

# データセンター間デジタルコヒーレント通信用 Nano-ITLAの開発

## The Development of a Nano-ITLA for Digital Coherent Datacenter Interconnects

西田昌義 <sup>*1</sup> Masayoshi Nishita	松原礼高 <sup>*1</sup> Noritaka Matsubara	長谷川淳一 <sup>*2</sup> Junichi Hasegawa	山岡一樹 <sup>*3</sup> Kazuki Yamaoka	
有賀麻衣子 <sup>*3</sup> Maiko Ariga	稲葉悠介 <sup>*1</sup> Yusuke Inaba	木村賢宜 <sup>*4</sup> Masayoshi Kimura	若葉昌布 <sup>*1</sup> Masaki Wakaba	吉田匡廣 <sup>*1</sup> Masahiro Yoshida
丸山一臣 <sup>*1</sup> Kazuomi Maruyama	鈴木理仁 <sup>*5</sup> Toshihito Suzuki	石井啓之 <sup>*1</sup> Hiroyuki Ishii	川北泰雅 <sup>*1</sup> Yasumasa Kawakita	

### 〈概要〉

データセンター間デジタルコヒーレント通信用の小型光トランシーバには、小型・低消費電力の波長可変光源が要求されている。我々は、DBR反射器とリング共振器型反射器を用いたヴァーニア型のモノリシック集積型波長可変レーザチップと、超高ΔPLC波長ロックを開発してレーザモジュールに搭載することにより、小型・低消費電力の要求を満たす制御回路付き超小型波長可変光源 Nano-ITLA を実現した。本 Nano-ITLA において、Cバンド全体で光出力 17 dBm、スペクトル線幅 100 kHz 以下、400 Gb/s のビットレートにおいて良好なコンスタレーション特性を確認した。

### 1. はじめに

スマートフォンなどのモバイルデバイスの普及やクラウドコンピューティング、動画配信、SNS などのサービスの広がりにより、通信トラフィックが急激に増加し続けている。そこで、更なる伝送容量の増強のため、デジタル信号処理を用いてコヒーレント検波を実現するデジタルコヒーレント通信方式を用いた、1 波長当たり 100 Gb/s の大容量伝送システムの基幹系の高距離通信網への導入が進んできた。デジタルコヒーレント通信方式は、光の位相情報を用いる方式であるため、光源には位相ノイズが小さいこと、すなわちスペクトル線幅が狭いことが要求される。

我々はこれまでにそのような要求を満たす、制御回路付き小型波長可変光源である Micro-ITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) を開発してきた<sup>1)</sup>。可変方式としては、波長安定性に優れる DFB (分布帰還型: Distributed Feedback) レーザアレイと温度による波長可変を組み合わせる方式を用いてきた。さらに、狭スペクトル線幅を得るため DR (Distributed Reflector) レーザアレイと AWG (Arrayed Waveguide Grating) カブラを

集積化した構成のレーザチップにより、線幅 100 kHz 以下を実現している<sup>2)~4)</sup>。

近年は距離の短いメトロ/アクセス領域やデータセンター間にもデジタルコヒーレント通信を導入しようという動きになっている。そこでは、小型の光トランシーバが高密度実装されており、したがって光源の更なる小型化・低消費電力化が要求されている。しかし、レーザアレイ型の波長可変レーザではそのような要求に応えることが方式上困難であった。

そこで今回、新たに設計した集積型の波長可変レーザチップと、超高 ΔPLC (石英系光波回路: Planar Lightwave Circuit) 技術を用いた波長ロックを用いて、小型レーザモジュールを開発した。制御回路についても小型化し、超小型かつ低消費電力の Nano-ITLA を実現したので報告する。

### 2. 設計

#### 2.1 波長可変レーザチップ

図 1 に、開発した集積レーザチップの構成の概念図を示す。レーザチップは、レーザ部は利得領域の前後に 2 つの異なるタイプの波長選択型反射器を備え、レーザ部の出力端にはさらにレーザ光を増幅して光出力を制御する SOA (半導体光増幅器) が集積されている。後側の反射器は、リング共振器と光を 2 分岐する MMI (多モード干渉導波路: Multi Mode Interference) カブラで構成されている。前側の反射器は DBR (分布ブラッグ反射器) 型の反射器である。それぞれの反射器の上には、マイ

