

高信頼性，波長ロッカー内蔵40 mW，25 GHz × 20ch， 波長可変DFBレーザモジュール

Highly Reliable 40-mW, 25-GHz × 20-ch Thermally Tunable DFB Laser Module Integrating Wavelength Monitor

木本 竜也*
Tatsuya Kimoto

品川 達志*
Tatsushi Shinagawa

向原 智一*
Toshikazu Mukaihara

那須 秀行*
Hideyuki Nasu

田村 修一*
Shuichi Tamura

野村 剛彦*
Takehiko Numura

粕川 秋彦*
Akihiko Kasukawa

概要 高密度波長多重 (DWDM) 通信においては、隣接チャンネル間のクロストーク抑制のため任意の波長チャンネルに高精度にロック可能な波長ロッカーを内蔵したレーザモジュールが求められる。我々は、25 GHz間隔のWDMに対応した波長ロッカーを実装し、PMF出力40 mWのDFBレーザモジュールの開発を行った。高効率高信頼性DFBレーザチップと熱設計の最適化により波長可変動作とレーザチップ温度を約40℃変化させ、波長可変範囲4 nm以上、最大消費電力4 W以下を実現した。高温放置試験、加速劣化試験を行い、従来のDFBレーザモジュールに比べて複雑な構造であっても信頼性が高くDWDMシステムに適用可能であることを示した。

1. はじめに

インターネットの普及、アクセス系のブロードバンド化に伴い、基幹系においても情報量の増大が加速している。WDMシステムでは、伝送容量を増大のために以下に示す3つの方法がある。

- 1) 1チャンネルあたりのビットレートの向上
(2.5Gbps 10 Gbps 40 Gbps)
- 2) 使用波長帯域の拡大 (C-band S, C, L-band)
- 3) チャンネル間隔の狭間隔化
(100 GHz 50 GHz 25 GHz)

中でも、3)は既存設備であるEDFAなどC-Band対応のシステムの大部分を使用できるため比較的低コストで情報伝送容量の増大が期待できる。我々は、これまで波長モニタ内蔵DFBレーザモジュールを報告した^{1)~5)}。

しかしチャンネル数が100以上になると、システムの保守のために非常に多くのDFBレーザモジュールをスペアとして準備する必要がありコストが問題となる。またデバイスベンダにとっても非常に多くの在庫を抱えることになる。波長可変レーザ光源は、この様なコスト、在庫問題の一つの解である。それだけでなく波長可変光源は発振波長を遠隔操作が可能であるため、動的な波長割り当てを行う次世代のWDMシステム用の光源として期待できる。我々が開発を行ったDFBレーザチップを用いた熱による波長可変レーザは、他の多くの波長可変レー

ザ光源に比べて、単一モード発振特性が優れており、光伝送の分野では長い歴史があり高信頼性が期待できる。

以上のような背景を踏まえ本報告では、長期信頼性を含め、25 GHz間隔に波長を高精度にロック可能な波長ロッカーを内蔵した熱可変による波長可変DFBレーザモジュールについて報告する。本稿は、第2章で開発したレーザモジュールの構造、第3章で光出力の温度特性と波長可変動作、第4章で波長ロッカー特性、第5章で信頼性試験の結果、第6章でまとめという構成である。

2. レーザモジュール構造

図1に25 GHz間隔対応の波長ロッカー内蔵DFBレーザモジュールの構造を示す。内蔵した波長モニタ部の構造を以下に記す。DFBレーザチップの後方光をコリメートレンズに通し平行光として、プリズムによって2分岐する。一つのビームはPDに直接結合し光出力モニタとして用いる。もう一方のビームは、25 GHz間隔のエタロンを介してPDに結合し、波長モニタとして用いる。後方光の分岐に、プリズムを用いることにより、従来のハーフミラーを用いた構造と比べ省スペース化が可能となり、標準的な14pinバタフライパッケージに25 GHz間隔に対応した波長モニタ構造とDFBレーザを内蔵することが可能となった。また部品点数の削減、アライメントの簡略化を図ることができる。本モジュールは、すべての部品がYAG溶接または半田付けされており非常に強固である。したがって、熱、外力等の衝撃や水分に強く第5章で示すように高信頼性なモジュールとなっている。

