

# デジタルコヒーレント光通信用制御回路付き 狭スペクトル線幅波長可変レーザアセンブリの開発

Narrow Spectral Linewidth Integrable Tunable Laser Assembly for Digital Coherent Optical Communications

石井啓之*1	金堂晃久*1	木村賢宜 *1	寺田陽祐*2	山岡一樹 *2
Hiroyuki Ishii	Akihisa Kondo	Masayoshi Kimura	Yosuke Terada	Kazuki Yamaoka
有 賀 屏	麻衣子*2  西日	日昌義 <sup>*2</sup> 越	浩之 <sup>*2</sup> 黒 テ	邹立郎*1
Mail	co Ariga    Masa	yoshi Nishita   Hir	royuki Koshi Tat	suro Kurobe

〈概要〉

デジタルコヒーレント光通信方式で使用される制御回路付き狭スペクトル線幅波長可変レーザアセ ンブリの開発を進めてきた。コヒーレント光通信技術を距離の短いメトロ領域やデータセンター間通 信に適用するためには、プラガブル光トランシーバなどに実装可能な小型で低消費電力の波長可変レー ザ光源が必要である。また、当初のC帯から拡張C帯やL帯などへ波長帯域を広げることも求められ ている。我々は、これらの要求に応えるために、分布帰還レーザアレイ型波長可変レーザや分布ブラッ グ反射器とリング反射器をモノリシック集積した波長可変レーザを開発してきた。また、次世代の超 高速・大容量システムに向けて、超狭スペクトル線幅波長可変レーザの検討を開始したので、これら の開発状況について紹介する。

# 1. はじめに

今世紀初頭の波長多重 (wavelength division multiplexing: WDM) 技術の導入により,光通信システムの伝送容量が大幅に 増加した。当初は固定波長光源が使用されていたが,波長可変 レーザへの置き換えが進んだ<sup>1)</sup>。使用する波長帯,例えばC帯 のどの波長でも発振できる広域波長可変レーザが実用化される ことにより,光トランシーバを波長毎に用意する必要がなくなり, 在庫コストの大幅な削減が可能となった。このため,固定波長 光源の代わりに,波長可変レーザが急速に普及した。その際, 波長可変レーザに制御回路を付加したサブアセンブリITLA (Integrable Tunable Laser Assembly)の規格がOIF (The Optical Internetworking Forum) にて定められ<sup>2)</sup>,標準的なイ ンターフェイスとして普及している。

波長あたりの伝送速度が10 Gbit/sを超えた2010年代には, デジタルコヒーレント光通信技術が導入されるようになった。 コヒーレント光通信方式は,光の位相情報を用いる方式である ため,位相ノイズが小さい,すなわち,スペクトル線幅(線幅) が狭い光源が要求されるようになる。この要求を満たすべく, 各種波長可変レーザの狭線幅化が行われてきた。また,近年, 長距離通信だけではなく、距離の短いメトロ/アクセス領域や データセンター間通信にもデジタルコヒーレント光通信方式を 導入しようとする動きとなっており、そこでは、光源の小型化・ 省電力化が要求されている。例えば、OSFP(Octal Small Form-factor Pluggable)やQSFP-DD(Quad Small Formfactor Pluggable Double Density)といった小型のプラガブル 光トランシーバに実装できるような小型光源の開発が進んでい る。

我々は、これらの高性能化、小型化、低消費電力化の要求を 満たすデジタルコヒーレント光通信用ITLAの開発を進めてき た。これまでに、分布帰還(distributed feedback: DFB)レー ザと分布ブラッグ反射器(distributed Bragg reflector: DBR)を 集積したDR(Distributed Reflector)レーザアレイにアレイ導 波路回折格子(arrayed waveguide grating: AWG)合波器をモ ノリシック集積化したAWG-DRレーザアレイ型波長可変レー ザを用いたMicro-ITLAをはじめ、より小型のプラガブル光ト ランシーバ向けに利得領域の後方にリング反射器、前方に DBRと半導体光増幅器(semiconductor optical amplifier: SOA) をモノリシック集積したDBR/リング反射器型波長可変レーザ を用いたNano-ITLAを開発したので、それらの構造や特性に 関して報告する。また次世代光通信において要求される線幅 50 kHz以下の超狭線幅光源を実現するための外部共振器型 レーザの検討を開始したので、その進捗についても報告する。

