

光通信用高出力 CW-DFB レーザの開発

High-Power CW-DFB LDs for Optical Communications

高木 啓史*

Keishi Takaki

喜瀬 智文*

Tomofumi Kise

丸山 一臣*

Kazuomi Maruyama

平岩 浩二*

Koji Hiraiwa

山中信光*²

Nobumitsu Yamanaka

舟橋 政樹*²

Masaki Funabashi

粕川 秋彦*

Akihiko Kasukawa

概要 光通信用信号光源としての CW-DFB レーザは外部変調器との組み合わせで、WDM 通信や CATV 等に用いられている。本稿では、WDM 用途においてキーポイントとなる CW-DFB レーザの広波長帯域化、低駆動電流化と、CATV 用途として重要な高出力化、低ノイズ化を目的として開発した CW-DFB レーザについて報告する。

1. はじめに

近年急激な情報量増大が起きている光通信社会において、ファイバあたりの通信容量の大きな波長多重通信 (WDM) が広く用いられている。このような WDM システムにおいて、活性層周辺に周期的回折格子構造を有する分布帰還型半導体レーザ (DFB レーザ) はその高い単一波長選択性を特徴とし主に信号光源で用いられるキーデバイスであり、その用途によって様々なタイプに分類することができる (表 1)。この中で定光出力動作 (CW) タイプの DFB レーザは、LiNbO₃ 外部変調器等との組み合わせで主に大容量伝送が必要な長距離基幹系に用いられており、以下のような取り組みが行われている。

- (1) 広波長帯域
- (2) 狭チャンネル間隔
- (3) 高変調速度
- (4) 高出力・低駆動電流
- (5) 高信頼性

まず、(1) の広波長帯域化については、従来用いられていた C-band から、その長波側の L-band¹⁾ を中心に短波側の S-band へも波長範囲を拡大化することでチャンネル数の増加を図っている。つぎに、(2) に関しては、従来の 100 GHz (約 0.8 nm) 間隔から、50 GHz、さらには 25 GHz とチャンネル間隔を減らすことでチャンネル数を 2 倍、4 倍へと増加させている。このチャンネル間隔の狭幅化に関しては、高い波長の安定性が不可欠であり、波長ロッキング技術²⁾等の周辺技術の開発が盛んに行われている。(3) に関しては、外部変調器での変調速度を上げる取り組みがなされ 40 Gbps のものも出現するようになっており、(4) では従来の 10 mW、20 mW 品から 40 mW へと出力を

上げる取り組みがなされている。また、高出力化という点について、WDM 方式では主に周辺機器による損失を補償するという観点で考えられているが、CATV 等のアプリケーションでは、分岐数を増加させるために更なる高出力化が求められている⁴⁾⁻⁷⁾。例えば、CATV 等アナログ伝送においては非常に高い Signal to Noise (S/N) 比が必要とされるため、相対雑音強度 (RIN) の低減化、位相雑音を表すスペクトル線幅の狭幅化、などが課題として挙げられている。

以上のことを背景として、本研究では WDM 用 CW-DFB レーザにおけるキーファクターである広波長帯域化、低駆動電流化を行った。また、この技術の延長として、CATV 等の用途を対象とした高出力化、狭スペクトル線幅化について開発を行った。本稿は、2 章で素子構造とその作製技術、3 章で DFB レーザにおける特徴的なパラメータである結合係数や共振器長の最適化による高出力化への取り組み、4 章で L-band における活性層構造の最適化による広波長帯域化、5 章で CATV への応用におけるキーとなる狭スペクトル線幅化、6 章でまとめという構成をとっている。

表 1 主な DFB レーザの種類とその構造
Classified list and the characteristics of DFB lasers

種類	変調方法	伝送距離	伝送速度	値段	特徴
CW	外部変調器	長距離 数百 km ~	~ 40 Gbps	高	長距離 大容量
EA	変調器 内蔵	中長距離 ~ 数百 km	~ 10 Gbps	中	低チャープ 小型化
DM	直接変調	中距離 数十 km	~ 10 Gbps	中	低コスト 小型化
Uncooled	直接変調	近距離 ~ 数十 km	~ 2.5 Gbps	低	超低コスト 超小型化

