

デジタルコヒーレント通信用 狭線幅フルバンド波長可変レーザ

石川 務*・田中 宏和・柴田 雅央
田嶋 未来雄・岡 良喜・金子 俊光

Narrow Spectral Line-width Full-band Wavelength Tunable Laser for Digital Coherent Communication Systems — by Tsutomu Ishikawa, Hirokazu Tanaka, Masao Shibata, Mikio Tajima, Yoshiki Oka and Toshimitsu Kaneko — Full-band wavelength tunable lasers have been required to have high optical output power and narrow spectral line width for digital coherent communication systems. Sumitomo Electric Industries, Ltd. produces ITLAs (Integrable Tunable Laser Assemblies) using CSG-DR-LDs (Chirped-Sampled-Grating Distributed-Reflector Laser Diodes) as full-band wavelength tunable lasers suitable for high optical output power operation. The authors optimized MQW (multi quantum well) active layers of CSG-DR-LD and achieved high optical output power over +16 dBm and narrow spectral line width below 200 kHz. These characteristics make the lasers promising for 100 Gb/s digital coherent communication systems.

Keywords: tunable laser, optical power, line width, ITLA, digital coherent

1. 緒 言

情報通信トラフィックの急激な増大に対応するため、光ファイバ通信の分野においては、高密度波長多重技術に加えて、デジタル信号処理とコヒーレント通信を併用したデジタルコヒーレント通信技術の開発が進められている^{(1)~(3)}。従来の2値強度変調(OOK^{*1})に対して、偏波多重4値位相変調(DP-QPSK^{*2})や16値直交位相振幅変調(16QAM^{*3})等を用いることで、周波数利用効率が改善し、1波長チャンネル当りの伝送容量100Gbit/s以上が実現可能である。このような通信システムでは、送信光源や受信局発振光源として、光出力が大きく、スペクトル線幅の狭いフルバンド波長可変レーザが必要となる。

当社では、+16dBm以上の高光出力が可能なフルバンド波長可変レーザとして、CSG-DR-LD^{*4}を開発し^{(4)~(6)}、専用制御回路と一体化して、業界共通仕様であるOIF-MSA^{*5}に準拠したITLA^{*6}として製品化している⁽⁷⁾。本稿では、CSG-DR-LDの多重量子井戸(MQW^{*7})活性層構造を改良し、100Gbit/sデジタルコヒーレント通信用の光源として、+16dBm以上の高光出力と200kHz以下の狭線幅を実現したことについて、報告する。

2. 素子構造および動作原理

CSG-DR-LDの素子構造の概略を図1に示す。前端面側からSOA^{*8}領域、SG-DFB^{*9}領域、CSG-DBR^{*10}領域の3つの領域から成っており、両端面にはAR(Anti Reflection)コーティングを施している。レーザ共振器は、

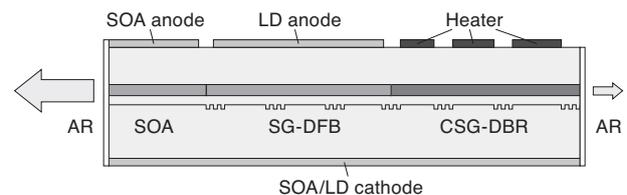


図1 CSG-DR-LD素子構造

アクティブ導波路であるSG-DFB領域の後にパッシブ導波路のCSG-DBR領域が接続されたDR(Distributed-Reflector)レーザ構造となっている⁽⁸⁾。この構成は、両端面をARコーティングしても、出射光を前端面から効率よく取り出せるため、高光出力動作に適している。また、通常のDBR(Distributed-Bragg-Reflector)レーザの構成⁽⁹⁾と異なり、回折格子中に適切な位相シフト構造を設けることで、位相制御領域が不要となる。