<sup>\*1</sup> 研究開発本部 フォトニクス研究所

<sup>\*2</sup> ファイテル製品事業部門

## 2. 波長可変レーザに求められる性能

はじめに,波長可変レーザに求められる基本的な性能である 波長可変幅,光出力,線幅に関して記述する。

## 2.1 波長可変幅と光出力

波長可変レーザとして,波長可変幅が最も基本的な仕様であ る。基本的には、WDM光通信システムで使用される波長/周 波数グリッドを全てカバーできればよいということになる。も ちろん単一縦・横モードで動作し、サイドモード抑圧比(side mode suppression ratio: SMSR)は45 dB以上が要求される。 従来のC帯(1529~1567 nm)向けの場合、全域(50 GHz グリッ ドで100チャネル程度)をカバーする波長可変幅はおよそ40 nm となる。ただし、近年は伝送容量拡大のため、拡張C帯(1524~ 1573 nm,波長帯域幅~50 nm)やL帯(1565~1625 nm,波 長帯域幅~60 nm)の需要も出てきている。半導体のバンド間 遷移による利得帯域は比較的広いので、この程度の波長をカ バーすることはそれほど難しくはない。

光出力としては、ファイバ出力で15~19 dBm程度が要求 されている。エルビウム添加光ファイバアンプ (erbium-doped fiber amplifier: EDFA)を用いる長距離通信では、それほど光 出力は要求されず、むしろEDFAを用いない比較的短距離の システムで高出力特性が要求される場合がある。

#### 2.2 線幅 - 狭線幅化のためのレーザ構造設計-

デジタルコヒーレント光通信用の光源としては、線幅が重要 であることを述べた。最初に実用化された25 Gbaudの偏波多重 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)の1波長あたり 100 Gbit/sのシステムでは、500 kHz以下が典型的な線幅仕様で あったが、その後、16QAM (Quadrature Amplitude Modulation) などへの多値化や高ボーレート化が進んだことにより、線幅仕 様も厳しくなってきている。現在では、100~300 kHz以下の線 幅が求められることが多い。

ここでは、その線幅に関して解説する。半導体レーザの線幅 Avは、Henryによって修正されたSchawlow-Townesの理論式

$$\Delta \nu = \frac{\nu_g^2 n_{sp} q(\alpha_m + \alpha_i)^2}{4\pi \eta_i (I - I_{th})} K_z (1 + \alpha^2) \Gamma_z^2 \qquad (1)$$

によって表される<sup>3)</sup>。ここで、 $v_g$ はレーザ媒質内の光速、 $n_{sp}$ は反転分布パラメータ、qは素電荷、 $\alpha_m$ はミラー損失、 $\alpha_i$ は 内部損失、Iは動作電流、 $I_{th}$ は閾値電流、 $\eta_i$ は内部量子効率、  $K_z$ はピーターマン係数、 $\alpha$ はチャープ・パラメータである。 $\Gamma_z$ は、レーザ活性領域の全共振器に対する閉じ込め係数で、

$$\Gamma_z = \frac{n_a L_a}{n_a L_a + f_{ext} n_p L_p} \tag{2}$$

で表される。ここで、 $L_a$ ,  $L_p$ はそれぞれ利得領域と外部導波路の長さ、 $n_a$ ,  $n_p$ はそれぞれの等価屈折率、 $f_{ext}$ は利得領域と外部 導波路間の光結合係数である。

上式を用いて、線幅 $\Delta v$ をミラー損失 $\alpha_m$ に対して計算した結 果を図1に示す。DFBレーザの場合は、 $\Gamma_z$ =1で、外部導波路 や外部共振器が集積された構成では、 $\Gamma_z$ <1となる。DFBレー ザの場合は、共振器長を長くすることによって、ミラー損失を 下げることができる。 $\lambda/4$ シフトDFBレーザの共振器長Lを 変えた場合の例を図中( $\Gamma_z$ =1)に示している。共振器長を 450 µmから1200~1500 µmに伸ばすことにより、ミラー損失 を52 cm<sup>-1</sup>から15~20 cm<sup>-1</sup>にまで低減し、1 MHz以上の線幅 を300 kHz以下まで低減できることを示している。外部共振器 型レーザでは、活性領域閉じ込め係数 $\Gamma_z$ の2乗に比例して線幅 が狭くなるが、これは外部導波路部分でノイズの起源である自 然放出光のレーザ光への混入がないためである。例えば、 $\Gamma_z$ を 1/3とした場合、同じミラー損失でも線幅を約1桁低減できる ことがわかる。よって、外部共振器レーザは、狭線幅化がしや すい構造であるといえる。