* 横浜研究所 半導体研究開発センター

*² 横浜研究所 WE チーム

2. 素子構造と作製技術

本章では素子構造と作製技術について述べる。まず、本研究で用いたDFBレーザの素子構造を図1に示す。図1における素子構造の中で発光に寄与している活性層は、井戸数6の歪補償多重量子井戸構造を有しており、レーザの電流狭窄、導波路構造は埋め込みヘテロ型(BH)構造を有している。ここで、ファイバへの結合効率を高く維持しながら、水平方向の単一モード性を保つために、活性層幅は約 $2\mu\text{m}$ とした。これらの活性層周辺構造より得られる活性層周辺への閉じ込めの強さを反映した遠視野像(FFP)は垂直方向に約 24° 、水平方向に約 20° とファイバ結合に適した値をとった。またDFBレーザに特徴的な回折格子層には、吸収損失を防ぐために発振波長よりも大きなバンドギャップを有した材料を用いた屈折率結合型の構造を用い、高光出力効率・低駆動電流を実現するためにAR(Anti-Reflective)/HR(High-Reflective)非対称反射膜を両端面に施した。

つぎに、DFBレーザ作製におけるキーとなる回折格子製造技術について述べる。DFBレーザの発振波長は、電子ビーム(EB)描画装置によって非常に精度よく制御されており以下のように表現できる。

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 d_{\text{pitch}} \times n_{\text{eff}} \quad (1)$$

ここで、 λ_{Bragg} は回折格子周期より得られるブラッグ波長、 d_{pitch} は回折格子の周期、 n_{eff} は実効屈折率を表している。描画装置における回折格子周期の制御性から予測される波長制御性は約 10 pm 程度であるが、屈折率結合型DFBレーザの場合、端面位相に起因した $\pm 1\text{ nm}$ 程度の発振波長のばらつきがあるため、波長の制御性はこの値で決定される。このようにEB描画装置によって作製されたパターンをもとに、半導体エッチングを行い周期約 240 nm 程度($\lambda_{\text{Bragg}} = 1550\text{ nm}$ 相当)のパターンを作製した。このようにして作製された半導体層(InGaAsP層)パターンをInP層で埋め込むことで4層層とInP層の屈折率の異なる回折格子を形成した。

作製したDFBレーザのパッケージング形態は、2レンズ、アイソレータ、ペルチェ素子内蔵の14pinのバタフライ型モジュールを採用し、ファイバはPolarization Maintaining Fiber(PMFファイバ)を用いた。ファイバへの結合効率は約75%と非常に高い値を得た。

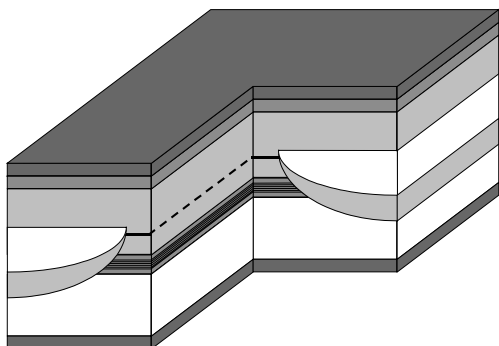


図1 本研究で用いたDFBレーザの部分欠損斜視図
Schematic figure of the distributed feedback laser diode (DFB LD) along the longitudinal and lateral section

3. 高出力DFBレーザ

まず、はじめに高出力化への取り組みについて述べる。高出力化についての主な設計パラメータとして、共振器長 L 、結合係数 κ 等が挙げられる。DFBレーザにおける特徴的なパラメータ κ は、回折格子による光の分布帰還率を表す量であり、回折格子層と埋め込み層の屈折率差、回折格子と活性層間の距離、回折格子層の厚さ等によって制御できる。図2に κL 値と光出力効率、最大光出力の関係を示す。図2より、 κL が小さくなるにつれて光出力は大きくなるという傾向が示された。