\*1 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

\*2 研究開発本部 企画部

\*3 ファイテル製品事業部門

\*4 研究開発本部 コア技術融合研究所

\*5 古河ファイテルオプティカルデバイス株式会社

クロヒータが形成されており、局所加熱により波長選択反射器の波長スペクトルを制御することが可能となっている。

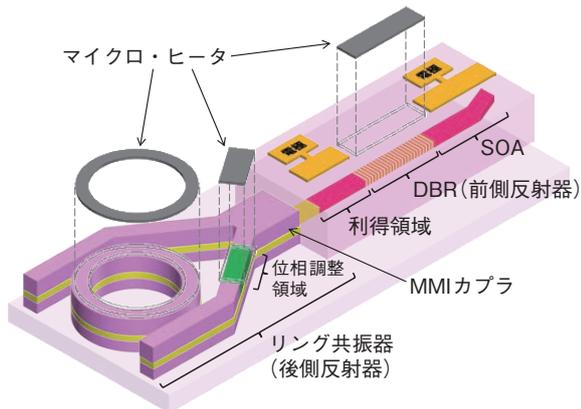


図1 波長可変レーザチップの構造  
Structure of the wavelength tunable laser chip.

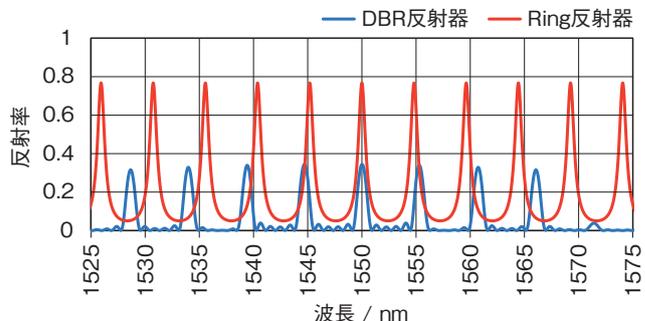
リング反射器は、リング導波路の周回長で定まる周期的な反射ピークを生じ、反射器自体が小型であるため、ヒータの低消費電力化に適する<sup>5)</sup>。一方、DBRの位相は周期的に変調されており、対応した周期的な反射ピークが生成される。設計の最適化により、反射率がほぼ等しい8本の反射ピークを持つ特性が得られている。ピーク本数が限られているため、波長可変範囲を限定できる。DBR反射器とリング反射器それぞれの反射ピークの周期は少し異なるように設計されているため、互いの反射ピークが重なる1つの波長を選択してレーザ発振させることができる。2つの周期的な反射ピークを持つ反射器を用いて、これまで報告がされてきた両側にDBR反射器を用いる波長可変レーザ<sup>6)~8)</sup>と同様に、ヴァーニア目盛りの原理により広帯域の波長可変動作が可能である。図2(a)にDBR反射器とリング反射器の反射スペクトルの計算例を、図2(b)にそれらの重なる反射スペクトルを示す。図2の例では重なる反射率が最も高い1550 nmでレーザ発振する。DBR反射器とリング反射器の反射スペクトルをそれぞれのマイクロヒータで波長方向にシフトさせることにより、重なる反射率が最も高い波長もシフトさせることができ、所望の波長でレーザ発振させることができる。このDBR/リングレーザチップは、InP基板上にモノリシックに集積されており、サイズは3 mm × 0.35 mmと小型である。また、DBR反射器とSOAの間に、光を分岐し後方に出力するための光回路が作りこまれている。この後方モニタポートの出力光を波長ロックに用いている。このような、DBR反射器とリング共振器型反射器を用いたヴァーニア型の世界初の集積型波長可変レーザチップの開発に成功した。

