高出力ファイバグレーティングレーザーの作製とその特性

那須 秀行, 鈴木 薫*, 青木 典之**

古河電気工業(株) 横浜研究所 (〒220-0073 神奈川県横浜市西区岡野2-4-3)

* 日本大学 理工学部電気工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14)

** 東京電力(株) システム研究所 (〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

Fabrication of High-Power Fiber Grating Laser and Its Performance

Hideyuki NASU, Kaoru SUZUKI,* and Noriyuki AOKI**

Yokohama R&D Laboratories, The Furukawa Electric Co., Ltd.

2-4-3 Okano, Nishi-ku, Yokohama, Kanagawa 220-0073

*Electrical Engineering, College of Science and Technology, Nihon University

1-8-14 Surugadai, Kanda, Chiyoda, Tokyo 101-8308

**Computer & Communication R&D Center, Tokyo Electric Power Company

4-1 Egasaki, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-8510

(Received October 21, 1999)

We theoretically considered suitable configurations of a fiber grating laser (FGL) to be used in wavelength division multiplexing (WDM) systems. We focused on the effect of composite reflectors where the effect of the front facet of a semiconductor optical amplifier (SOA) is especially significant. We simulated relaxation oscillation frequency and optical power to determine a configuration enabling high bit rates, up to 2.5 Gbit/s. After arriving at a suitable configuration, a packaged FGL has been fabricated. This laser achieves higher output power than any previously reported, and the potential for a rate of 2.5 Gbit/s was confirmed. Compared with a typical 1.55 μm MQW DFB laser, the lasing wavelength temperature dependence is less than half that of a DFB laser. As frequency chirping is remarkably reduced, the power penalty of the FGL is 3 times smaller than that of a DFB laser in transmission experiment with SMF of 70 km.

Key Words: Fiber grating laser (FGL), Fiber grating (FG), Wavelength division multiplexing (WDM), Semiconductor optical amplifier (SOA)

1. はじめに

ファイバグレーティングレーザー (FGL: fiber grating laser) は, 外部分布反射器であるファイバグレーティング (FG: fiber grating)^{1,2)} のブラッグ波長を選別することで, 発振波長を規定できるため, 高密度波長分割多重 (DWDM: dense wavelength division multiplexing) システムにおける有望な光源として検討が進められている. これまでにFGLを直接変調し, 2.5Gbit/s³⁾, 2.6Gbit/s⁴⁾ 及び10Gbit/s^{5,6)} という高速ビットレートによる伝送実験の報告がある. FGLは波長選択が容易であるという利点の他に, Q値の高い共振器を構成することにより線幅及びチャープングが狭い^{7,8)} という利点もあり, 幹線系DWDMシステムへの適用が期待されている.

FGLは外部共振器構造である故, 所望のレーザーの特性が得られるように各構成要素を設計する必要がある. まず半導体光増幅器 (SOA: semiconductor optical amplifier) 前端面と光結合系とFGによって構成される複合反射面の特

性を明らかにする必要がある. 特にSOA前端面には, 無反射 (AR: anti-reflection) コーティングが必要不可欠であり, 10^{-4} 以下の反射率が望ましいことが示唆されている⁹⁾が, その反射率の影響については明らかにされていない. 本報告では, まずこの複合反射面の特性について検討し, レーザーの発振特性への影響について考察した. 次に, 実際に送信器に適用するためには, 所望の光出力と所望の伝送速度を同時に実現する必要がある, これに見合う特性を有すFGLを設計しなければならない. 伝送速度は緩和振動周波数に依存しており, これはSOA長, グレーティング位置, グレーティング長さで決まる共振器長に支配されている. それ故, 所望な緩和振動周波数が得られるように構成を設計出来る指標が求められる. そこで我々はグレーティングの有効長¹⁰⁾を用いて実効共振器長を求め, 緩和振動周波数と光出力への影響を検討し, 特に長距離伝送システムへの適用を目的として高出力化の観点から最適な構成を導いた.

