

フルバンドチューナブルレーザの開発

Development of Full-Band Tunable Laser

黒部 立郎*
Tatsuro Kurobe

木本 竜也*
Tatsuya Kimoto

村主 賢悟*
Kengo Muranushi

向原 智一*
Toshikazu Mukaihara

有賀 麻衣子*
Maiko Ariga

松尾 望*
Nozomu Matsuo

粕川 秋彦**
Akihiko Kasukawa

概要 DWDMシステムの大容量化に際し、必要不可欠な信号光源である波長可変レーザモジュールを開発した。可変方式としては、原理上波長が安定なDFBアレイ方式を採用している。また低ノイズの半導体増幅器を内蔵しているため高出力動作が可能である。本論文では、本波長可変レーザの構成、動作原理及び光学特性について説明し、波長ロッカーを内蔵したレーザモジュールの構成、特性及びその信頼性について紹介する。

1. はじめに

DWDM通信システムの大容量化が進んでおり、トラフィック状況に合わせた再構成可能なネットワークの実現と、在庫コスト低減の目的から発振波長が可変可能なフルバンドチューナブルレーザが必要不可欠とされている。図1は光通信ネットワークと用いられる光送信機を示している。用途によって様々な光送信機が用いられているが、これまでは、光源には固定波長の光源が使用されていた。しかし、最近ではフルバンドチューナブルレーザが長距離用のトランスポンダやラインカードに変調器と組み合わせて搭載され、置き換えが急速に進みつつある。また、アプリケーションとしても長距離用途のみならず、メトロ及びアクセスエリアと呼ばれる中距離及び短距離の通信にも適用されるようになってきた。

このような要望に応えるため、これまでに様々な方式の可変レーザが提案されてきた。機械的可動機構を用いたレーザ、外部共振器型レーザ、分布反射型レーザなどである。しかし、いずれも波長の可変方法は複雑であり、外部環境変化時の動作特性や、経時劣化による特性変化などが課題とされてきた。また、従来から光通信に用いられている熱波長可変のDFB (distributed feedback) レーザとは、波長可変機構が大きく異なるため、より高度な制御回路が不可欠であった。一方、信頼性と実績のあるDFBレーザの技術に基づいた広帯域波長可変光源として、波長選択型レーザがある^{1)~4)}。これは異なる発振波長のDFBレーザをアレイ上にカプラと光増幅器 (semiconductor optical amplifier: SOA) とともに集積し、レーザの切り替えと熱による波長可変によってより広い波長可変範囲を実現するものである。DFBレーザと同じ原理に基づくため長期信頼性が優れており、波長及び光出力の制御についても

簡素なフィードバック制御回路により容易に行える。今回、我々はこの波長選択型レーザの波長可変幅を拡大しフルバンドでの波長可変を可能とし、光出力、ノイズ特性などの基本特性についても高性能化を図った。更に、Cバンド帯及びLバンド帯の全域にわたって波長可変及び制御が可能な波長ロッカー内蔵モジュールを開発した。

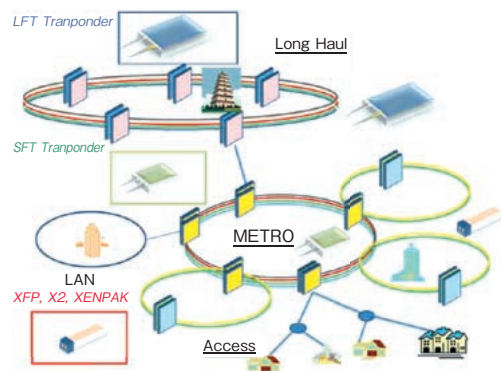


図1 波長多重通信を用いた光ネットワークと光送信機
Wavelength-division multiplexing optical network and optical transmitter.

