 4th-Sep 2014
- 6) M. Seimetz, Proc. Optical Fiber Communications Conf., OFC2008, OTuM2 (2008)
- 7) 堀川他 古河電工時報第123号(平成21年2月)
- 8) K. Kikuchi, "Characterization of semiconductor-laser phase noise and estimation of bit-error rate performance with low-speed offline digital coherent receivers", 27 February 2012 / Vol. 20, No. 5 / OPTICS EXPRESS 5301
- 9) Telcordia: Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment, GR-468-CORE (1998)

4. おわりに

400 Gb/s用途に適した小型・低消費電力のMicroITLAを開発した。スペクトル線幅:300 KHz以下, グリッドレス波長出力機能(最小分解能:0.1 GHz)間隔を実現し, 信頼性評価においても光通信業界標準のTelcordia GR-468-CORE規格を満足した。今後はさらなる高出力化・低消費電力化・狭線幅化を目指す。