## 3. アレイ型波長可変レーザ

## 3.1 DFBレーザアレイ型波長可変レーザ

我々は、波長可変レーザとして、最初にDFBレーザアレイ型 波長可変レーザの開発を行い<sup>4)</sup>、その構造をもとにして性能改 善を行ってきた。DFBレーザアレイ型波長可変レーザは、波長 の異なるDFBレーザを複数モノリシック集積化することにより、 広い波長可変範囲を実現している。例えば、DFBレーザの温度 を35℃変化させれば、波長は3.5 nm 程度変化するので、3.5 nm ずつ波長の異なる12個のレーザを用いれば、3.5×12=42 nmの 波長可変幅が得られるというものである。DFBレーザアレイ型 波長可変レーザの狭線幅化は、まず共振器長を長くすることに よって行われた。前章で説明したように、共振器を長くするこ とにより、ミラー損失α<sub>m</sub>と共に線幅の低減が可能である。伝送 速度10 Gbpsの強度変調-直接検波 (intensity modulation-direct detection: IM-DD) 方式では、線幅要求はなかったため、共振器 長は400~500 μm 程度のものを使用し,線幅は2 MHz前後で あった。デジタルコヒーレント光通信用としては, 1200~1500 μm 程度にまで長共振器化し、線幅300 kHz以下が実現された5),6)。

## 3.2 AWG-DRレーザアレイ型波長可変レーザ

信号速度を上げるために、QPSKから16QAM、64QAMと多 値変調の多値度が増すに従い、線幅も100 kHz以下が要求され るようになってきた。これに対応するため、図2(a)に示すよう なDFBレーザの後方にDBRを集積したDRレーザアレイの前 方に更にAWG合波器をモノリシック集積したAWG-DRレーザ アレイ型波長可変レーザチップを開発した<sup>7).8)</sup>。



図2 AWG-DRレーザアレイのチップ写真 (a) と波長可変レー ザモジュールの構造 (b) Chip photograph of AWG (Arrayed Waveguide)-DR (Distributed Reflector) laser array (a) and structure of wavelength tunable laser module (b).

DRレーザアレイは、DFBレーザの後方にDBRを集積化して DRレーザアレイ構造とすることで、ミラー損失と閾値電流を低 減しさらなる狭線幅化を実現したものである。このDRレーザ アレイから出力される光を1つの光路に結合する合波器として AWGをモノリシック集積している。従来のDFBレーザアレイ では、M×1多モード干渉導波路(multi-mode interferometer: MMI)を合波器として用いていたが、波長依存性が少ない反面、 原理的に1/Mの合波損失を生じるという課題があった。モノ リシック集積したAWGは波長選択性も活かしてより高い結合 効率を実現でき、SOAへの光入力パワーを上げることで高出 力化を可能としている。図1にこのAWG-DRレーザの設計値 を示すが、ミラー損失と閾値電流の低減に対応して、100 kHz 以下の線幅が期待できる構造となっている。

このAWG-DRレーザアレイチップを用いた波長可変レーザ モジュールでは、図2(b)に示すように、SOAをレーザチップ から分離して別チップとし、間にアイソレータを介在させるこ とでSOAからの自然放出光がレーザチップに混入することに よる線幅劣化が起きない構成としている。また、レーザチップ と独立の温度制御とすることでSOAの低温動作が可能となる ことも高出力化に寄与している。

図3にAWG-DRレーザアレイ型波長可変レーザモジュール の光出力特性を16個のレーザについて重ね書きしたものを, 図4に各レーザの最大動作温度と最小動作温度のときの線幅を 示す。ファイバ光出力19 dBm以上と100 kHz以下の線幅を達 成している<sup>8),9)</sup>。原理的にモードが跳ばないDRレーザアレイ を用いているので,制御性・信頼性に優れるという特徴を有し ている。AWG-DRレーザアレイ型波長可変レーザモジュール を用いて,後述する制御回路を付加したMicro-ITLAを開発し ており、実システムで運用されている。AWG-DRレーザアレイ 型波長可変レーザモジュールは、TEC (Thermoelectric Cooler) によるレーザチップ温度制御により波長チューニングを行うの で,広い温度範囲でレーザチップを動作させる必要があり消費 電力の面でやや不利なのと,SOAを分離したためこれ以上の 小型化が難しい点が課題である。



図3 AWG-DRレーザアレイ型波長可変レーザモジュールの 光出力特性

Optical output characteristics of wavelength tunable laser module with AWG-DR laser array.