2.2 PLC波長ロックを集積したレーザモジュール

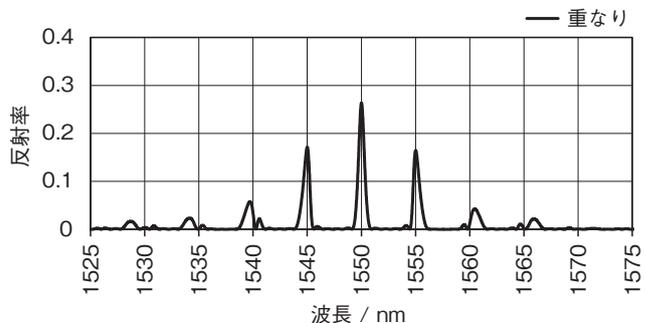
図3に、開発したレーザモジュールの構成を示す。波長可変レーザチップ、熱電クーラ、ビームスプリッタ、光アイソレータ、レンズ、PD (フォトダイオード) およびPLC波長ロックから構成される。モジュールサイズを小さくするために、波長ロックにはバルク光学部品であるエタロンフィルタを含む空間光学系の代わりに、我々がこれまで開発してきた超高ΔPLC<sup>9)</sup>を用いた。超高ΔPLCはSiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>コアから成り、比屈折率差(Δ)は約5%と大きいため、波長ロックのサイズは1.7 mm × 2.5 mm

と、小型化を実現した。レーザチップの後方モニタポートの出力光はPLCに入射され、PLCの出力光をPDで受光する。

図4はPLCの光回路図である。入力光は3つの経路に分割された後、1つのパワーモニタ出力と2つのリング共振器に導かれる。リング共振器の長さはそれぞれ2565.0 μm, 2565.3 μmであり、それらの共振周波数は20 GHzだけ異なっている。



(a) DBR反射器とリング反射器の反射スペクトルの計算例



(b) 重なる反射スペクトル

図2 反射スペクトルの計算例  
Calculation example of the reflection spectrum.

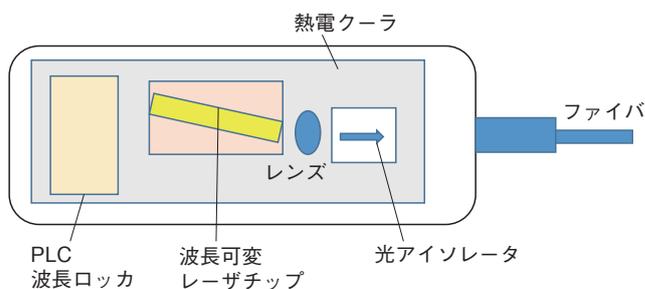


図3 レーザモジュールの構造  
Structure of the laser module.



図4 PLC光回路  
Optical circuit diagram of the PLC.

図5はPLCの出力特性である。光出力強度は入力光の光周波数に依存しているため、PDの受光強度からレーザの発振波長を特定することができる。2つの出力特性を選択して適切なリング共振器を波長ロックとして使うことにより、レーザ出力を任意の波長に高精度に制御することができる。

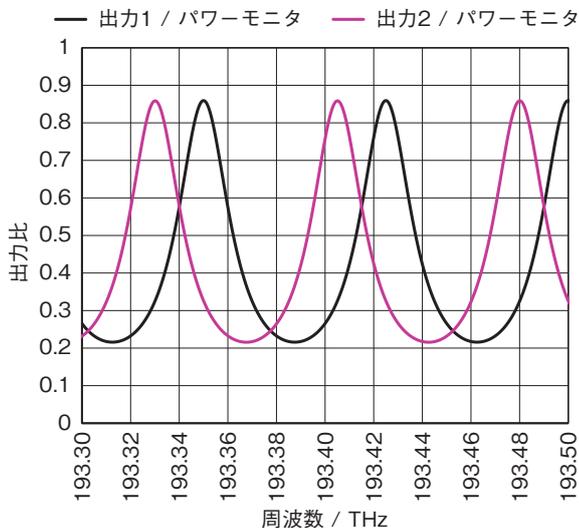


図5 PLC出力特性  
Output characteristics of the PLC.