2. フルバンドチューナブルレーザ集積素子

トランスポンダ用途のフルバンドチューナブルレーザは、波長可変幅としては35 nm以上、20 mW以上のファイバ端出力が必要とされている。本レーザの基本素子である熱可変型DFBレーザの波長可変幅は消費電力と信頼性上許される動作温度範囲から決まり、可変幅としては約4 nm程度である。フルバンドをカバーするため、作製ばらつきを考慮の上波長間隔3.45 nmと異なる12個のDFBレーザを集積する設計とした。発振波長制御の観点から位相シフト型の回折格子を採用した。

* 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

** 研究開発本部 横浜研究所

この設計により10℃～50℃の動作温度の変化により38 nmの範囲で波長可変が実現できる。図2に作成した集積素子の光学顕微鏡写真を示す。DFBレーザアレイに加え、各々のDFBレーザからの出力が結合する光カプラ、及び光カプラ内での損失を補償する光増幅器も集積されている。素子サイズは500 μm × 2600 μm であり、DFBレーザの長さは600 μm 、光増幅器の長さは900 μm である。端面は曲げ導波路と無反射コーティングを施して、端面からの反射を抑制している。デバイス作製手順としては、まず、DFBレーザの発光部及びSOAの増幅部となる量子井戸構造をInP基板上に成長させる。次に電子線描画装置とドライエッチング装置により回折格子を形成する。その後、エッチングと再成長プロセスを行うことにより、受動導波路構造、電流狭窄のための電流ブロック層、電流注入と光の導波のためのクラッド層などを形成する。更に、電流注入のため電極形成と素子間の電気的分離を行い、素子が完成する。成長には有機金属気相成長法(metal organic chemical vapor deposition: MOCVD)を用い、エッチングにはメタン水素系のドライエッチングを用いた。作製した集積素子のファイバ端出力特性を図3に示す。DFBレーザは150 mAで一定駆動としてSOA電流を変化させることにより、光出力特性を制御する。レーザの温度としては、可変温度範囲である10℃及び50℃である。いずれのDFBレーザを駆動した場合においても30 mW以上の光出力が動作温度50℃においても得られている。外部変調器との組み合わせで用いる用途に十分な光出力である。図4に発振中の光スペクトルを示す。Cバンド帯用及びLバンド帯用集積レーザとも40 dB以上の高い隣接モード抑圧比(side-mode suppression ratio: SMSR)と、光信号対雑音比(optical signal-to-noise ratio: OSNR)が得られている。

3. スペクトル線幅の低減

波長可変レーザには従来用いられてきた固定波長のDFBレーザと同等の特性が求められている。長距離伝送のためには、スペクトル線幅と相対雑音強度(relative intensity noise: RIN)などの指標で示される低ノイズの特性を有する必要がある。本レーザのような集積素子の場合には、素子内や外部からDFBレーザへの反射戻り光に配慮する必要がある。低ノイズ特性を達成するための集積素子の構造最適化を図った⁵⁾。図5は本レーザと素子内の反射点になりうる箇所を模式的に表したものである。受動素子と能動素子との接合部、カプラ端面、半導体増幅器端面などのいくつかの反射点がある。レーザの発振スペクトルを解析した結果、半導体増幅器端面からの戻り光がノイズ特性に影響を与え、駆動条件によってはスペクトル線幅が周期的に広がる場合があることが明らかになった。これは、反射戻り光が半導体増幅器内で再増幅されDFBレーザの安定動作を妨げるためである。戻り光の影響を最小限に抑えるためにSOA端面構造の最適化を行った。図6は端面反射率の異なる素子でのスペクトル線幅のDFBレーザ駆動電流依存性を示したものである。反射率 5.7×10^{-3} では線幅はDFB電流の条件によっては10 MHzを超える場合があるが、反射率 1.1×10^{-5} とした線幅の振動は抑制され線幅2 MHz以下と良好な値が得られた。図7は動作温度25℃における光出力と線幅のSOA電流依存性を示している。全てのDFBレーザについて2 MHz以下の線幅と50 mWの光出力が達成されている。また、SOAによる自然放出光の線幅への影響も僅かであり、RINについても-145 dB/Hzであった(図8)。このように集積素子での線幅特性にモデル化を行い最適化の結果、半導体増幅器を用いた波長選択光源としては、最も高出力かつ狭線幅の素子を実現することができた。