**図4** AWG-DRレーザアレイ型波長可変レーザモジュールの スペクトル線幅特性 Spectral linewidths of wavelength-tunable laser module with AWG-DR laser array.

# 4. DBR/リング反射器型波長可変レーザ

## 4.1 小型ITLA向けモノリシック集積レーザチップ

QSFP-DDなどの小型プラガブル光トランシーバに実装可能 な小型ITLAを実現する目的で,我々は,図5に示すような単 一利得領域の後方にリング反射器,前方にDBRとSOAをモノ リシック集積したDBR/リング反射器型レーザチップを開発し た<sup>9),10)</sup>。



図5 モノリシック集積DBR/リング反射器型レーザチップの 構造図 Schematic structure of monolithic DBR (Distributed

Bragg Reflector)/Ring mirror type laser chip.

図6にDBRとリング反射器のそれぞれの反射スペクトル計 算結果を重ね書きしたものと共振器のミラー損失を決める合成 反射スペクトル計算結果を示す。この例では、DBRの回折格 子パタンに位相変調を施すことにより8個の反射ピークが生じ るように設計されている。一方、リング反射器は無限に続く周 期的なピークを持つ反射スペクトルとなっている。両者の反射 ピークの間隔は僅かに異なる値に設計されているため、合成反 射スペクトルは、両者の反射ピークが一致する波長で反射率が 最大となり、単一波長での発振が可能となる。リング反射器お よびDBR上に形成されたマイクロ・ヒータによる温度制御に よってそれぞれの反射スペクトルをシフトさせることができる ので、ヴァーニア目盛りの原理を用いて、広範囲の波長選択が 可能となっている。なお、後方リング反射器はDBRよりも小 型化可能であり、前後にDBRを有するDBRレーザよりもヒー タ消費電力を低減できることに加えて、前方DBRは反射ピー ク数が有限なので波長範囲を限定できるというそれぞれの特徴 を組み合わせているのが、本素子の特徴である。DBRの前方 にはSOAがモノリシック集積されており, SOA電流により光 出力を制御することが可能である。



図6 DBRとリング反射器の反射スペクトルと合成スペクト ル計算結果 Calculated reflection and composite spectra of DBR and Ring reflector.

なお,利得領域の外部にパッシブ導波路によって構成される 反射器を備えているので,外部共振器効果により狭線幅動作が 可能である。図1に,理想的な場合のDBR/リングレーザのミ ラー損失と線幅をプロットしているが,100 kHz以下の線幅が 期待される。

このモノリシック集積DBR/リング反射器型レーザチップと PLC (Planer Lightwave Circuit) 波長ロッカを用いることで、 小型化したDBR/リング反射器型波長可変レーザモジュールの 構造と外観写真を図7に示す。レーザチップのサイズは3 mm (L)×0.35 mm(W)である。波長ロッカ用PLCはSiO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub>コ アから成り,比屈折率差(Δ)が約5%と大きいため,導波路の 最小曲げ半径を小さくでき,1.7 mm(L)×2.5 mm(W)と小型 である。





図7 DBR/リング反射器型波長可変レーザモジュールの構造 と外観写真 Structure and external view of DBR/Ring mirror type wavelength-tunable laser module.

図8にDBR/リング反射器型波長可変レーザモジュールの線 幅特性を示す。C帯全域において、ファイバ出力17 dBm、線 幅100 kHz以下の小型の波長可変レーザモジュールを実現して いる。チップの小型化、波長ロッカの小型化等により、ITLA も大幅に小型化され、後述する小型プラガブル光トランシーバ に実装可能なNano-ITLAを実現した(図12参照)。



図8 DBR/リング反射器型波長可変レーザモジュールのスペ クトル線幅 Spectral linewidth characteristics of DBR/Ring mirror type wavelength tunable laser module.

