波長分割多重通信システム用高出力 ファイバグレーティングレーザの作製とその基礎特性

那須 秀行, 大村 英之

古河電気工業(株) 情報電子研究所 (〒254-0016 神奈川県平塚市東八幡 5-1-9)

Fabrication of High-Power Fiber Grating Lasers for Wavelength Division Multiplexing Systems and their Fundamental Performance

Hideyuki NASU and Hideyuki OMURA

Information & Electronics Laboratory, The Furukawa Electric Co., Ltd.

5-1-9 Higashiyawata, Hiratsuka, Kanagawa, 254-0016

(Received March 26, 1998)

We fabricated Fiber Grating Lasers (FGLs) which consist of a Strained-Layer Multiple-Quantum-Well Semiconductor Optical Amplifier (SL MQW SOA) and an externally distributed Fiber Bragg Grating (FBG) reflector to evaluate its potential for use in Wavelength Division Multiplexing (WDM) systems. By using 600 μm long SL MQW SOAs, the fiber output power through an inline isolator is higher than 15 mW at 100 mA at 20 to 30 $^{\circ}\text{C}$. To the best of our knowledge, our resulting level of performance is higher than any previously reported. On the other hand, the limit of data rates is specified with relaxation frequency. In order to achieve high bit rates, a Bragg grating is positioned beside a lensed fiber end to obtain shorter cavity length. The lasers achieve 2.5 Gbit/s direct intensity modulation, according to evaluated relaxation frequency. We demonstrate this fabrication process and the fundamental performance of the packaged laser. These lasers have great potential for use in wavelength-specified, wavelength-stabilized, high-power, low-noise, and low chirping WDM transmitters.

Key Words: Fiber grating laser, Fiber Bragg grating, Wavelength division multiplexing, Semiconductor optical amplifier, Relaxation frequency

1. はじめに

波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)システム¹⁾では、発振波長の選別性、安定性の良い光源が要求されている。このような光源として、半導体光増幅器とファイバブラッググレーティング(FBG: Fiber Bragg Grating)の外部分布反射器から構成されるファイバグレーティングレーザ(FGL: Fiber Grating Laser)が考案され、検討されている²⁻⁷⁾。このレーザは、FBGのブラッグ波長を選別することで、発振波長を規定することが出来る。また、発振波長の安定性も優れており、文献5)では、15 $^{\circ}\text{C}$ から30 $^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で発振波長の変化量が、1Å以下と報告されている。さらに、外部分布反射器を用いているため、チャープニングが少なく⁸⁾、2.6Gbit/s及び2.5Gbit/sが低ペナルティで伝送可能であるとの実験報告がある^{6,7)}。

レーザの変調周波数帯域は、緩和振動周波数で制限される。FGLは外部分布反射器を用いているため、実効共振器長が、通常の半導体レーザより長くなる。その結果、緩和振動周波数は低くなり、変調可能な伝送速度は低くな

る。高速変調を実現するには、短い共振器を構成することが望まれる。

一方、長距離伝送システムでは、光出力の向上が望まれている。そのためには、高利得半導体素子を使用し、かつ素子長を長くすれば良い。

文献3)では、高出力FGLが報告されているが、注入電流180mAにおいて緩和振動周波数は2.5GHzであり、高速変調用途には適さない。そして、高出力かつ2.5Gbit/s以上の高速変調が可能なFGLはこれまでに実現されていない。

我々は、2.5Gbit/sの高速変調が可能なWDM送信器用高出力FGLの実現を目的として、利得素子に長さ600 μm の歪多重量子井戸(SL MQW: Strained-Layer Multiple Quantum Well)構造⁹⁾を有す半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)を用いて、FGLを作製した。短い共振器長を実現するため、先球レンズ形状を有すファイバ端に極めて近い位置にブラッググレーティングを書き込んだ。本報告では、レーザの作製及びその構成について述べる。また、光出力、緩和振動周波数を中心に、送信器用光源としての基礎特性について報告する。