これらの設計指針を反映させてFGLを作製した^{11,12)}. そ

して、従来の光源であるDFB (distributed feed back) レーザーと比較しつつ、光信号送信用光源としての特性を明らかにし、光情報通信システムへの適用可能性について検討を行ったので報告する。

2. FGLの構成検討

2.1 複合反射面の検討

FGLは高反射(HR: high-reflection)面とAR面を有すSOAとファイバ端面がレンズ化されたFGからなる。Fig.1はFGLの構成図である。FGLは、共振器内に屈折率と長さの異なる境界を有し、各境界にて反射率を持つ複合共振器を有す。各々の領域における屈折率、長さ、反射率を図中に示した。\$C_{out}\$は光結合係数である。波長選択性反射器であるFGの電界反射率\$r_g\$は次のように表される。

$$r_g = \frac{-j\kappa \tanh(\gamma L_g)}{\gamma + \left(\frac{\alpha_g}{2} + j\delta\right) \tanh(\gamma L_g)} = |r_g| \exp(-j\phi) \quad (1)$$

$$\kappa = \frac{\pi \Delta n}{\lambda}, \quad \gamma^2 = \left(\frac{\alpha_g}{2} + j\delta\right)^2 + \kappa^2, \quad \delta = 2n_s \pi \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B}\right) \quad (2)$$

ここで\$\phi\$は電界反射の位相、\$\alpha_g\$は、ファイバコアにおける吸収や回折による損失である。\$\Delta n\$は屈折率変化、\$\lambda_B\$はブラッグ波長である。複合共振器の取り扱いを容易にするために、SOA前面からみた場合の複合反射率を\$r_{com}\$と定義すると、\$r_{com}\$は等価的にSOAの前端面において反射率及び反射位相を持った反射面として考えることが出来る。各領域における光波の伝搬、反射及び透過、結合を行列で表し、それぞれを\$\Phi_i, M_{ij}, C\$と各々定義すると、

$$\begin{bmatrix} E_5^+(z_5) \\ 0 \end{bmatrix} = M_{34} \Phi_4 M_{32} C \Phi_2 M_{21} \begin{bmatrix} E_1^+(z_2) \\ E_1^-(z_2) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_1^+(z_2) \\ E_1^-(z_2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Fig.1 Illustration of FGL and its compound cavity model.

と表されるから、複合反射率\$r_{com}\$と複合透過率\$t_{com}\$は次のように表すことが出来る。

$$E_5^+(z_5) = \frac{T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21}}{T_{22}} E_1^+(z_2) \equiv t_{com} E_1^+(z_2) \quad (4)$$

$$E_5^-(z_5) = -\frac{T_{21}}{T_{22}} E_1^+(z_2) \equiv r_{com} E_1^+(z_2) \quad (5)$$

次に、複合反射面の特性を考えるに当たり、電界反射率よりもパワー反射率の方が実測結果と比較でき、理解が容易であるので複合反射面のパワー反射率\$R_{com}\$を計算する。\$R_{com}\$は、複素反射率であるからパワー反射の位相\$\phi\$を用いて、次のように表される。

$$R_{com} = |R_{com}| \exp(-j\phi) \quad (6)$$

計算では、次のような仮定を行った。レンズドファイバによる結合系では\$L_2\$は波長の数倍程度の長さとなり、実験では\$L_2 = 10\mu m\$の時、結合効率\$\eta (= C_{out}^2)\$が最大となるので、\$L_2 = 10\mu m, \eta = 0.5\$とした。レンズドファイバ端面の反射率\$R_{23}\$には、実際に作製した時の測定結果から\$R_{23} = 7 \times 10^{-5}\$とした。屈折率は\$n_2 = 1, n_3 = n_g = 1.47\$とした。\$r_g\$は次の様に条件を与えて求めた。まず\$\lambda = \lambda_B\$におけるパワー反射率の振幅\$|R_g|\$と半値全幅\$\Delta\lambda\$を与えておき、次に\$\Delta n\$と\$L_g\$を求め、任意のFGの反射特性を得た。\$\lambda_B = 1550nm, |R_g| = 0.3, \Delta\lambda = 0.2nm\$とした。グレーティングの位置を\$\mu m\$オーダの精度で作り込むことは困難であり、\$L_3\$はせいぜい\$0.1mm\$程度の精度が限界である。そこで、\$L_3\$と\$\lambda = \lambda_B\$における\$|R_{com}|\$の関係を\$R_{12}\$をパラメータとして計算した。その結果をFig.2に示す。\$|R_{com}|\$は\$L_3\$に依存して周期的に変化し、その周期は、\$0.5\mu m\$程度である。このように、発振波長よりも短い長さの\$L_3\$に依存して\$|R_{com}|\$は共振特性を持ち変動する。図中に

