

# モード同期半導体レーザー光源

小 川 洋

## Mode-Locked Laser Diodes

Yoh OGAWA

A passively mode-locked laser diode (PML-LD) has excellent features of a high repetition frequency, a narrow pulse, and so on. However, the PML-LD is not synchronized to an external signal and has a large timing jitter due to the fluctuation of the carrier density in the cavity. A hybrid mode-locking (HML) is a simple and effective method for stabilizing a PML-LD. A 40 GHz PML-LD was stabilized by superimposing a sinusoidal electrical signal on the saturable absorber. In the case of a repetition frequency higher than 100 GHz, a subharmonic synchronous mode-locking (SSML) is very promising as a stabilizing technique. A 480 GHz colliding pulse mode-locked laser diode (CPM-LD) was stabilized by injection of a stable master laser pulse train repeated at a 48th subharmonic frequency of the CPM-LD's mode-locked frequency.

**Key words:** mode-locking, laser diode, ultrashort pulse, timing jitter

光通信システムは電子デバイスの高速化により大容量化を図り、現在 40 Gb/s システムが実用化されつつある。しかしながら、インターネットの普及による伝送情報量はシステムの大容量化のスピードを凌ぐ勢いで増大している。このため、光領域での多重化技術の研究開発が活発に行われ、現状で波長多重 (WDM) 技術<sup>1)</sup>が実用化されている。一方、光時分割多重 (OTDM) 技術<sup>2)</sup>は新たな超高速光デバイスの開発を必要とするため、現状では要素技術の研究開発の段階であるが、次世代超高速光通信ネットワーク実現技術として期待される。

光時分割多重システムはパルス光をパルス光で制御する通信方式であり、高品質なパルス光発生光源が不可欠である。短パルス光発生法はこれまで種々の方法が提案されているが、なかでもモード同期法は最も時間幅の狭いパルス光を発生する方法として、色素レーザーや固体レーザーによってその優位性が実証されている。一方、光通信用としては、サイズ、安定性などの観点から半導体レーザーをベースにした方法が有望である。半導体レーザーにモード同

期法を適用したモード同期半導体レーザーは、実用性の高い、高品質なパルス光源として光時分割多重システムのみならず、ソリトン伝送<sup>3)</sup>や波長多重システム、あるいは光計測システムなどへの応用が期待される。

本稿では、おもに超高速光通信への応用を考えたモノリシック型モード同期半導体レーザーについて述べる。

### 1. 素子構造および基本特性

図1に、モノリシック型受動モード同期半導体レーザーの素子構造の一例を示す<sup>4)</sup>。ここでは、利得領域および可飽和吸収体として InGaAsP/InGaAsP 多重歪み量子井戸層を用い、一方は順方向電流を流すことにより利得媒質として、他方は逆バイアス電圧を印加することにより可飽和吸収体として動作させる。また、受動導波路および DBR (distributed Bragg reflector) 領域はバンドギャップ波長約 1.3  $\mu\text{m}$  の InGaAsP バルク層からなる。ここで、DBR は波長フィルターとして動作しており、発振スペクトル波長の制御を目的として設けた付加的な領域である。素子長

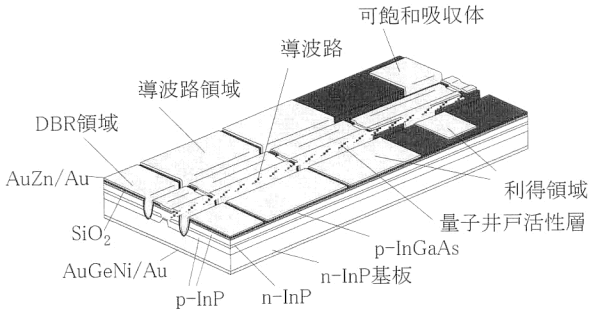


図1 モノリシック型受動モード同期半導体レーザーの素子構造。

約 1.1 mm の素子で、繰り返し周波数約 39.8 GHz、パルス波形は  $\text{sech}^2$  型に近く、パルス幅 3.8 ps が得られた。ここで、繰り返し周波数は素子長で決まるパルス光の周回周波数にほぼ一致している。また、パルス波形は受動モード同期の場合  $\text{sech}^2$  型になることが予想されており<sup>5)</sup>、理論と一致した結果となっている。また、スペクトル幅は約 0.8 nm で、時間帯域幅積は 0.38 と見積もられ、 $\text{sech}^2$  型の変換リミット値 0.31 に近い値が得られた。