### 2.3 Nano-ITLA

図6に、開発したNano-ITLAの外観写真を示す。Micro-ITLAでは制御対象ごとに回路やICを分けた構成としていたが、新たにこれらをひとまとめにした専用ICを用いることにより制御回路を小型化し、レーザモジュールの小型化と合わせて、Nano-ITLAを小型化した。Nano-ITLAのサイズは、25.1 mm × 15.6 mm × 6.4 mm で、Micro-ITLAの37.5 mm × 20.0 mm × 7.5 mm<sup>1)</sup>との体積比で半分以下と大幅な小型化を達成した。データセンター間の光通信に用いられる小型光トランシーバであるQSFP-DD<sup>10)</sup>やOSFP<sup>11)</sup>というフォームファクタに収納することができるサイズである。

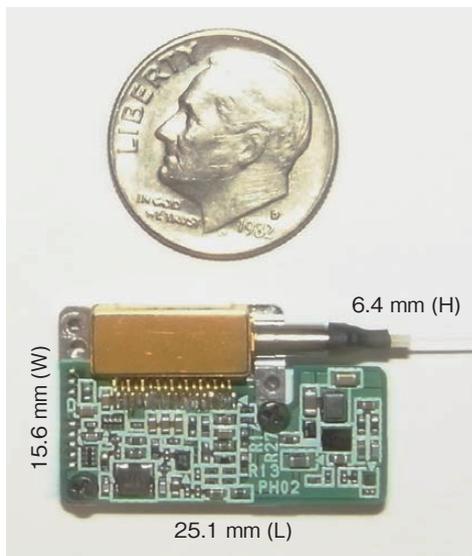


図6 Nano-ITLAの外観写真  
Picture of the developed Nano-ITLA.

### 3. 特性

作製したレーザモジュールの発振スペクトルの例を図7に示す。このデバイスで41 nmの波長可変範囲を達成した。SOA電流を調整することにより、ファイバ出力はCバンド全体で17 dBmを得た。Cバンドを完全に波長カバーするために必要なマイクロヒータの最大消費電力は220 mWである。図8にスペクトル線幅を示す。位相雑音スペクトルをコヒーレント受信機を使用して測定し、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。図8のように、測定したすべての波長チャンネルで、100 kHz未満の狭い線幅を得た。図9は、PLC波長ロックを使用して波長を安定させたときのレーザ出力波長の精度を示す。ケース温度が-5℃から80℃の範囲でレーザ出力波長の精度は±0.5 GHz以内であった。したがって、波長はPLC波長ロックを使用して十分に安定して制御できていることが確認された。

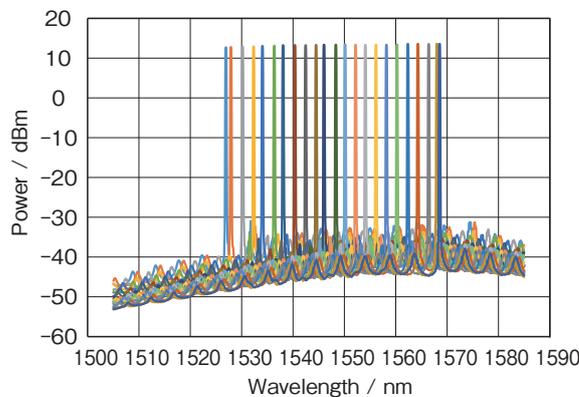


図7 発振スペクトル特性  
Oscillation spectrum characteristics.

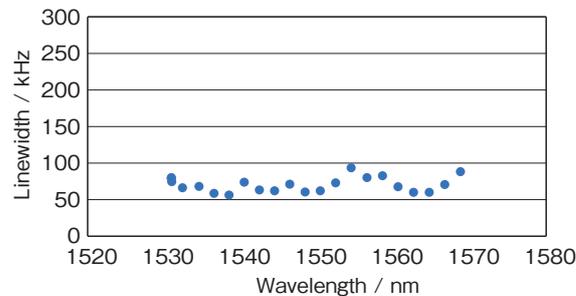


図8 スペクトル線幅特性  
Spectral linewidth characteristics.