Fig.2 Reflectivity amplitude of compound reflector (\$|R_{com}|\$) as a function of length between lensed fiber end and the edge of Bragg grating (\$L_3\$) where a parameter is AR facet reflectivity (\$R_{12}\$).

Fig.3 Relation between $|R_{\text{com}}|/|R_{\text{opt}}|$ and AR facet reflectivity (R_{12}).

示した $|R_{\text{opt}}|$ は $R_{12} = R_{23} = 0$ の場合の $|R_{\text{com}}|$ であり、複合反射が抑圧され、 $|R_{\text{opt}}| = \eta^2 |R_g|$ と一定値となる。変動幅は、 R_{23} に依存しており、 R_{23} が小さい程小さくなり、 $|R_{\text{opt}}|$ に近づく。次に $|R_{\text{com}}|$ の変動幅を $\Delta|R_{\text{com}}|$ と定義し、 R_{12} と R_{23} による影響を検討した。Fig.3に R_{12} と $\Delta|R_{\text{com}}|/|R_{\text{opt}}|$ の関係を示す。パラメータは R_{23} である。 $\Delta|R_{\text{com}}|$ が大きい程、しきい電流、光出力の変化が大きくなり、不安定要因となる。複合反射面の共振を抑圧するためには、 R_{12} 、 R_{23} 共に小さい程良い。しかしながら、ARコーティングによって実現できる反射率には限界がある。 R_{12} は 10^{-4} と 10^{-3} の間で傾きが大きく変化しており、 $R_{12} \leq 10^{-4}$ では $\Delta|R_{\text{com}}|/|R_{\text{opt}}|$ はほとんど変わらない。 $R_{23} \leq 10^{-4}$ においても $\Delta|R_{\text{com}}|/|R_{\text{opt}}|$ はほとんど変わらない。従って、複合反射面の共振特性を抑圧するための指標は、 R_{12} 、 R_{23} ともに 10^{-4} 程度であることが判る。

2.2 緩和振動周波数に関する検討

伝送速度の限界は緩和振動周波数 (f_r) を指標として見積もることができる。 f_r は共振器の光子寿命 τ_p に依存する。FGLの実効共振器長 L_{cavity} は、次のように表すことが出来る。

$$L_{\text{cavity}} = n_1 L_1 + n_2 L_2 + n_3 L_3 + n_4 L_{\text{eff}} \quad (7)$$

ここで、 L_{eff} はグレーティング有効長¹⁰⁾である。 L_{eff} を用いれば、グレーティングを集中的な反射器として表現できるので便利である。SOAのHR面とグレーティングの間を伝搬する光子寿命 τ_p は平均群速度 v_g の逆数として求められる。

$$\tau_p = 1/v_g$$

$$= \frac{L_{\text{cavity}}}{c \left\{ \alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 + \alpha_3 L_3 + \alpha_4 L_{\text{eff}} + \ln \left(\frac{1}{t_{12}^2 t_{23}^2 C_{\text{out}}^2 r_{01} |r_g|} \right) \right\}} \quad (8)$$

となる。 α_i は各領域における損失係数、 t_{ij} は、各境界の電界反射率、 c は真空中の光速である。ここで、 $f_r \propto (1/\tau_p)^{1/2}$ の関係があるので、 f_r は L_{cavity} が長い程低くなり、伝送速度が制限される。光信号を長距離伝送するには、光源の出力が高い方が有利である。高出力を実現するには L_1 を長くすることが望ましいが、 τ_p が長くなる故、 f_r が低くなる。