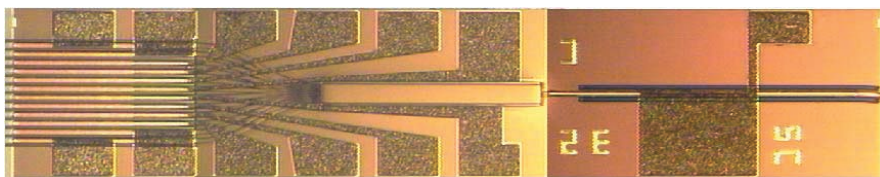


図2 フルバンドチューナブルレーザ集積素子(DFBレーザアレイ、カプラ、SOA)
Optical integrated chip of full-band tunable laser (DFB laser array, coupler and SOA).

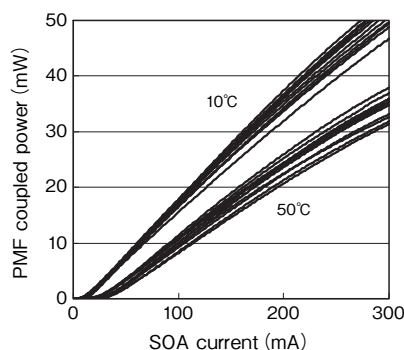


図3 光出力特性
Optical output characteristics.

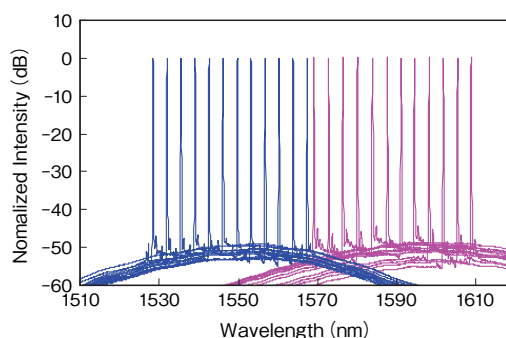


図4 Cバンド帯レーザ、Lバンド帯レーザの発振スペクトル
Superimposed lasing spectrum of C-band laser and L-band laser.

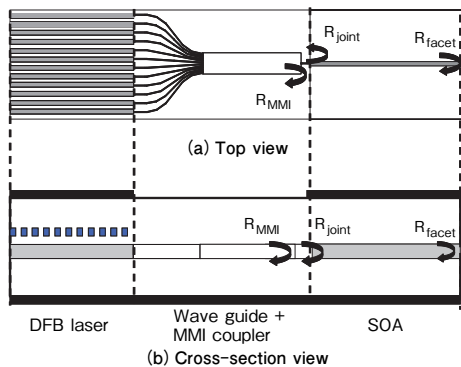


図5 集積素子内の反射戻り光のモデル
Typical model of reflected light in optical integrated chip.

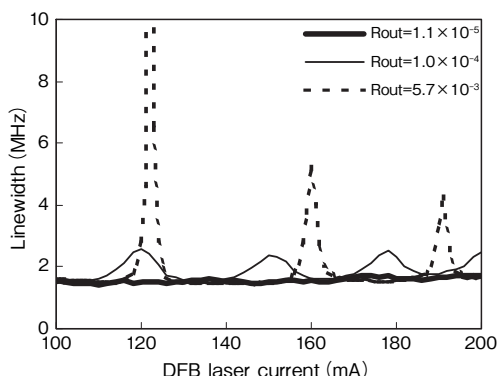


図6 スペクトル線幅のDFB電流と端面反射率依存性
Dependency of spectrum linewidth on facet reflection coefficient and DFB current.

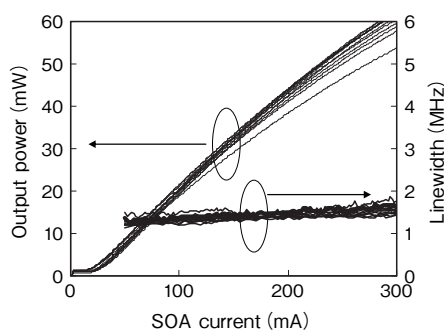


図7 光出力とスペクトル線幅のSOA電流依存性
SOA current dependency of optical output and spectrum linewidth.