このようにDFBレーザの場合、様々な特性値(しきい値電流、光出力効率等)は κ 、 L に強く依存しており、 κL の値が大きくなると、共振器内部での帰還率が上がり、しきい値や光出力効率の減少がみられ、また κL が小さいときにはその逆となることが知られている。DFBレーザにおける単一モード性を保つための値として、 $\kappa L \sim 1$ 程度の値が最適値であると考えられておりこれらを考慮した κ 値の設計を行う必要がある。また、光出力の飽和は活性層付近の熱による影響が大きいためと考えられ、最大光出力を伸ばすためには、長共振器化が有効であると考えられる。このような長共振器タイプでは κ を小さい値で制御しなければならず、再現性等を含めて技術的に非常に難しいと考えられている。 $\kappa L \sim 1$ を保ちながら共振器長を変化させたときのモジュール L - I 曲線について図3に示す。図3において、 $L = 400\mu\text{m}$ のものでしきい値付近における光出力効率は 0.3 W/A 程度と非常に高い値を示し、ファイバ出力 20 mW 時

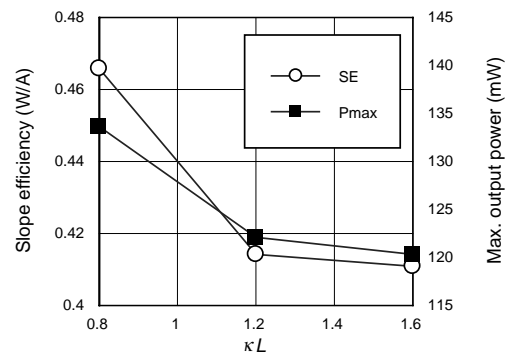


図2 共振器長 $400\mu\text{m}$ 時の光出力効率、最大光出力の κL 依存性
 κL dependence of the slope efficiency and the maximum output power with $L=400\mu\text{m}$

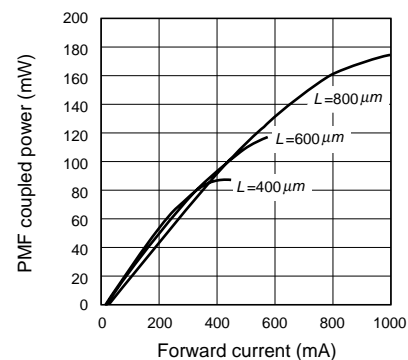


図3 様々な共振器長を有するLDMの L - I 曲線
 L - I curves of LDMs each having a different cavity length

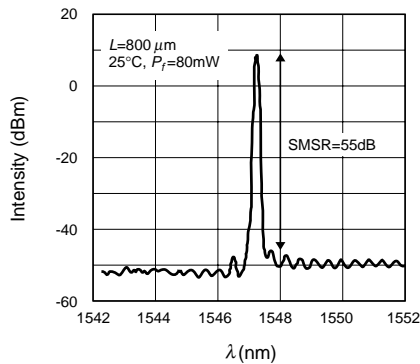


図4 $L = 800 \mu\text{m}$, 光出力 80 mW 時の発振スペクトル
Spectrum of the $L=800 \mu\text{m}$ cavity at an output power of 80 mW

表2 共振器長と各特性値との相関
Characteristics in the LDMs with different cavity lengths

L [μm]	I_{th} [mA]	Se [W/A]	I_{op} (40 mW) [mA]	R_{th} [K/W]
400	10	0.3	155	40
600	17	0.28	165	28
800	24	0.25	180	19

における低駆動電流 80 mA を実現した。長共振器化にとともに若干の光出力効率の減少はみられるものの、 $L = 800 \mu\text{m}$ のものにおいて光出力効率 0.25 W/A、最大光出力 175 mW を実現した⁸⁾。この最大光出力は2つのレンズ系、アイソレータ等を組み込んだ商用パッケージにおいては、世界最高出力である。つぎに、 $L = 800 \mu\text{m}$ のモジュールの発振スペクトルを図4に示すが、ファイバ出力 80 mW においても非常に高い副モード抑圧比 (SMSR > 50 dB) を得ることができた。また、長共振器化によって、注入電流増加時の活性層温度の上昇や発振波長の変化を抑制することができ、高い波長安定性を実現できることも長所として挙げられる。以上の結果より、長共振器化に伴うしきい値の上昇、光出力効率の減少はあるものの、どの共振器長においても非常に高い光出力効率、最大光出力を達成した。これらのレーザに対しWDM用途の10 mW-40 mWという出力レベルを考慮した場合、 $L = 400 \mu\text{m}$ のもので最小の駆動電流を得ることができ(表2)、また後述するCATV用途を考慮した場合には、800 μm の共振器において最大光出力 175 mW を得ることができた。