#### 4.2 拡張C帯向け波長可変幅の拡大

次に、我々は拡張C帯に対応した波長可変幅を実現するため、 リング反射器およびDBRの改良を行った<sup>11)</sup>。当初は、リング 反射器の分岐に2×2 MMIを用いてきたが、ビート長が短く MMI幅を広く設計できる1×2 MMIを用いることとした。ビー ト長が短い分、リング周回長を短くできるので、FSR (Free Spectral Range)を大きくすることが可能となり、可変波長レー ザの動作波長の拡大も可能となる。また、1×2 MMIにするこ とにより MMI幅を広く設計できるので、作製トレランスが改 善する。また、DBRについてもFSRを拡大し、反射ピーク数 を8から7に減らし、作製トレランスをさらに改善させた。す なわち、拡張C帯に対応するため、リングとDBR双方のFSR を拡大させた。

**図9**に2×2 MMIと1×2 MMIの幅誤差に起因する過剰損失 の波長依存性の計算結果を示す。入出力導波路の幅の狙い値を 12 μm, 2本の導波路の間隔を0.9 μmとして、2×2 MMIと1×2 MMIの寸法をビート長理論<sup>12)</sup>に基づく公式で計算した。その 上で幅誤差を-100 nmから+100 nmまで設定した。2×2 MMI では0.1 μm誤差が生じると拡張C帯(1524~1573 nm)で最大 1.5 dBの過剰損失が生じる。実効的に3回MMIを通過するリン グ反射器ならば損失が4.5 dB生じ、反射鏡としての機能が損な われることになる。一方で1×2 MMIならこの過剰損失が0.5 dB まで減り、加工トレランスが向上することが期待される。

図10に作製した1×2 MMIを用いたリング反射器を示す。 逆相の光を除去するための退避用導波路をMMIの1側の導波 路の両脇に設け、片方はスラブ導波路、もう片方は散乱体に結 合させて処理するように設計した。

DBRと1×2 MMIを用いたリング反射器を組み合わせた拡 張C帯対応のDBR/リング反射器型レーザを作製した。

図11に拡張C帯対応のDBR/リング反射器型波長可変レー ザの各動作点で重ねた発振スペクトルとチップ光出力の測定結 果を示す。拡張C帯をカバーする54 nmの範囲でSMSR>45 dB のシングルモード発振と18 dBm以上の光出力が得られた。



図9 2×2 MMI(左)と1×2 MMI(右)の損失特性計算結果 Calculated loss characteristics of MMIs (Multi-Mode Interferometers) for 2x2 (left) and for 1x2 (right).

図10 リング反射器の表面写真 Surface photograph of ring reflector.



図11 1×2 MMIを用いた拡張C帯対応DBR/リング反射器型波長可変レーザの 発振スペクトルと光出力特性 Measured lasing spectra and optical output characteristics of DBR/Ring laser with 1x2 MMI for the super C-band application.

# 5. ITLA 用制御回路と小型化

冒頭で述べたように,波長可変レーザに制御回路を付加した サブアセンブリITLAの規格がOIFにて定められている。この 規格に準じたITLAを用いれば,ユーザは、シリアル・インター フェース経由のコマンドによってレーザ出力を制御することが できる。レーザの所望の波長や光強度を得るための電流,温度, 波長ロッカPD等の各種パラメータをメモリに記憶しており, 制御コマンドによって所望の動作が得られるようになってい る。すなわち,ユーザは,制御方法の異なる波長可変レーザの 種類を意識する必要がなくなることがこの規格の利点である。 光トランシーバの小型化の要請に対応すべく,ITLAの小型 化・省電力化が進展してきた。図12に、各世代のITLAの外観 写真を示す。当初は、10 Gbit/s IM-DDの時代にITLAが作製 されていたが、CFP(C Form-factor Pluggable)やCFP2といっ た小型プラガブル光トランシーバに対応できるように、サブア センブリの規格としては、ITLAよりも小型なMicro-ITLAの 標準化が制定された<sup>13)</sup>。前述のアレイ型波長可変レーザモ ジュールはMicro-ITLAに実装されて、実用化されている。標 準化はされていないが、さらに小型の光源サブアセンブリとし て、前述のDBR/リング反射器型波長可変レーザモジュールを 実装したNano-ITLAを開発した。消費電力も当初のITLAに 対して半分程度まで削減されている。



図12 ITLA小型化の変遷

ITLA (Integrable Tunable Laser Assembly) downsizing transitions.