我々のSOAは、高出力を実現する歪多重量子井戸 (SL MQW: strained-layer multiple quantum well) 構造を用いている。この半導体素子は、文献(13)の高出力 $1.48\mu\text{m}$ レーザーと同じ構造であり、同じプロセスで作製された。ただし、利得帯域を $1.55\mu\text{m}$ 帯に移動させるために、多重量子井戸層の厚さを調整している。緩和振動周波数を低くするには、 L_{cavity} を短くする方が良いが、高出力を得るには L_1 を長くする方が良い、そこで、 $L_1 = 600\mu\text{m}$ と $L_1 = 300\mu\text{m}$ のSOAを用いる構成を想定して計算を行った。Fig.4は L_3 に対する τ_p と微小信号近似の f_r の関係である。 $\eta = 0.5$ 、 $R_{01} = 0.9$ とした。FGの特性は $|R_g| = 0.2$ 、 $\Delta\lambda = 0.1\text{nm}$ 、 $\lambda_B = 1.5\mu\text{m}$ である。定義したFGの反射特性となる L_g と Δn を求め、これらから L_{eff} が計算でき、 $L_{\text{eff}} = 3.5\text{mm}$ となる。ファイバ及び空気中の損失が無く、レンズ端面及びSOA前端面は十分にARコーティングされているものとした。

$L_1 = 600\mu\text{m}$ における f_r は、 $L_1 = 300\mu\text{m}$ の場合と比較して 0.5GHz 低くなる程度である。緩和振動周波数は L_2 にも大きく依存し、 10mm 程度で周波数は半分程度となる。

従って、高出力かつ 2.5Gbit/s の高速変調が可能となるFGLを実現するには $L_1 = 600\mu\text{m}$ とし、 L_2 をできるだけ短くするように工夫する必要がある。

3. FGLの作製

$L_1 = 600\mu\text{m}$ のSOAを用いて2.2章で定義した条件でFGLを作製した。また複合反射面の共振特性を抑圧するため

Fig.4 Simulated photon lifetime (τ_p) and relaxation oscillation frequency (f_r) as a function of length between lensed fiber end and the edge of a grating (L_3).

に、 R_{12} 及び R_{23} ともに 10^{-4} 以下となるようにARコーティングを施した。また、レンズ加工の過程を工夫して $L_3 = 0.1$ mmと短くした。光結合効率 η は、ミラー損失のパラメータであり、発振特性に寄与する。従って、しきい電流を低くするには、 η は高いほど良い。ファイバとSOAの位置関係には、結合効率が最高となる最適点が存在し、この位置関係からずれると η は低下するので、高い精度で光軸を調整し、固定する必要がある。作製したSOAのFFP(far field pattern)は垂直、平行ともに 25° 程度である。この時、 η が1dB劣化となる光軸の垂直面におけるずれは、 $\pm 0.6\mu\text{m}$ 、平行方向では、 $\pm 2\mu\text{m}$ 程度となった。モジュールを組み立てた結果、 $\eta = 0.5$ が得られた。SOAとファイバは、同一のペルチェ素子の上に組み立てられており、温度制御が可能である。

4. FGLの特性

4.1 I-L特性と緩和振動周波数

温度を 25°C 一定にし、FGLのファイバ出力(P_{out})と f_r を測定した。この結果をFig.5に示す。ファイバ出力は、FGLモジュールに接続したインライン型の光アイソレータ通過後の光出力である。高出力化のために、 $|R_g|$ を比較的小くしたため、光コネクタからの反射戻り光により発振特性が劣化する場合がある。光アイソレータを接続することで、安定な発振特性を得ることができた。アイソレータの挿入損失は1dBである。測定結果は、計算結果と良く一致し、注入電流70mAにて $P_{\text{out}} = 10\text{mW}$ となった。これまでの報告(例えば^{14,15)}と比較して高い出力が得られた。この時、 $f_r = 3.6\text{GHz}$ であり、2.5Gbit/sの直接変調が可能である。

4.2 光スペクトラム

注入電流50mA、温度 25°C にてFGLを駆動した時の光スペクトラムをFig.6に示す。図は波長分解能0.1nmの光スペク

Fig.5 Simulated and experimental results of optical power and relaxation oscillation frequency as a function of injection current at temperature of 25°C .