SG-DFB領域には、等間隔にサンプルドグレーティングが形成されており、LD(Laser Diode)電極への電流注入により、利得スペクトル中に周期的な利得ピークが発生する。一方、CSG-DBR領域では、サンプルドグレーティングの間隔を僅かにチャープさせており、各反射光の干渉効果により、反射スペクトル中に緩やかな包絡線形状を持つ周期的な反射ピークが現れる。この包絡線形状が緩やかな帯域透過型の波長フィルタとして機能する。ここで、CSG-DBR領域の表面には3つのヒータが設けられており、局所

的な発熱によって、各反射ピークの波長およびフィルタ波長（包絡線のピーク波長）を制御する。SOA領域は、動作中の光出力を調整するとともに、起動中や波長切り替え動作中には、発振波長が安定するまでの間、光出力を遮断することが可能である。

図2にCSG-DBRの反射スペクトル計算例を示す。3つのヒータが同じ温度の場合、フィルタ波長はブラッグ波長に合致しているが、各ヒータ間に温度差をつけることでフィルタ波長を調整できる。サンプルドグレーティングの間隔が短い方から長い方に向かって温度が上がるように温度勾配を与えると、フィルタ波長は長波長側に動き、逆にサンプルドグレーティングの間隔が短い方から長い方に向かって温度が下がるように温度勾配を与えると、フィルタ波長は短波長側に動く。フィルタ波長の変化量は、ヒータ間の温度差に比例する。ここでは、サンプルドグレーティングの間隔の長い方のヒータ温度から短い方のヒータ温度を引いた値 ΔT を、温度勾配を示す指標として用いている。すなわち、 ΔT が正のときフィルタ波長は長波長側に動き、 ΔT が負のときフィルタ波長は短波長側に動く。このようなフィルタ機能は、サンプルドグレーティング間隔の僅かな違いに起因しているため、比較的小さな温度差で広範囲にフィルタ波長を動かすことができる。計算結果によると、温度差 $|\Delta T| = 15\text{K}$ 程度でフルバンドカバー可能である。

このように、フィルタ波長、すなわち各反射ピークの包絡線形状は3つのヒータ間の温度勾配で決まるのに対して、各反射ピークの波長は全ヒータの平均温度で決まる。したがって、3つのヒータ間の温度勾配を一定にして、各ヒータの温度を同時に変化させることで、包絡線形状を変えずに各反射ピークの波長をシフトさせることができる。

CSG-DR-LDとしての波長可変機構は、SG-DFBの利得ピークとCSG-DBRの反射ピークによるバーニア効果を用いている。すなわち、互いの周期を僅かに異なるように設定することで、SG-DFBの各利得ピークのうち、CSG-DBRの反射ピークと合致したピークのみが発振モードとして選択される。CSG-DBRの各反射ピークの波長は、3つのヒータの平均温度に応じてシフトするため、SG-DFBの各利得ピークの中から任意のピークを発振モードとして選択できる。

しかしながら、バーニア効果による発振モード選択においては、SG-DFBの利得ピークの周期とCSG-DBRの反射ピークの周期の差で決まる波長間隔で再び両ピークが合致するモードが現れる。我々はこのようなモードを回帰モードと呼んでいるが、安定な単一モード動作のためには、これら回帰モードを抑制する必要がある。そこで、3つのヒータの平均温度を調整して所望のピークを選択するとともに、3つのヒータ間の温度勾配を調整して、CSG-DBRのフィルタ波長を選択した波長付近に設定することで、他の回帰モードを抑制し、安定な単一モード動作を実現している。