* 研究開発本部 横浜研究所

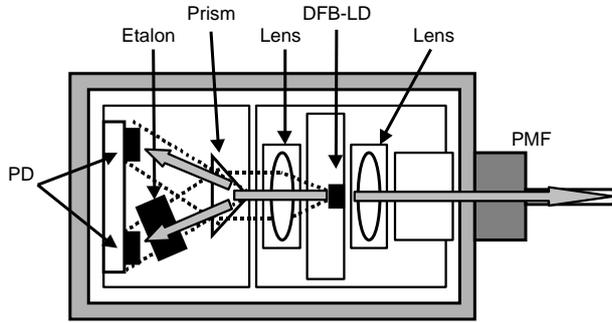


図1 波長ロッカー内蔵、波長可変DFBレーザモジュールの模式図
Schematic view of tunable DFB laser module integrating wavelength monitor

特徴的な点は、25 GHz間隔のDWDMに対応するために2つのTECを用いて、レーザと光フィルタ（エタロン）の温度を独立して制御可能な構造になっていることである。この構造により、第4章で示すように、すべての波長チャンネルを波長弁別特性のネガティブスロープのほぼ中間点でロックすることができる。さらに、エタロンの高精度な温調が可能となりケース温度に対する波長ドリフトや、レーザ駆動電流に対する波長ドリフトを非常に小さくすることができる。

3. 電流 - 光出力特性と発振スペクトル

レーザチップの温度を制御することにより波長可変をおこなう場合、高温駆動時の信頼性確保のための低駆動電流、高出力が非常に重要であり、DFBレーザチップの回折格子の結合係数と共振器長 L を出力と温度特性の観点から最適化を行うことにより高温での低駆動電流高出力を実現できる。

図2に、レーザチップ温度 $T_{LD} = 5 \sim 45$ における電流 - 光出力特性を示す。45 という高温であっても効率の劣化が少なく60 mW以上のPMF出力が得られ、40 mWの駆動電流が175 mA以下である。このような低い駆動電流は、レーザチップの信頼性と低消費電力化にとって重要である。40 mWという高出力の動作が可能であるのでメトロ系WDMにおけるアンプレシステムにも適用できる。

図3に、レーザチップ温度を5 から45、光出力40 mWとしたときの光スペクトルを示す。レーザチップ温度を約40 変化させることにより4 nm以上の波長可変を達成し、すべての温度範囲において横モード抑圧比SMSR > 50 dBとなっている。他の特性についてもすべての温度範囲に対して、たとえば線幅Linewidth < 5 MHz、相対雑音強度RIN < - 150 dBである。これらからこの波長可変レーザが10 Gb/sec及び40 Gb/secの基幹系、メトロ系のDWDMシステムに適用可能であることが確認できた。

4. 波長ロッカー特性

4.1 波長弁別特性

図4のカーブは波長弁別特性と呼ばれるものであり、発振波長と波長モニタ電流値 I_{wm} の関係を示している。測定はエタロン温度 $T_f = 30$ （一定）、パワーモニタ電流値一定のAPC（auto power control）駆動でファイバ出力40 mWに制御を行い、