4. S-LバンドDFBレーザ

つぎに、WDMにおける重要要素の一つである広波長帯域化について述べる。現在のところ、C-bandにつづいてその長波長側のL-bandへの広帯域化が積極的に行われている。L-band領域では、C-bandと比較して有効質量やバンドギャップの変化による非発光再結合(価電子帯間吸収やオージェ非発光再結合)の増加、利得係数の減少によるしきい値の上昇、量子効率の低下やPhotonエネルギーの減少による光出力効率の低下等の特性劣化要因が考えられる⁹⁾。これらの問題を解決するために、活性層構造中の光やキャリアの閉じ込めの最適化を行った。

具体的な量子井戸構造の概念図を図5に示す。図5においてバリア層のバンドギャップを減らし、活性層とのバンドギャップ差 ΔE_g をC-bandと同等にすることによってバリア層へトラップされるキャリアを減らし、活性層周辺への光閉じ込めを強くした。このようにして作製したレーザの活性層構造特性を評価するために、回折格子層を含まないブロードコンタクトレーザについての評価を行った。ブロードコンタクトレーザのしきい値電流密度 J_{th} は、C-band品についての値 850 A/cm² (図5(a))と同じバリア層を用いた場合(図5(b))の1030 A/cm²と比較して、バリア層の組成を変更させたもの(図5(c))で880 A/cm²と低い値への改善がみられた。また、(c)のような活性層構造のしきい値より求められる特性温度 T_0 はC-L-band間とともに46 Kという値を得た。L-bandにおいてもC-bandと同様の特性温度を得たということは、レーザの温度変化を利用した波長可変レーザへの応用に適していると考えられる。

L-bandにおけるこのような検討を元にして、S-L-band間でのDFBレーザ作製を行った結果について図6に示す。図6は各バンドにおける*L-I*曲線の典型値を乗せたものである。L-bandにおいてもC-bandと比較した場合の特性劣化は小さく、ファイバ出力 40 mW を仮定した場合のチップ出力 60 mW 時の駆動電流において170 mA (C-band)、175 mA (L-band)、200 mA (S-band)という低駆動電流値を得た。S-bandにおいてはC-L-bandと比較して駆動電流が高いが、実用化に際して、ほとんど問題ないレベルにあると考えられている。最後に駆動電流の20%上昇時を故障として仮定したこれらのレーザの寿命は、25、チップ出力 60 mW (ファイバ出力 > 40 mW) に換算した値で73年以上と非常に高い信頼性を示した¹⁰⁾。