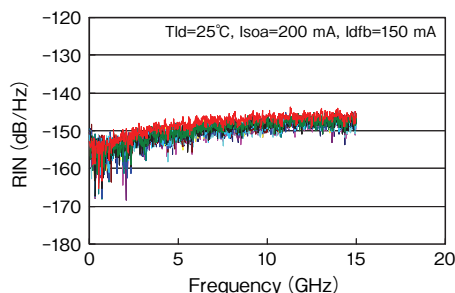


図8 相対雑音強度 (RIN) 特性
Relative intensity noise (RIN) characteristics.

4. 波長ロッカー内蔵モジュール

実際のDWDMの光通信システムでは、50 GHz間隔で波長スペーシングで波長チャンネルが並んでおり、波長精度としては経時劣化を含めて ± 2.5 GHz以内に抑える必要がある。精密な波長の制御を実現するには、可変レーザモジュール内に波長ロッカーを搭載する必要がある。しかし、これまでに報告されていた波長ロッカー内蔵モジュールは比較的サイズの大きなものに限定されていた。そこで、我々はフルバンドの波長チャンネルをロックできる波長ロッカー内蔵モジュールを作製した⁶⁾。

図9に波長ロッカー内蔵モジュールを示す。業界スタンダードサイズの26ピンのバタフライパッケージであり、最近の光通信システムの高密度実装に適合するものである。モジュール内部にはコリメート光を分岐するビームスプリッタと50 GHz、将来的には25 GHz周期のエタロンが搭載でき、波長モニタ用とパワーモニタ用に2つのフォトディテクタが内蔵されている。図10は25 GHz間隔のエタロンを用いた場合の波長弁別カーブである。レーザの波長可変用と波長ロッカー部用との独立のペルチェ素子で温度コントロールされており、本カーブを用いてフィードバック制御を行うことにより極めて精密な波長の制御が可能となる。光通信用モジュールでは初期特性のみならず長期信頼性が重要である。図11及び図12に85℃に2000時間の高温放置を行ったときのパワーと波長の変化量を示す。パワー変化量は10%以下、波長変化量は5 pm以内と非常に小さく抑制されている。YAGレーザによる溶接とハンダを用いた組立工程によりこのように高い、経年変化の僅かな堅牢で信頼性の高い波長ロッカーモジュールが作製できた。図13に本モジュールと駆動する制御回路こみで消費電力を評価した結果を示す。最も厳しい条件である外部温度75℃においてもLD部分の消費電力は3 W以下であり、制御回路含めても5 W以下であった。トランスポンダへの搭載を考えるとレーザ制御部の消費電力は6.6 W以下とすることが推奨されているが⁷⁾、十分にその基準を満足するものである。このように今回開発したレーザモジュールは、フルバンドでの波長可変が可能で低ノイズ特性を有し信頼性の高い波長ロッカー内蔵モジュールであり、トランスポンダなどの光送信機の要求仕様を満たすものである。

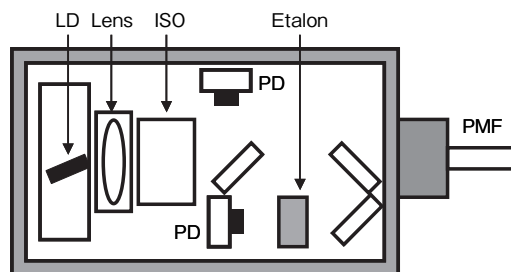


図9 波長ロッカーモジュール
Wavelength locker module.

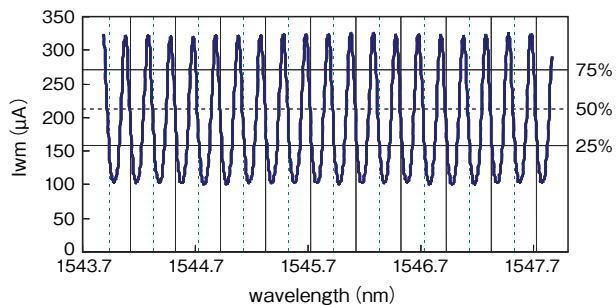


図10 25 GHz波長スペース対応波長弁別カーブ
Wavelength discrimination curve with 25-GHz wavelength spacing.