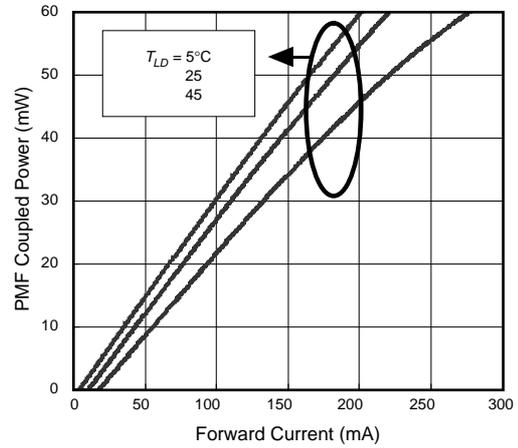


図2 電流 - 光出力特性
L-I characteristics under various laser temperatures

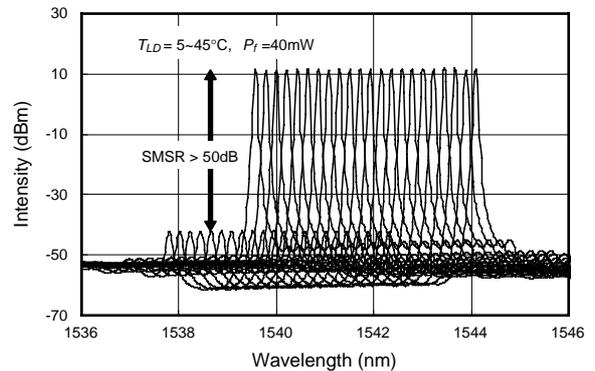


図3 各レーザ温度における光スペクトル
Optical spectrum under various laser temperatures

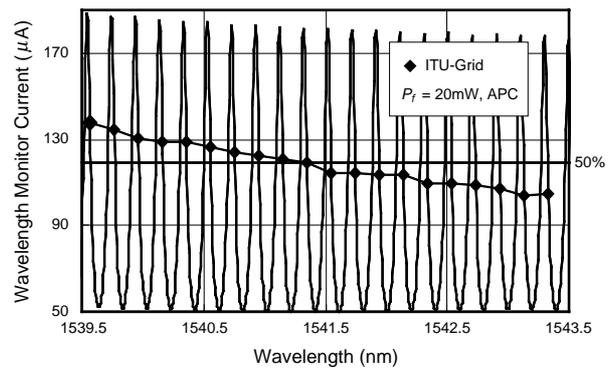


図4 波長弁別特性
Wavelength discrimination curve

レーザチップ温度を $T_{LD} = 5 \sim 45$ の範囲で変化させている。波長弁別特性のスロープを用いて、波長のずれをPD電流値の変化として検出することができる。本モジュールは25 GHz間隔のエタロンを実装しているため、25 GHz間隔、全20チャンネルのITU-Gridがネガティブスロープのほぼ中間点に一致している。ITU-gridでの波長弁別特性のスロープは、約14%/GHzと急峻であり、波長モニタPDの劣化により I_{wm} が変動した場合の波長ドリフトが小さい。

4.2 波長ドリフト特性

チャンネル間隔25 GHz、ビットレート10 Gbit/sのDWDMシステムで許容される波長のドリフトは少なくとも ± 10 pm以下であり⁶⁾、波長ロッカー内蔵レーザモジュールでは非常に高い波長安定性が要求される。波長ドリフト特性を評価するために、波長モニタと外部のシンプルなアナログフィードバック制御回路を用いて実際に波長のロックし測定を行った。ドリフトの特性に関しては、時間的な平均をとっており制御回路による揺らぎは含まれていない。

図5に、 $P_f = 20$ mWあるITU-gridに波長をロックしたときのケース温度にたいする波長ドリフト特性を示している。ケース温度 $T_c = -5 \sim 70$ の範囲において波長のドリフトは ± 1 pm以下と非常に小さい波長ドリフト特性が得られた。ケース温度による波長ドリフトの要因は、ケースからの輻射熱等の影響をエタロンが受けるためであり、エタロンがTECにより温調されていても、わずかにエタロン温度が変化するため波長のドリフトが起こる。このわずかな温度変化を抑制するために、温度センサであるサーミスタとエタロンの位置関係を最適化している。これによって、ケース温度が変化した場合であってもサーミスタとエタロン温度が一致し、波長のドリフトを抑制でき、上記のような小さい波長ドリフト特性が実現できる。

図6に、ロック波長の駆動電流依存性を示す。駆動電流の変化による波長ドリフトは ± 0.2 pm以下と非常に小さい値となっている。チップの劣化により駆動電流が上昇すると、レーザチップの温度が上昇し波長が長波にシフトする。波長ロックを行っているときは、駆動電流の上昇につれてチップ温度を下げることで波長を一定に保つよう温度制御を行う様子が図6から分かる。従来の1つのTEC上にレーザチップと波長ロッカーが実装されている構造の場合、このレーザチップの温度制御によりエタロン温度が変化し波長のドリフトの要因となる。しかし、本モジュールは2つのTECによってレーザチップとエタロンの独立制御が可能であり、非常に小さいドリフトが実現でき、25 GHz間隔のDWDMシステムに対応できる。