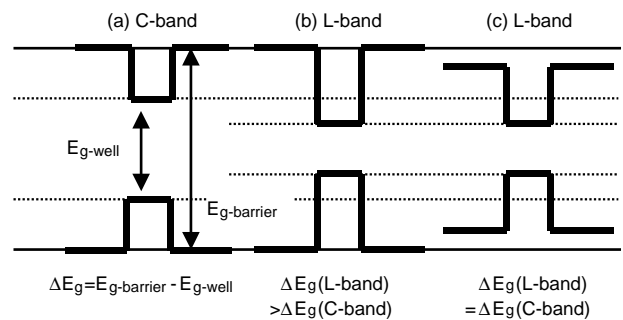


図5 L-bandにおける量子井戸構造の概念図
Improvement of MQW structure in L-band

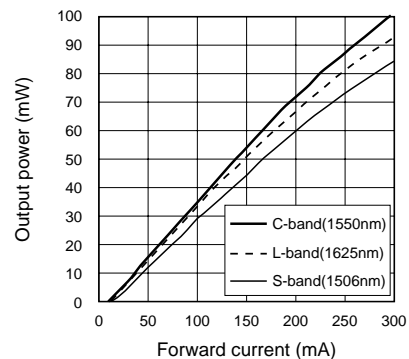


図6 S-L-bandにおける*L-I*曲線
L-I curves among S-L-band DFB LDs

5. 狭線幅化への取り組み

本章では、WDM用高出力CW-DFBレーザのCATVへの用途拡大のキーとなる狭線幅化について述べる。CATV用途では、光出力の増加は分岐数の増加に対応しており、80 mW以上の光出力も検討されている。また、アナログ伝送時においても高いS/N比を保たせるために、狭スペクトル線幅 ($\Delta\nu < 1$ MHz) やCATVの帯域 (0 ~ 1 GHz) において非常に低いRIN (< -160 dB/Hz) 等が要求特性として挙げられる。ここでは、特に狭スペクトル線幅化への取り組みについて述べる。一般的なDFBレーザの場合、そのスペクトル線幅は光出力の増加に対し狭幅化するという傾向にある¹¹⁾。しかし、高出力領域において共振器内部の光強度の不均一に起因するキャリア密度、屈折率等の不均一による線幅のリブロードニングが観測されている。端面に対称な反射膜を有する場合には、位相シフト構造を共振器中央に入れた多電極構造による内部の光強度の均一化によって線幅リブロードニングの抑制が行われている¹²⁾。しかし、高出力対応の端面に非対称反射膜を有した場合の線幅リブロードニングの抑制手段としては、広メサ幅化によりキャリア密度を減少させる方法などが考えられている⁵⁾。本研究では、長共振器化によって共振器内部のキャリア密度を減少させることで線幅リブロードニングの抑制を試みた。図7に様々な共振器長での光出力 - スペクトル線幅特性について示す。共振器長800 μm のもので最小線幅0.5 MHz、100 mW出力時での線幅0.8 MHzという狭線幅値を得た。また、共振器長を長くすることで、線幅リブロードニングを示す光出力値は大きくなり、またその量も抑制されるという結果を得た。このように長共振器化は、高出力時での狭線幅特性を満たすために非常に有効な手段であることが示された。また、RIN測定の結果を図8に示すが、CATV用途における要求帯域0 ~ 1 GHzにおいて、-160 dB/Hz以下という要求特性を十分に達成しているといえる。以上の結果より、CATV用途に必要な低ノイズ特性をファイバ出力100 mW以上の領域で達成することができた。最後に信頼性試験の結果を図9に示す。図9は、35 $^{\circ}\text{C}$ 、チップ出力120 mWにおける光出力一定時の駆動電流の変化率を示しているが、2000時間経過時における駆動電流の上昇率は1%以下の値を示した。これらの値は実用上問題ないレベルにあると考えられる。

6. おわりに

最後に本稿をまとめる。光通信用信号光源としてのCW-DFBレーザの高性能化に対して、以下のような取り組みを行った。まずWDM用途に関しては、従来のC-bandからその両側のS-band, L-bandにおいて低駆動電流化のアプローチを行った。特に、L-band領域では光、キャリアの閉じ込めを考慮して活性層構造の最適化を行った結果、S-L-bandにおいて、ファイバ出力40 mWに相当するチップ出力60 mW時の駆動電流値として200 mA以下の値を達成することができた。また、この高出力化技術の展開としてCATV用高出力かつ低ノイズCW-DFBレーザの開発を行った。具体的には、800 μm まで共振器長を伸ばすことによって最大光出力175 mW、80 mW時において線幅1 MHz、RINで-160 dB/Hzを実現することができた。

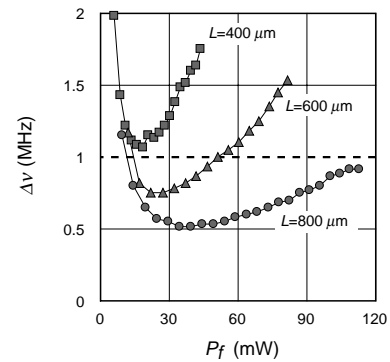


図7 様々な共振器長における光出力-スペクトル線幅図
Spectral linewidth versus output power for LD with a cavity length of 400 μm -800 μm