2. ファイバグレーティングレーザ (FGL) の作製

FGLの構成をFig.1に示す。SL MQW SOAの長さ L_1 は $600\mu\text{m}$ である。高反射(HR: High Reflection)面の反射率は0.9, 無反射(AR: Anti-Reflection)面の反射率は 10^{-4} 以下となるように、各々コーティングを施した。ブラッググレーティングの長さ L_3 は 10mm , 半値幅は 0.1nm , ブラッグ波長 λ_B は 1504nm である。 λ_B における反射率は0.2である。光結合系を簡略化するために、ファイバ端面を先球加工した。ブラッググレーティングをレンズ化したファイバ端面近くに配置し、実効共振器長が短くなるように工夫した。作製工程において、まず紫外光照射により所望のFBGを作製した。次に、ブラッググレーティングの端から、先球加工により削られる長さ 0.4mm と 0.1mm のマージン分離した位置でファイバを切断した。これにより、レンズ化した端面からグレーティング端面までの距離 L_2 は、マージン分の 0.1mm と見積もることが出来る。次に、ファイバとSOAの光軸を調芯し、結合効率が最大となる位置でファイバを固定した。先球レンズの半径は $12\mu\text{m}$ であり、得られた光結合効率は0.5であった。AR面からレンズ端面までの間隔 D は $10\mu\text{m}$ である。

ブラッググレーティングの有効長を用いると、実効共振器長を求める上で便利である。文献[10]によれば、長さ L_3 の導波路に入射した光が端面で反射されて戻るときの位相遅れと、 λ_B から波長がずれたときの位相変化分を比較して、グレーティング有効長 L_{eff} を定義することが出来る。正弦波状の屈折率分布を有するFBGを仮定すると、

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \frac{\frac{-1}{\cosh^2(\gamma L_3)} + \tanh^2(\gamma L_3)}{\gamma \tanh(\gamma L_3)} \quad (1)$$

と表される。ここで、

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} \quad (2)$$

$$\delta = 2n_{\text{av}} \pi \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \quad (4)$$

である。 n_{av} は、グレーティングの平均屈折率、 Δn は屈折率差である。使用したFBGの反射率及び半値幅を与え、 Δn を求めた。(1)式に L_3 と Δn を代入した結果、 $L_{\text{eff}} = 3.5\text{mm}$ が得られた。

活性層の実効屈折率を n_1 , 空気中の屈折率を n_0 と表し、

Fig.1 Illustration for packaged FGLs.

Fig.2 I-L curves.

ファイバコアの屈折率はグレーティングの平均屈折率と等しいと仮定すると、実効共振器長 L_{cavity} は、

$$L_{\text{cavity}} = n_1 L_1 + n_0 D + n_{\text{av}} (L_2 + L_{\text{eff}}) \quad (5)$$

と表される。ここで、 $n_1 = 3.5$, $n_{\text{av}} = 1.47$ である。 $n_0 = 1$ とすると、 $L_{\text{cavity}} = 7.4\text{mm}$ となる。ブラッググレーティング及びSOAは同一のペルチェクーラの上に固定し、温度が一定となるように制御した。

3. レーザの基礎特性

I-L特性をFig.2に示す。アイソレーション60dBの光アイソレータ通過後の光出力を測定した。20°Cから30°Cの温度範囲において、しきい電流は25mA程度にあり、 0.22W/A のスロープ効率が得られ、過去の報告[2-5]よりも、高い光出力が得られた。発振波長は、 0.003nm/mA の注入電流依存性があり、電流増大に応じて、長波長側に移動した。また、ある注入電流にて、短波長側へモードホップが起こった。50mAの電流を注入した時の光スペクトラムをFig.3に示す。

Fig.3 Spectrum of a packaged laser where injection current is 50 mA and temperature is 25 °C.

Fig.4 Measured RIN as a function of frequency.