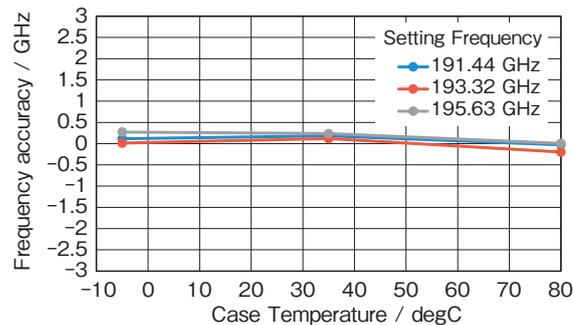


図9 波長ロック特性  
Wavelength locking characteristics.

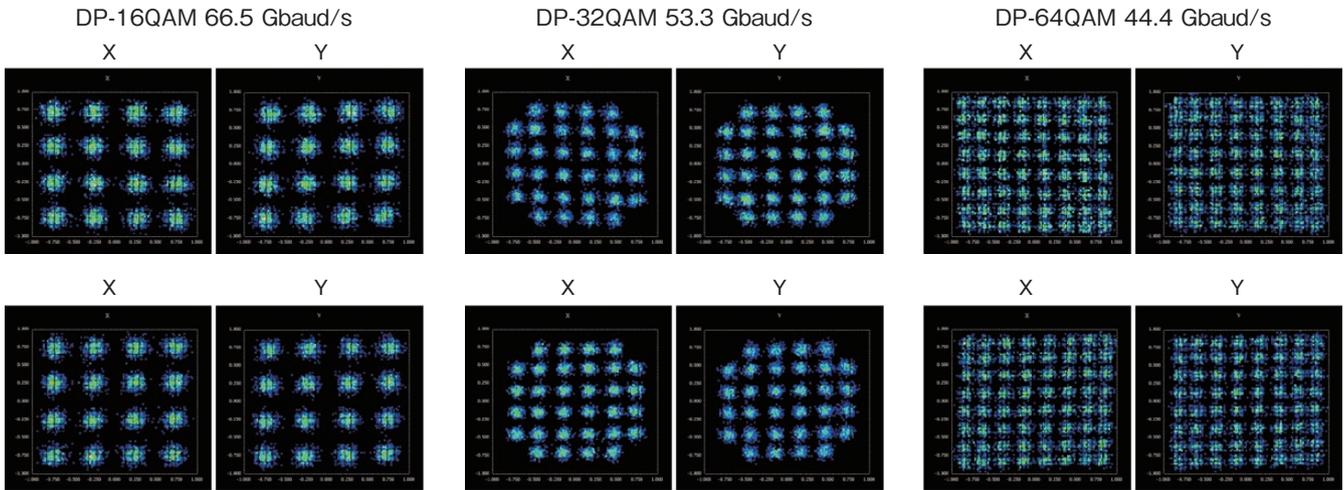


図10 コンスタレーション特性  
 上段：本Nano-ITLAが送信側，参照レーザが受信側 下段：参照レーザが送信側，本Nano-ITLAが受信側  
 Constellation characteristics.

図10に、開発したNano-ITLAの実際のデジタルコヒーレント通信での送受信試験を行った結果を示す。デジタルコヒーレント通信の試験系は、

- ・送信側：送信用レーザ+光変調器
- ・受信側：コヒーレント受信器+局部発振器用レーザ  
 +デジタルシグナルプロセッサ (DSP)