さらに、素子全体の温度を調整することで、SG-DFBの各利得ピークとCSG-DBRの各反射ピークの両方が同時に動く

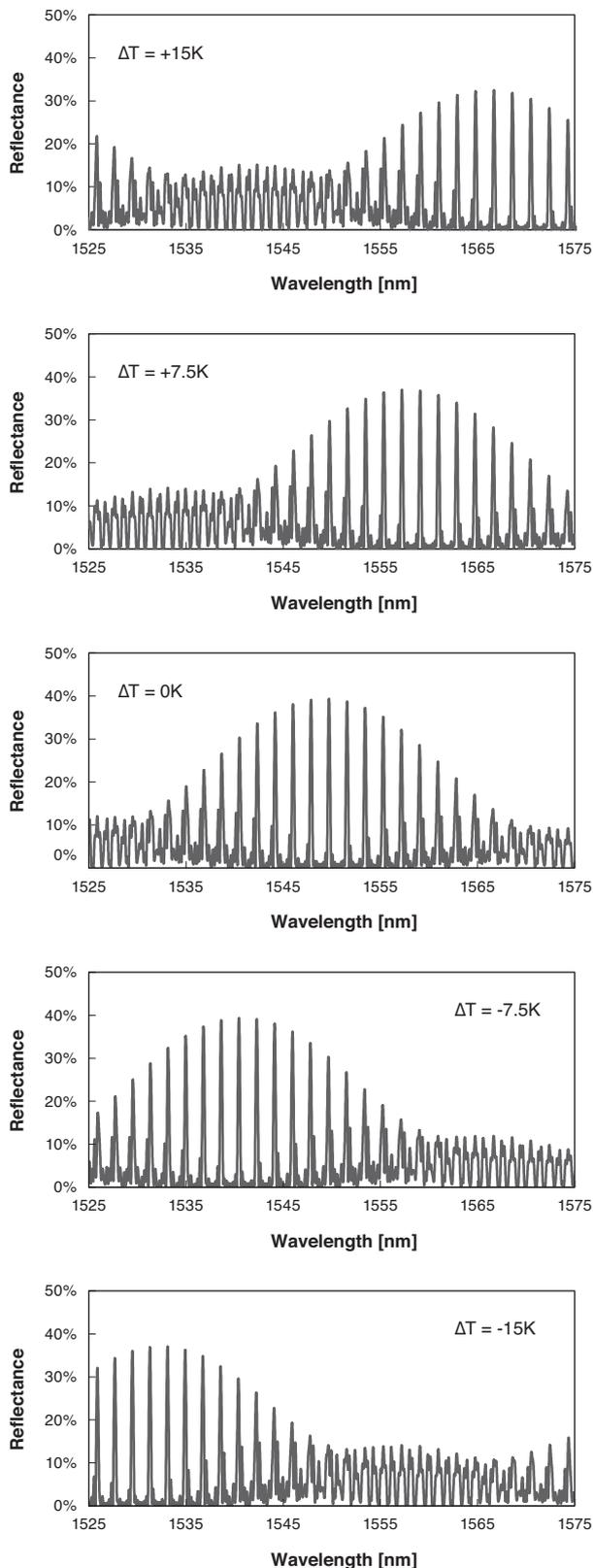


図2 CSG-DBR 反射スペクトル計算例

ため、選択した発振モードの波長を連続的に可変できる。

以上の波長制御方法を表1にまとめて示す。ここに挙げた3つの制御機構は互いに独立に設定可能である。また、基本的に屈折率の温度依存性に基づいているため、線形性がよく、シンプルな規則で記述できる。さらに、回折格子中に導入した位相シフト構造によって発振モードの位相が整合されているため、位相制御が不要となっている。

表1 波長制御方法

制御機構	制御パラメータ
発振モード選択 (バーニア効果)	3つのヒータの平均温度
CSG-DBR フィルタ波長調整	3つのヒータの温度勾配
発振モードの連続波長調整	素子全体の温度

数値はすべて2008年3月現在

3. 線幅増大係数の低減

半導体レーザのスペクトル線幅 $\Delta\nu$ は、次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$\Delta\nu = \frac{h\nu_g^2 g_{th} \alpha_m n_{sp}}{4\pi P} (1 + \alpha^2) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h はプランク定数、 ν は伝搬光の周波数、 ν_g は伝搬光の群速度、 g_{th} は発振モードの閾値利得、 α_m はレーザ共振器のミラー損失、 n_{sp} は反転分布パラメータ、 P はレーザ共振器の両端からの光出力の総和を表す。 α は線幅増大係数と呼ばれ、半導体レーザのスペクトル線幅を増大する主要因であり、光強度の揺らぎに起因するキャリア密度の揺らぎが、導波路の屈折率変化を介して、位相揺らぎを増大する過程を表している。線幅増大係数 α は、キャリア密度変化に対する屈折率変化の割合 dn_r/dN と利得変化の割合 dg/dN の比で決まり、次式で表される。