トラムアナライザを用いて測定した結果である。単一縦モード発振が観測され、サイドモード抑圧比(SMSR: side-mode suppression ratio)は42.8dBである。自己遅延ヘテロダイン法により、波長分解能を小さくして観測した結果がFig.7である。スペクトル線幅は575kHzであった。

4.3 雑音特性

周波数に対する相対強度雑音(RIN: relative intensity noise)特性をFig.8に示す。比較のために、現在通信用光源に用いられている定格出力4mWの標準的な $1.55\mu\text{m}$ MQW DFBレーザの測定結果も示した。FGLの出力は10mW、DFBレーザの出力は4mWである。 f_r は、DFBレーザでは7.0GHz、FGLでは3.6GHzにあり、RINが大きくなっている。2.5Gbit/s伝送の伝送帯域0~2GHzではFGLの方がRINは小さい。作製したFGLは雑音の面で優位な特性を有している。

4.4 発振波長の温度特性

モジュール内部のペルチェクーラを制御して温度を変化させた場合の発振波長を測定した結果をFig.9に示す。

Fig.6 Optical spectrum at injection current of 50 mA at temperature of 25°C .

Fig.7 Spectral linewidth measured by self-delay heterodyne method.

Fig.8 Measured RIN as a function of frequency.

Fig.9 Temperature dependence of lasing wavelength.

温度範囲は15°Cから30°Cである。また、従来の光通信用光源と比較するために1.55μm MQW DFBレーザの測定結果も示した。縦軸は、15°Cにおける発振波長を基準した波長変化である。注入電流は一定にした。DFBレーザは、0.087nm/°Cの温度依存性がある。これに対し、FGLは、

0.038nm/°Cと、1/2未満である。温度依存性は、FGLの方が小さく、優れていることが判る。FGLでは、23°Cにてモードホッピングがあり、連続的な波長変化をする温度範囲は、約6°Cである。波長の変化幅は、約0.25nmである。

4.5 周波数チャープング

FGLのチャープング特性を把握するために、線幅10MHzの1.55μm MQW DFBレーザを比較対象とし、チャープングスペクトラムを測定した。FGLの光出力を10mW、DFBレーザの光出力を4mW一定とし、周波数100MHzの正弦波信号を各々のレーザに直接入力して変調し、出力された変調光を線幅100kHzの波長可変光源のCW光と合波して、変調されたレーザのチャープングスペクトラムを得た。光変調度(OMI: optical modulation index)が0.3の時の測定結果をFig.10に示す。各々の図中には、無変調時及び変調時の測定結果が示されている。周波数変調成分が観測出来る範囲を周波数変動幅と定義すると、FGLのチャープ量は48MHz/mAであり、DFBレーザの180MHz/mAと比較して顕著に小さい結果が得られた。

4.6 伝送特性

FGLの緩和振動周波数は3GHz以上を実現できており、2.5Gbit/sの直接変調は可能であるが、SOAの寄生容量及びパッケージの高周波対策が不完全であったため、FGLモジュールの変調帯域は制限された。しかしながら、伝送特性を評価する上では、1.55μm MQW DFBレーザと同一の条件において伝送を行うことによって、FGLの優位性を検証することは出来る。そこで、155Mbit/sのNRZ信号にてレーザを直接変調し、符号誤り率(BER: bit error rate)を測定した結果をFig.11に示す。PRBSは2²³-1である。FGLとDFBレーザを用いて、SMF(single mode fiber)を70km伝送した処、DFBレーザでは、パワーペナルティは1dBであった。これに対し、FGLでは0.3dBとなり、DFBレーザの1/3未満であった。FGLは周波数チャープングが少ないため、波長分散の影響を受けにくい。従って、長距離の伝送に優位である。

(a) fiber grating laser

(b) DFB laser

Fig.10 Beat spectra for CW and directly modulated with OMI of 0.3.