図13にNano-ITLAの制御回路ブロック図を示す。CPUと Gain, SOA, DBR, Ring, Phase, TECの各制御回路から構 成される。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。DBR, Ringの各電流制御回路では,設定波長 情報に基づいてヒータ電力が一定となるように制御する。 Phase電流制御回路では,波長ロッカPD値に基づいて,出力 波長を一定に制御する。SOA電流制御回路では,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。TEC制 御回路ではサーミスタ抵抗に基づいて,一定温度に制御する。

従来ITLAの機能を維持しつつNano-ITLAサイズに収めるた め、レーザ制御の機能を一つのICに集積したASIC (Application Specific Integrated Circuit)を採用することに加え、電気フィ ルタ構成の最適化、ソフトウェアによる制御回路機能代替化等 を行った。



図13 Nano-ITLAの制御回路ブロック図 Block diagram of control circuit for nano-ITLA.

## 6. 次世代用超狭線幅波長可変レーザの検討

近年の爆発的なデータ通信容量増加の需要に応えるべく,信 号baudレートの高速化が顕著である。研究段階ではあるが, 200 Gbaudを超える事例も報告されるようになってきている。 そのような高baudレートにおいては,DSP(Digital Signal Processor)による分散補償量も増えるため,光源の線幅要求も 厳しくなっていく。次世代ITLAとして,線幅50 kHz以下を 目標とする新たな外部共振器型波長可変レーザの検討を開始し たので,その進捗をここに報告する<sup>14)</sup>。

図14に、利得領域の前方にDBRとSOAをモノリシック集 積した半導体チップと後方の外部反射鏡およびSiエタロンに より構成した外部共振器型波長可変レーザの構造を示す。構造 としては、前述のDBR/リング反射器型レーザのリング反射器 の代わりに、外部反射鏡とSiエタロンを配置したものとなっ ている。外部共振器部分の長さが長くなるため、活性領域閉じ 込め係数Γ<sub>2</sub>がより小さくなり、狭線幅化が期待できる。



**図14** 外部エタロンと反射鏡を用いた外部共振器型波長可変 レーザの構成 Configuration of external cavity wavelength tunable laser with external etalon and mirror.

作製した外部共振器型波長可変レーザの発振スペクトルと線幅についての測定結果を、図15、図16にそれぞれ示す。C帯 全域をカバーし、SMSRは50dB以上で、50kHz以下の狭線幅 特性が得られている。このように外部共振器型波長可変レーザ は線幅特性に優れている。但し、実装がモノリシック型に比べ て複雑になる点や,共振器長が長くなることにより,縦モード 間隔が狭くなるため,波長の制御は繊細になる点などの課題が あり実用化に向けてはこれらの課題を解決していく必要がある。



図15 外部エタロンと反射鏡を用いた外部共振器型波長可変 レーザの発振スペクトル測定結果

Measured lasing spectra of external cavity wavelength tunable laser with external etalon and mirror.



 図16 外部エタロンと反射鏡を用いた外部共振器型波長可変 レーザのスペクトル線幅測定結果
Measured spectral linewidth characteristics of external cavity wavelength tunable laser with external etaron and mirror.

# 7. おわりに

デジタルコヒーレント光通信用波長可変レーザの重要な要求仕 様である波長可変幅, 光出力, 線幅について記述し, Schawlow-Townesの理論式を用いて、各種レーザ構造における線幅の低 減方法を解説した。狭線幅・高出力光源として、モノリシック 集積AWG-DRレーザアレイ型波長可変レーザモジュールを用 いた Micro-ITLAを開発した。DR構造によるミラー損失の低減 とAWGによる合波損失の低減、更にSOA分離構造の採用によ り、19 dBmの高出力動作と100 kHz以下の狭線幅動作を達成し た。小型のプラガブル光トランシーバに実装可能なDBR/リン グ反射器型波長可変レーザモジュールを用いたNano-ITLAを 開発し, 17 dBmの光出力と100 kHz以下の線幅特性を得た。 DBR/リング反射器型波長可変レーザの拡張C帯向け改良版と して、1×2 MMIをリング反射器に用いたDBR/リング反射器 型波長可変レーザを作製し、拡張C帯をカバーする光源を実現 した。さらに、将来の超狭線幅光源向けに、利得領域、DBR、 SOAをモノリシック集積した半導体チップと外部反射鏡、外 部エタロンにより構成した外部共振器型波長可変レーザを試作 し, 50 kHz以下の狭線幅特性を得た。本レーザは、将来の超 狭線幅光源として有望と考えている。高度に発展するシステム 要求に応えるべく、これまで我々は波長可変レーザの高性能化 を進めてきたが、今後も、高速・大容量光通信を支える基盤技 術として、光源の高性能化を進めていく予定である。