す。温度は25°C一定である。Fig.3のスペクトラムは、分解能0.1nmの光スペクトラムアナライザを用いた測定結果である。42.8dBのサイドモード抑圧比(SMSR: Side-Mode Suppression Ratio)が得られた。さらにヘテロダイン法によって、単一縦モード発振を確認した後、線幅を測定した。線幅は575kHzであり、分布帰還型(DFB: Distributed Feedback)レーザーの10MHz程度と比較して、非常に狭い。相対強度雑音(RIN: Relative Intensity Noise)特性をFig.4に示す。注入電流が大きい程、RINが改善され、特に0から2.0GHzの帯域が改善された。注入電流90mAでは、0から2.0GHzの範囲にて、RINは-155dB/Hz以下が得られ、FGLは低雑音光源であることが確認できた。微小信号入力時の緩和振動周波数の測定結果と計算結果をFig.5に示す。測定結果は、計算結果と良く一致し、注入電流70mA以上では、3.6GHz以上の緩和振動周波数が得られた。このレーザーを用いて、2.5Gbit/s信号の直接変調が十分可能である。

4. まとめ

高出力WDM送信器の実現を目的として、長さ600 μ mのSL MQW SOAを用いて、FGLを作製した。FGLは、過去の報告よりも高い光出力を実現し、かつレンズ作製の工程を工夫して、実効共振器長を短くしたことにより、直接変調による2.5Gbit/s信号の変調が可能である。さらに、低雑音、高SMSR等の優れた特性を有す送信用光源であることが確認できた。今後は、実導入を目指し、動特性を中心に検討

Fig.5 Relaxation frequency as a function of injection current. Temperature is 25 °C.

を進める予定である。

FGL作製に協力して頂いた粕川 秋彦主査, Dr. L. Li, Dr. Y. Chen, 入江 一郎氏, 三代川 純氏, 清水 健男グループリーダーに謝意を表します。

参考文献

- 1) N. Cheung, K. Nosu, and G. Winzer: IEEE J. Sele. Area. Commun. **8** (1990) 945.
- 2) P. A. Morton, V. Mizrahi, P. J. Lemaire, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, H. M. Presby, T. Erdogan, S. L. Woodward, M. R. Phillips, A. M. Sergent, and K. W. Wecht: *Proc. OFC'94, WG4* (1995) p.102.
- 3) P. A. Morton, V. Mizrahi, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, P. J. Lemaire, H. M. Presby, T. Erdogan, S. L. Woodward, J. E. Sipe, A. M. Sergent, and K. W. Wecht: *Appl. Phys. Lett.* **64** (1994) 2634.
- 4) R. J. Campbell, J. R. Armitage, G. Sherlock, D. L. William, R. Payne, M. Robertson, and R. Wyatt: *Electron. Lett.* **32** (1996) 119.
- 5) M. Ziari, A. Mathur, H. Jeon, I. Booth, and R. J. Lang: *Proc. NFOEC'97* (1997) p.503.
- 6) F. N. Timofeev, P. Bayvel, V. Mikhailov, P. Gambini, R. Wyatt, R. Kashyap, M. Robertson, R. J. Campbell, and J. E. Midwinter: *Proc. OFC'97, ThM1* (1997) p.296.
- 7) F. N. Timofeev, P. Bayvel, J. E. Midwinter, R. Wyatt, R. Kashyap, and M. Robertson: *Proc. ECOC'97, TU1A* (1997) p.1.
- 8) G. P. Agrawal and C. H. Henry: *IEEE J. Quantum Electron.* **24** (1988) 134.
- 9) A. Kasukawa, T. Namegaya, N. Iwai, N. Yamanaka, Y. Ikegami, and N. Tsukiji: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **6** (1994) 4.
- 10) F. Koyama, Y. Suematsu, S. Arai, and T. Tawee: *IEEE J. Quantum. Electron.* **QE-19** (1983) 1042.