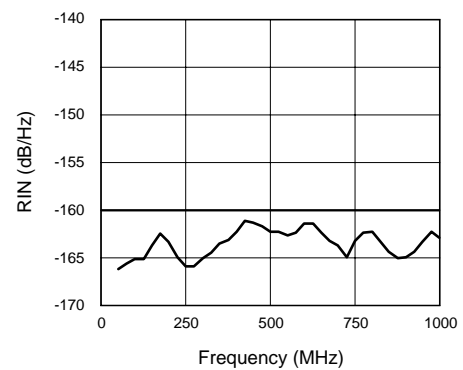


図8 0 ~ 1 GHzにおけるRIN測定結果
RIN data in 0-1 GHz. In all range, RIN < -160 dB/Hz was achieved.

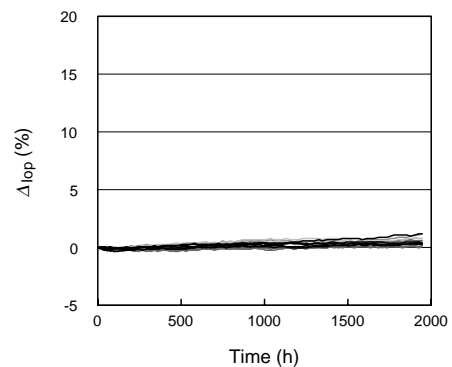


図9 35 $^{\circ}\text{C}$ 、チップ出力120 mWにおける2000時間APC動作における駆動電流の変化率
Changing rate of the operating current under 35 $^{\circ}\text{C}$ and 120 mW APC condition for 2000 hours

今後の展開としては、更なる高性能化や用途拡大等が考えられている。

謝辞

本研究を遂行するにあたりウェハプロセスから評価まで常に協力を頂いた半導体研究開発センターの方々へ感謝する。また、モジュール化工程においてはファイナル製品事業部の協力を得た、ここに感謝する。

参考文献

- 1) T. Kise et al., "Over 100mW high power operation of 1625nm L-band DFB laser diodes", LEOS 2001, Technical Digest ThQ5, pp. 802-803, Nov. 2001
- 2) H.Nasu et al., "40mW over DFB laser module with integrated wavelength monitor for 50GHz channel spacing DWDM application" ECOC 2001, Technical Digest We. P.25, pp.428-429, Oct. 2001
- 3) M. Funabashi et al., "Low Operating Current 40mW PM Fiber Coupled DFB Laser Modules for Externally Modulated 1550nm WDM Sources", ECOC Technical Digest Tu.B.1.3, pp. 122-123, 2001
- 4) J. D. Ralston et al., "High-Power fibre-coupled 1550nm DFB laser modules for externally-modulated fibre-optic transmission", Electron. Lett., 1997, 33, pp. 230-232
- 5) Y.Inaba et al., "High-Power 1.55- μ m Mass-Transport-Grating DFB Lasers for Externally modulated Systems", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., 2001, 7, pp.152-158
- 6) R. Menna et al., "High power 1550nm distributed feedback lasers with 440mW CW output power for telecommunication applications", CLEO Proc., 2001, CPD12-1-2
- 7) M. Funabashi et al., "High Power CW DFB Lasers and Modules for Externally Modulated WDM Sources", OECC 2002, Technical Digest 11C3-4, pp.478-479, July 2002
- 8) K. Takaki et al., "Spectral Linewidth Re-Broadening and Photon Density Distribution in 1550nm High Power CW-DFB Lasers", ISLC Conference Digest, 2002, MC3
- 9) 伊賀健一編著 "半導体レーザ" 応用物理学シリーズ, オーム社, (1994), 81
- 10) 品川達志他, "高信頼性ハイパワーDFBレーザ" 2002 信学全大, C-4-46, May, 2002
- 11) C. H. Henry.: "Theory of the Linewidth of Semiconductor Lasers", IEEE J. Quantum Electron., 1982, 18, pp259-264
- 12) M. Okai et al., "Corrugation-Pitch-Modulated MQW-DFB Laser with Narrow Spectral Linewidth(170kHz)", IEEE Photon Technol. Lett., vol. 2, no. 8, pp.529-530, 1990