# 謝辞

本研究成果の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の 委託研究(JPJ012368C04501)により得られたものです。

## 参考文献

- J. Buus, M. C. Amann, and D. J. Blumenthal: "Tunable laser diodes and related optical sources," 2nd ed. Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE, 2005.
- Implementation Agreement for Tunable Laser, IA # OIF-ITLA-MSA-01.3, July, 2015, https://www.oiforum.com/wpcontent/uploads/2019/01/OIF-ITLA-MSA-01.3.pdf
- C. H. Henry: "Theory of the linewidth of semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 18, no. 2, pp. 259–264, Feb. 1982.
- 4) 黒部立郎,木本竜也,村主賢悟,向原智一,有賀麻衣子,松尾望, 粕川秋彦:"フルバンドチューナブルレーザの開発",古河電工 時報,第121号,2008年3月,14.
- H. Ishii, K. Kasaya, and H. Oohashi: "Narrow spectral linewidth operation (<160 kHz) in widely tunable DFB laser array," Electron. Lett., vol. 46, no. 10, pp. 714–715, 2010.
- 6) T. Kimoto, G. Kobayashi, T. Kurobe, T. Mukaihara, and S. Ralph: "Narrow linewidth tunable DFB laser array for PDM-16QAM transmisshon," presented at the OptoEletron. Commun. Conf./ Photon. Switching, Kyoto, Japan, 2013, Paper MK2-6.
- G. Kobayashi, K. Kiyota, T. Kimoto, and T. Mukaihara: "Narrow linewidth tunable light source integrated with distributed reflector laser array," presented at the Optical Fiber Conf., 2014, Tu2H.2.
- 8) 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.
- 9) M. Nishita, Y. Higa, N. Matsubara, J. Hasegawa, K. Yamaoka, M. Ariga, Y. Inaba, M. Kimura, M. Wakaba, M. Yoshida, K. Maruyama, S. Okuyama, T. Suzuki, H. Ishii, V. Mikhailov, R. Sefel, and Y. Kawakita: "Compact tunable DBR/ring laser module integrated with extremely-high-Δ PLC wavelength locker," presented at the Opt. Fiber Commun. Conf., San Diego, CA, USA, 2020, Paper M2A.6.
- 10)西田昌義,松原礼高,長谷川淳一,山岡一樹,有賀麻衣子,稲 葉悠介,木村賢宜,若葉昌布,吉田匡廣,丸山一臣,鈴木理仁, 石井啓之,川北泰雅:"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",古河電工時報,第140号,2021年7 月,40-43.
- 11) Y. Terada, Y. Isobe, H. Abe, T. Sakai, M. Nishita, H. Ishii, and T. Kurobe: "Monolithic DBR/Ring Tunable Laser Employing 1x2 MMI-coupled Ring Resonator," presented at the Int. Semicond. Laser Conf., Matsue, 2022, MC-02.
- 12) P. A. Besse, M. Bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano and M. K. Smit: "Optical Bandwidth and Fabrication Tolerances of Multimode Interference Couplers," J. Lightwave Technol. 12 (1994), 1004-1009.
- 13) Implementation Agreement for Tunable Laser, IA # OIF-MicroITLA-01.1, July, 2015, https://www.oiforum.com/wpcontent/uploads/2019/01/OIF-Micro-ITLA-01.1.pdf
- 14) K. Yamaoka, M. Ariga, Y. Terada, V. Mikhailov, H. Ishii, T. Kimura, and T. Kurobe: "Narrow linewidth DBR laser incorporating with an intra-cavity etalon," presented at the Int. Semicond. Laser Conf., Orlando, 2024, WD1.