Fig.11 155 Mbit/s BER performance with back to back and SMF 70 km.

5. まとめ

FGLを作製するために、共振器の複合反射面とレーザーの緩和振動周波数の観点から検討し、特に長距離WDMシステムへ優位となる高出力かつ高速変調が可能なFGLの構成を設計した。作製したFGLの光出力はこれまでの報告よりも高い結果が得られ、かつ緩和振動周波数の測定結果から、2.5Gbit/sの直接変調が可能であると判った。

さらに、一般的な1.55 μ m MQW DFBレーザーと比較して、作製したFGLの通信用光源としての適用可能性を評価した。その結果、伝送帯域における雑音は、DFBレーザーより小さかった。また、発振波長の温度依存性については、DFBレーザーと比較して1/2未満であった。FGLはモードホッピングが生じる場合があるが、線形に波長が移動する温度範囲内にて温度を一定に保てばこれは生じない。FGLはFGのブラッグ波長にて発振波長を規定するのであるから、所定の光出力にてブラッグ波長で発振するように温度制御を行えば良い。

また、FGLは、一般的なDFBレーザーと比較して、線幅が狭く、チャープングも狭い。実測したチャープ量はDFBレーザーと比較して1/3未満であった。155Mbit/sのNRZ信号を用いて、SMF70kmの伝送実験を行った結果、FGLのパワーペナルティはDFBレーザーの1/3未満となった。従って、FGLは特に長距離の伝送システムに優位である。

謝 辞

FGL作製に御協力頂いた古河電気工業の粕川 秋彦主査、入江 雄一郎氏、三代川 純氏に、有意義な討論をして頂いた麦野 明主任研究員、橋詰 直樹氏に謝意を表しますとともに、日頃御指導頂く神谷 保チーム長に深謝致します。また、日本大学理工学部の故中田 順治教授への哀悼の意を表するとともに、御指導に対し深謝致します。

参考文献

- 1) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and J. Albert: Appl. Phys. Lett. **62** (1993) 1035.
- 2) B. Malo, J. Albert, K. O. Hill, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and S. Theriault: Electron. Lett. **31** (1995) 879.
- 3) 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.
- 4) F. N. Timofeev, P. Bayvel, J. E. Midwinter, R. Wyatt, R. Kashyap, and M. Robertson: *Proc. ECOC'97*, TU1A (1997) p.1.
- 5) R. Paoletti, M. Meliga, G. Rossi, M. Scofet, and L. Tallone: IEEE Photon. Technol. Lett. **10** (1998) 1691.
- 6) F. N. Timofeev, P. Bayvel, R. Wyatt, R. Kashyap, I. F. Lealman, and G. D. Maxwell: *Proc. LEOS'98*, FJ4 (1998) p.360.
- 7) R. F. Kazarinov and C. H. Henry: IEEE J. Quantum Electron. **23** (1987) 1401.
- 8) G. P. Agrawal and C. H. Henry: IEEE J. Quantum Electron. **24** (1988) 134.
- 9) J. Archambault and S. G. Grubb: IEEE J. Lightwave Technol. **15** (1997) 1378.
- 10) F. Koyama, Y. Suematsu, S. Arai, and T. Tawee: IEEE J. Quantum Electron. **19** (1983) 1042.
- 11) 那須 秀行, 大村 英之: レーザー研究 **27** (1999) 51.
- 12) H. Nasu and H. Omura: *Proc. LEOS'98*, FJ2 (1998) p.356.
- 13) A. Kasukawa, T. Namegaya, N. Iwai, N. Yamanaka, Y. Ikegami, and N. Tsukiji: IEEE Photon. Technol. Lett. **6** (1994) 4.
- 14) P. A. Morton, V. Mizrahi, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, P. J. Lemaire, H. M. Presby, T. Erdogan, and S. L. Woodward: Appl. Phys. Lett. **64** (1994) 2634.
- 15) M. Ziari, A. Mathur, H. Jeon, I. Booth, and R. J. Lang: *Proc. NFOEC'97* (1997) p.503.