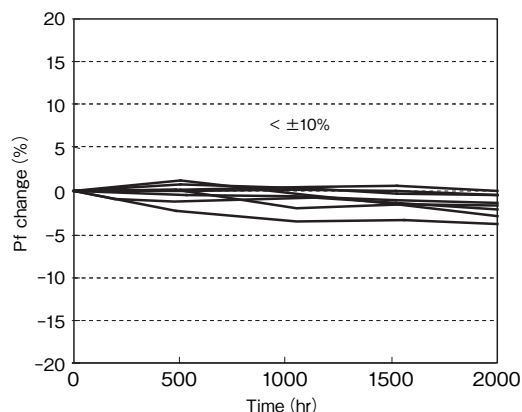


図11 高温放置試験結果：光出力変化
Results of high-temperature shelf test: change in optical output.

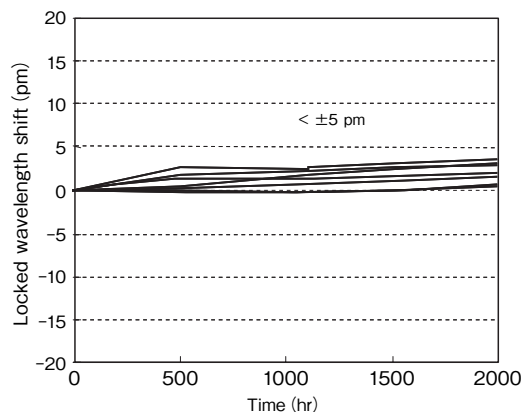


図12 高温放置試験結果：波長変化
Results of high-temperature shelf test: change in wavelength.

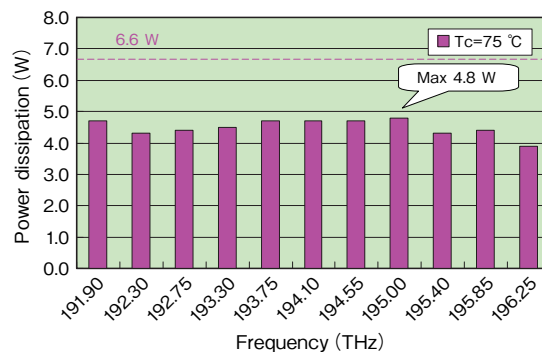


図13 モジュール消費電力(制御回路含む)
Power consumption of module (control circuit included).

5. おわりに

DWDMシステムの大容量化に際し、必要不可欠な信号光源である波長可変レーザモジュールを開発した。可変方式として原理上波長が安定なDFBアレイ方式を採用し、本方式の課題とされていた半導体増幅器の低ノイズ化を実現し、Cバンド帯及びLバンド帯全域をカバーする広い波長可変幅と高出力動作を実現した。更に、業界標準サイズのコンパクトな波長ロッカーモジュールを作製して信頼性の高い波長及び光出力の制御を実現した。今回開発したフルバンドチューナブルレーザは高い信頼性を有しており、発展するDWDM光通信用途の光源として非常に有望である。

参考文献

- 1) M. Bouda et al.: Proc., OFC 2000, TuL1, 178.
- 2) H. Oohashi et al.: Tech. Dig., IPRM '2001, Nara, FBI-2, 575.
- 3) K. Kudo et al.: IEEE Photonics Technology Letters, 12 (2000), 242.
- 4) T. Kurobe et al.: Tech. Dig., IPRM2003, ThB1 (2003), 339.
- 5) T. Kimoto et al.: Proc., ISLC2004, SaA6 (2004), 149.
- 6) T. Mukaiharu et al.: Proc., ECOC 2003, We.4.P.81 (2003), 718.
- 7) OIF-ITLA-MSA-01.1-Integrable Tunable Laser Assembly Multi Source Agreement.