$$\alpha = - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dn_r/dN}{dg/dN} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 λ は伝搬光の波長、 N はキャリア密度、 n_r は伝搬光の等価屈折率、 g は伝搬光のモード利得を表す。キャリア密度変化に対する利得変化の割合 dg/dN は、微分利得とも呼ばれる。

線幅増大係数を低減するためには、微分利得 dg/dN を大きくする必要がある。CSG-DR-LDに用いられているMQW活性層においては、電流注入されたキャリアが効率よく量子井戸層で利得を発生することが重要である。特に、MQW活性層を構成する障壁層やSCH^{*11}層にオーバーフローしたキャリアは、利得に寄与しないにも関わらず、プラズマ効果による屈折率変化を引き起こすため、線幅増大係数を著しく増大させる。そこで、今回、CSG-DR-LDの

MQW活性層の構造を変更し、量子井戸のエネルギー障壁を高くすることで、障壁層やSCH層へのキャリアオーバーフローの抑制を試みた。

まず、線幅増大係数を比較するため、量子井戸のエネルギー障壁の異なるMQW活性層を用いてファブリ・ペローレーザを試作した。ファブリ・ペローレーザの発振閾値利得は、CSG-DR-LDに比べて、充分大きくなるように、レーザ共振器長を設計し、ファブリ・ペローレーザの発振閾値電流より充分小さい範囲で注入電流を変えながら、ASE^{*12}スペクトルを測定した。各電流におけるASEスペクトル中に現れるファブリ・ペローモード波長の変化から屈折率変化を算出すると同時に、ハッキ・パウリ法⁽¹¹⁾を用いて利得変化を算出して、線幅増大係数 α を算出した。従来のCSG-DR-LDに用いたMQW活性層と今回採用したMQW活性層の線幅増大係数 α の測定結果を図3に示す。ファブリ・ペローレーザの注入電流は、CSG-DR-LDの発振閾値利得に相当する電流である。量子井戸のエネルギー障壁を高くすることで、従来のMQW活性層に比べて、線幅増大係数が60%程度まで低減している。両MQW活性層における量子井戸の伝導帯エネルギー障壁の違いは、50meVである。これにより、CSG-DR-LDのスペクトル線幅は50%程度の低減が可能となる。

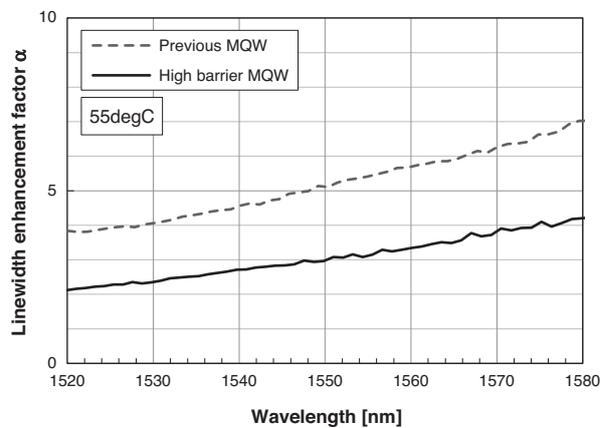


図3 線幅増大係数

4. レーザ特性および有効線幅

続いて、量子井戸のエネルギー障壁を高くしたMQW活性層を用いてCSG-DR-LDを試作し、特性評価した。第2節に示した方法で、各ヒータの温度と素子全体の温度を調整し、チャンネル間隔50GHzのITU-T^{*13}グリッドに合わせて、動作点を設定した。LD電極への注入電流は、175mAに設定している。図4に、ファイバ光出力とSOA電流を示す。200mA以下のSOA電流で、+16.5dBm以上の高光出力が