から構成される。400 Gb/sでの伝送を想定したDSPを使用し多値変調パターン(コンスタレーションと呼ばれる)の特性を評価した。3つの変調フォーマットとして16QAM(直角位相振幅変調: Quadrature Amplitude Modulation), 32QAM, および64QAMを用いて試験を行った。まず、開発したNano-ITLAを送信用レーザとして使用し、受信側の局部発振器用レーザとしてスペクトル線幅が50 kHz未満の外部共振器型レーザ(参照レーザ)を用いて試験を行った。結果を図10上段に示す。次に、参照レーザと本Nano-ITLAを入れ替え、参照レーザを送信用レーザとして使用し、本Nano-ITLAを局部発振器用レーザとして用いて評価を行った。結果を図10下段に示す。上段・下段とも、良好なコンスタレーションが3つの変調フォーマットのいずれにおいても検出され、参照レーザと本Nano-ITLAの間に違いはなかった。DBR/リング反射器からなるモノリシック集積型波長可変レーザチップが、従来の外部共振器型のレーザに匹敵する狭線幅特性を持つことを示しており、開発したNano-ITLAが400 Gb/sのビットレートで信号用および局部発振器用レーザの両方で使用できることが示された。

#### 4. おわりに

小型の波長可変レーザモジュールを用いた超小型Nano-ITLAを開発した。小型・低消費電力化のため、DBR反射器とリング共振器型反射器を用いたヴァーニア型のモノリシック集積型波長可変レーザチップと、超高ΔPLC波長ロックを開発して、レーザモジュールに搭載した。本Nano-ITLAはCバンド全体で光出力17 dBm, スペクトル線幅100 kHz以下であり、400 Gb/sのビットレートにおいて良好なコンスタレーション特性を確認した。したがって、本Nano-ITLAはデータセンター

間デジタルコヒーレント通信の小型光トランシーバ用の光源として有用である。

#### 参考文献

- 1) 山本他, 古河電工時報第134号(平成27年1月)。
- 2) T. Kimoto, G. Kobayashi, T. Kurobe, T. Mukaiyama, and S. Ralph, "Narrow linewidth tunable DFB laser array for PDM-16QAM transmission," presented at the OptoEletron. Commun. Conf./ Photon. Switching, Kyoto, Japan, 2013, Paper MK2-6.
- 3) G. Kobayashi, K. Kiyota, T. Kimoto, and T. Mukaiyama, "Narrow linewidth tunable light source integrated with distributed reflector laser array," presented at the Optical Fiber Conf., 2014, Tu2H.2.
- 4) T. Suzuki, K. Kiyota, S. Okuyama, Y. Inaba, M. Ariga, and T. Kurobe, "Tunable DFB Laser array combined by monolithically integrated AWG coupler," presented at the Int. Semicond. Laser Conf., Kobe, 2016, TuC3.
- 5) T. Segawa, S. Matsuo, T. Kakitsuka, T. Sato, Y. Kondo, and Ryo Takahashi, "Semiconductor Double-Ring-Resonator-Coupled Tunable Laser for Wavelength Routing," IEEE J. Quantum Electron., vol. 45, No. 7, pp. 892-899, 2009.
- 6) H. Ishii, H. Tanobe, F. Kano, Y. Tohmori, Y. Kondo, and Y. Yoshikuni, "Quasicontinuous wavelength tuning in superstructure-grating (SSG) DBR lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 32, no. 3, pp. 433-441, Mar. 1996.
- 7) M. C. Larson, "Narrow linewidth tunable DBR lasers," presented at the Int. Semicond. Laser Conf., Kobe, 2016, TuC2.
- 8) Y. Matsui, U. Eriksson, J. Weststrom, Y. Liu, S. Hammerfeldt, M. Hassler, B. Stoltz, N. Carlsson, S. Siraj, and E. Goobar, "Narrow linewidth tunable semiconductor laser," presented at the CSW, Toyama, 2016, MoC4-1.
- 9) J. Hasegawa, K. Ikeda, K. Suzuki, S. Yamasaki, G. Kobayashi, M. Takahashi and H. Kawashima, "32-Port 5.5%-Δ Silica-Based Connecting Device for Low-Loss Coupling between SMFs and Silicon Waveguides," presented at the Optical Fiber Conf., 2018, Tu3A.4.
- 10) QSFP-DD Multi-Source Agreement, www.qsfp-dd.com/, accessed 3 March 2021.
- 11) OSFP Multi-Source Agreement, www.osfpmsa.org/, accessed 3 March 2021.