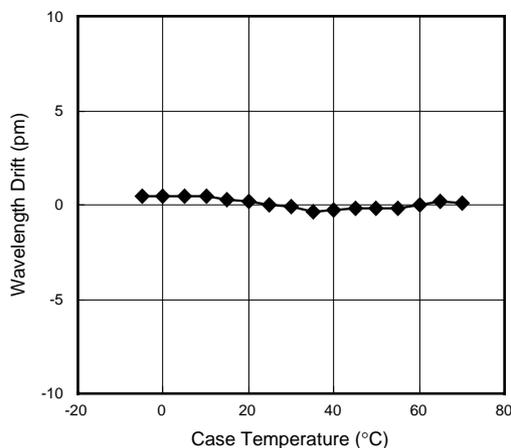


図5 波長ドリフトのケース温度依存性
Wavelength drift over case temperatures

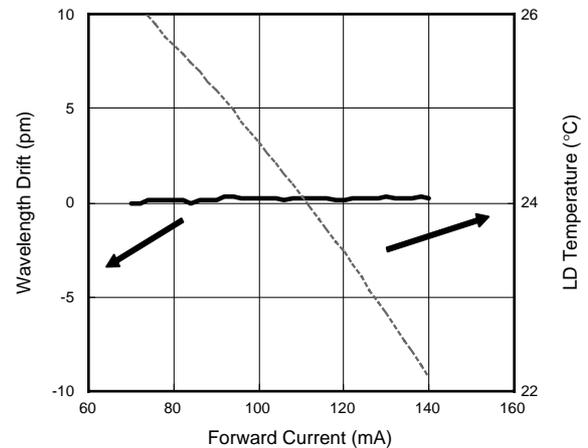


図6 波長ドリフトの駆動電流依存性
Wavelength drift over operating currents

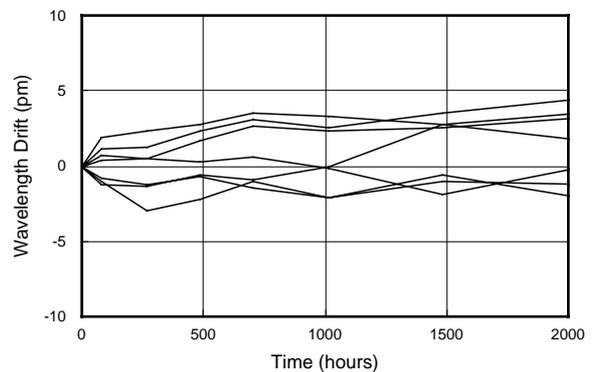


図7 高温放置試験
Wavelength drift during high temperature storage

5. 信頼性試験

温度による波長可変DFBレーザは、レーザチップそのものの歴史が古く信頼性の高い技術であるといえるが、高温でレーザチップを駆動した場合の信頼性には注意を払う必要がある。我々はさまざまな温度条件、駆動条件においてレーザチップの信頼性試験を行った。詳細はここでは省略するが、チップの寿命を初期値から駆動電流が20%上昇したときと定義した時、線形外挿によって求めた磨耗故障率は、ファイバ光出力40 mW相当、 $T_{LD} = 40$ の駆動条件で20年後に500FITs以下であり、高温動作においても高信頼性を確認できた。

波長ロッカー内蔵モジュールは、レーザチップ後端面 - プリズム - エタロン - 波長モニタPD間の光軸ずれが波長ドリフトの原因となる。我々は、雰囲気温度85 の高温放置試験を2000時間行った。結果を図7に示す。初期の変動が見られるが ± 5 pm以下で飽和している。本モジュールは、信頼性の高いYAG溶接と半田付けによって組み立てられており2TECという従来よりも複雑な構造でありながら光軸ずれに強いことが確認できた。

また、温調により波長可変を行うために、従来の固定波長のレーザモジュールに比べTECへの負荷が非常に大きくなると考えられる。したがって、TECの歪みによる光軸ずれが大き