得られている。図5に、サイドモード抑圧比 (SMSR^{※14}) を示す。チャンネル間隔50GHzで122chの範囲 (波長範囲1523.75~1572.05nm) に渡って、45dB以上の安定した単一波長動作が確認された。図6に、エタロン弁別法で

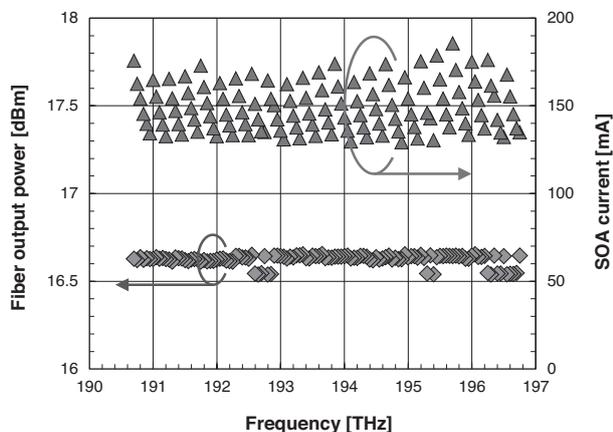


図4 光出力と SOA 電流

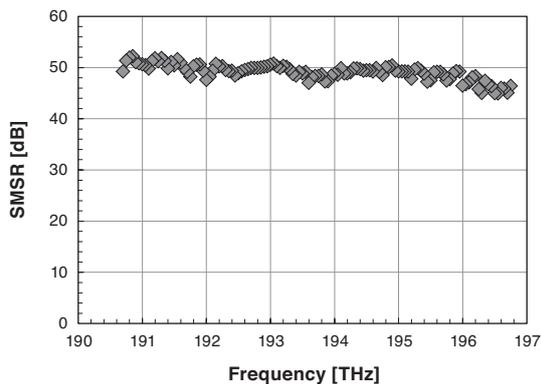


図5 サイドモード抑圧比

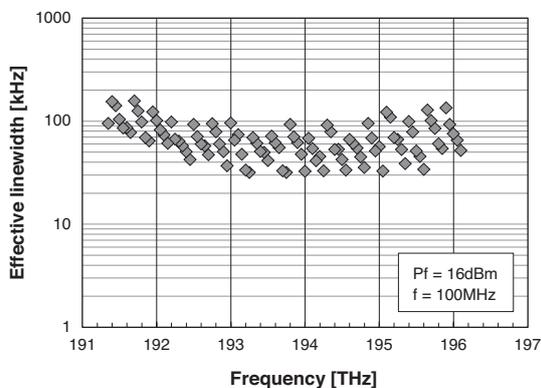


図6 有効スペクトル線幅

測定した有効スペクトル線幅⁽¹²⁾を示す。96chの範囲に渡って、200kHz以下の狭線幅が確認された。

5. 結 言

高光出力動作に適したフルバンド波長可変レーザ CSG-DR-LDにおいて、MQW 活性層を改良して線幅増大係数を低減することで、+16dBm以上の高光出力、および200kHz以下の狭線幅が実現された。伝送速度100Gbit/s以上のデジタルコヒーレント通信用の光源として有望である。

用語集

※1 OOK

On Off Keying

※2 DP-QPSK

Dual-Polarization Quadrature-Phase-Shift-Keying

※3 16QAM

16 Quadrature Amplitude Modulation

※4 CSG-DR-LD

Chirped-Sampled-Grating Distributed-Reflector Laser-Diode

※5 OIF-MSA

Optical-Internetworking-Forum Multi-Source-Agreement

※6 ITLA

Integrable Tunable Laser Assembly

※7 MQW

Multi Quantum well

※8 SOA

Semiconductor Optical Amplifier

※9 SG-DFB

Sampled-Grating Distributed-FeedBack

※10 CSG-DBR

Chirped-Sampled-Grating Distributed-Bragg-Reflector

※11 SCH

Separate Confinement Hetero-structure

※12 ASE

Amplified Spontaneous Emission

※ 13 ITU-T

International-Telecommunication-Union
Telecommunication-standardization-sector

※ 14 SMSR

Side Mode Suppression Ratio

参 考 文 献

- (1) S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of 40-Gbit/s polarization-multiplexed QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission", presented at the Optical Fiber Communications Conference (OFC), Anaheim, CA, Paper PDP29 (Mar. 2005)
- (2) S. Oda, T. Tanimura, T. Hoshida, C. Ohshima, H. Nakashima, Z. Tao, and J. C. Rasmussen, "112 Gb/s DP-QPSK transmission using a novel nonlinear compensator in digital coherent receiver", presented at the Optical Fiber Communications Conference (OFC), San Diego, CA, Paper OThR6 (Mar. 2009)
- (3) A. Sano, H. Masuda, T. Kobayashi, M. Fujiwara, K. Horikoshi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Matsui, M. Mizoguchi, H. Yamazaki, Y. Sakamaki, and H. Ishii, "69.1-Tb/s (432 x 171-Gb/s) C- and extended L-band transmission over 240 Km using PDM-16-QAM modulation and digital coherent detection", presented at the Optical Fiber Communications Conference (OFC), San Diego, CA, Paper PDKPB7 (Mar. 2010)
- (4) T. Ishikawa, T. Machida, H. Tanaka, Y. Oka, H. Shoji, T. Fujii, and S. Ogita, "A novel high output power full-band wavelength tunable laser with monolithically integrated single stripe structure", Proc. 33rd European Conf. on Opt. Commun., no.PD2.4, Berlin, Germany (Sept. 2007)
- (5) 田中宏和、石川務、町田豊稔、山内康之、岡良喜、藤井卓也、小路元、「高出力・広帯域波長可変レーザモジュール」、2008 信学全大、エレクトロニクス講演論文集1、no.C-4-20、p.303 (Mar. 2008)
- (6) 石川務、町田豊稔、田中宏和、金子俊光、岡良喜、田嶋未来雄、小路元、藤井卓也、「波長フィルタ機能を有するチューナブル反射器を用いた高出力単一ストライプ型フルバンドチューナブルレーザ」、信学技報、vol.108、no.114、LQE2008-30、pp.51-56 (Jun. 2008)
- (7) 岡本正明、坂野英一、近藤裕一、松村卓也、小野雅章、河村浩充、「高出力フルバンドチューナブルITLAの開発」、2010 信学全大、エレクトロニクス講演論文集1、no.C-3-65、p.238 (Mar. 2010)
- (8) J.-I. Shim, K. Komori, S. Arai, I. Arima, Y. Suematsu, and R. Somchai, "Lasing characteristics of 1.5 μm GaInAsP-InP SCH-BIG-DR lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-27, no.6, pp.1736-1745 (1991)
- (9) V. Jayaraman, Z.-M. Chuang, and L. A. Coldren, "Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings", IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-29, no.6, pp.1824-1834 (1993)
- (10) C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-18, no.2, pp.259-264 (1982)
- (11) B. W. Hakki, and T. L. Pao, "CW degradation at 300K of GaAs double-heterostructure junction laser II. Electronic gain", J. Appl. Phys., vol.44, pp4113-4119 (1973)
- (12) T. Kaneko, Y. Yamauchi, H. Tanaka, T. Machida, T. Ishikawa, T. Fujii, and H. Shoji, "High-power and low phase noise full-band tunable LD for coherent applications", presented at the Optical Fiber Communications Conference (OFC), San Diego, CA, Paper OWU7 (Mar. 2010)

執 筆 者

石川 務* : 伝送デバイス研究所



田中 宏和 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



柴田 雅央 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



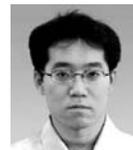
田嶋未来雄 : 解析技術研究センター



岡 良喜 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



金子 俊光 : 伝送デバイス研究所



*主執筆者