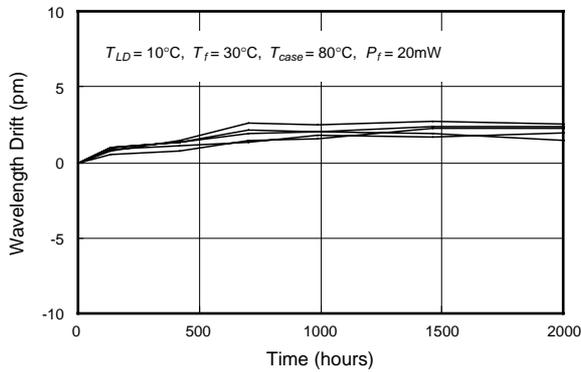


図8 加速劣化試験
Wavelength drift at aging test

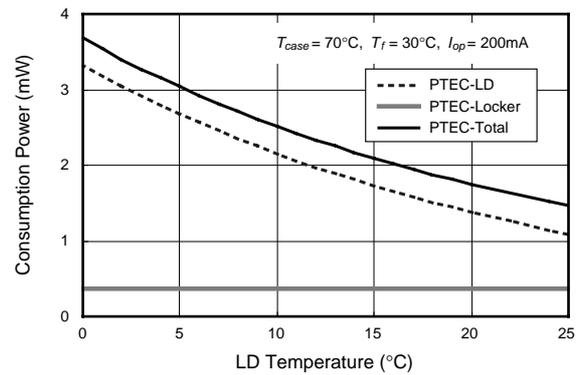


図9 TEC消費電力
TEC power consumption under $T_{case} = 70^{\circ}\text{C}$,
 $T_f = 30^{\circ}\text{C}$, $I_{op} = 200\text{ mA}$

くなる可能性がある。上記の評価のためにTECの負荷が大きくなる条件 $P_f = 20\text{ mW}$, $T_c = 80$, $T_f = 30$, $T_{LD} = 10$ の加速劣化試験を2000時間行った。結果を図8に示す。初期の段階で波長ドリフトが見られるが $+3\text{ pm}$ 以下で飽和していることが確認できる。

これらの結果から、信頼性を含めた波長のドリフトが25 GHz間隔10 Gbit/sのDWDMの許容範囲である $+/- 10\text{ pm}$ 以下となることが確認できた。

6. 消費電力

DWDMシステムにおいては非常に多くのレーザモジュールが使用されるため、システム全体の低消費電力化のためにはレーザの低消費電力化は重要である。本レーザモジュールは2つのTECを用いているために消費電力の増えることが懸念されるが、例えば短波側に波長可変を行う際、波長ロッカー部分は比較的高温である $T_f = 30$ 付近で一定に制御を行いレーザ部分のみを 0 付近に温調するため、それぞれTECの吸熱量は大きく異なる。各々の吸熱量に応じた最適なTECの設計を行うことにより低消費電力化が図られる。図9に駆動条件として $T_c = 70$, $T_f = 30$, 駆動電流 $I_f = 200\text{ mA}$ とTECへの負荷が大きい条件における $T_{LD} = 0 \sim 25$ でのTECの消費電力を示す。ここでTEC1をレーザ側TEC, TEC2を波長ロッカー側TECとした。 $T_{LD} = 0$ のTEC消費電力の合計は、4 W以下という低消費電力を実現している。また、 $T_{LD} = 0$ において消費電力4 W以下という低消費電力であるため、例えば4 nm波長可変を考えた場合、仕様温度範囲を比較的低温である $0 \sim 40$ に設定することができチップの高信頼性が期待できる。

7. おわりに

25 GHz間隔のDWDMに対応した波長ロッカーを内蔵したCW-DFBレーザ光源を開発した。DWDMシステムの適用において最も重要な波長ドリフト特性の評価をケース温度の変化、駆動電流の変化、長期信頼性の観点から行った。レーザ部と波長ロッカー部を独立して温調が可能な2つのTECを用いた構造と熱設計の最適化により、エタロンを高精度に温調することが可能となり、波長ドリフトのケース温度依存性が $+/- 1\text{ pm}$, 駆動電流依存性が $+/- 0.2\text{ pm}$ を実現した。また高温放置試験と加速劣化試験を行い、波長ドリフトに初期変動があるが $+/- 5\text{ pm}$ に飽和することを確認し、長期信頼性も含め波長のドリフトが $+/- 10\text{ pm}$ 以下となり25 GHz間隔のDWDMシステムに適用可能であることを示した。

参考文献

- 1) H. Nasu et al.: ECOC2001(2001)428.
- 2) H. Nasu et al.: OFC2002(2002)209.
- 3) T. Mukaiharu et al.: ECOC2002(2002)P2.7
- 4) 高木智洋 他, 電子情報通信学会2002年総合大会講演論文集, C-4-44
- 5) H. Nasu et al.: IEEE Photon. Technol. Lett., 15 (2003), 293.
- 6) ITU-T recommendation, G.692 V.5,(1998)28.