## 2. 安定化技術

受動モード同期では自発的にパルス光を発生するため、外部電気信号と同期がとれず、また共振器内のキャリア密度の変動や温度変動などによる大きな時間ジッター（パルス間隔のゆらぎ）を生じる。この問題を解決するため、モード同期半導体レーザーに電気信号を重畳するか、パルス光を注入して安定化させる必要がある。前者をハイブリッドモード同期<sup>6)</sup>、後者を光シンクロナスモード同期<sup>7)</sup>とよぶ。このとき、印加する信号の周波数は受動モード同期動作時の繰り返し周波数近傍とするのが一般的であるが、繰り返し周波数が高い場合は、繰り返し周波数の整数分の一の信号（サブハーモニック信号）を用いることも可能である。サブハーモニック信号を用いることにより、制御信号を電氣的に制御可能な周波数にまで下げることが可能となる利点がある。ここでは、可飽和吸収体に周回周波数近傍の周波数の高周波を印加するハイブリッドモード同期と、モード同期レーザーの整数分の一の繰り返し周波数をもつ安定なパルス光列を注入するサブハーモニック光シンクロナスモード同期法 (subharmonic synchronous mode-locking; SSML)<sup>8,9)</sup> について述べる。

### 2.1 ハイブリッドモード同期法

図2に、可飽和吸収体に印加するRF (radio frequency) 信号の周波数を変えたときのパルス幅、RIN (relative intensity noise), および時間ジッターの測定結果を示す。

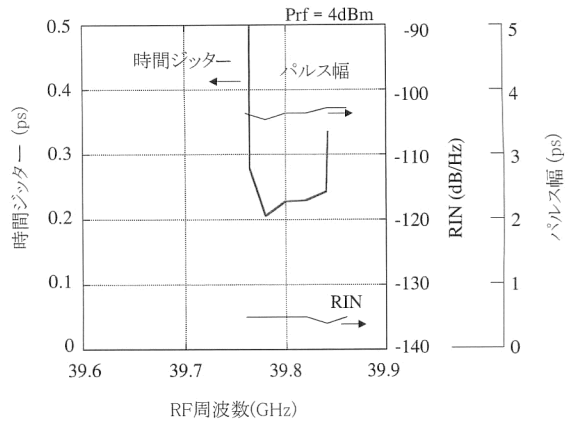


図2 ハイブリッドモード同期半導体レーザーのパルス幅、時間ジッター、およびRINのRF周波数依存性 ( $P_{rf} = 4$  dBm)。

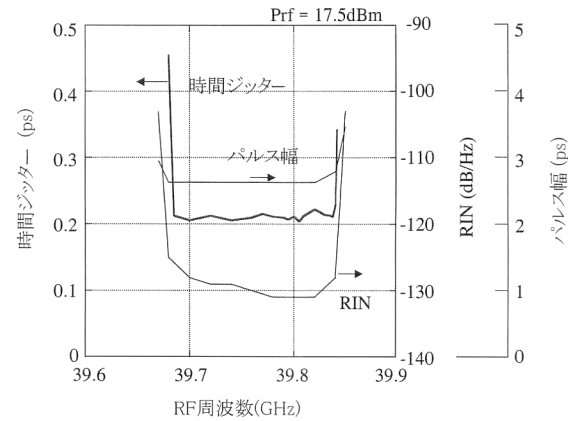


図3 ハイブリッドモード同期半導体レーザーのパルス幅、時間ジッター、およびRINのRF周波数依存性 ( $P_{rf} = 17.5$  dBm)。

ここで、RINはモード同期半導体レーザー出力の平均パワーに対する単位周波数あたりの雑音強度を表す。印加するRF信号のパワーを4 dBmとしたとき、RF周波数が39.8 GHz付近約80 MHzの範囲では、繰り返し周波数はRF信号と完全に同期し、時間ジッターはRF信号の時間ジッター程度まで低減している。このときの周波数範囲を同期帯域とよび、モード同期半導体レーザーの性能を示す重要なパラメータのひとつである。一方、この範囲外では時間ジッターは印加しているRF信号にほとんど影響されず、受動モード同期動作時の値となり、繰り返し周波数もRF信号とは無関係となっている。また、パルス幅とRINに関しては、測定した全周波数範囲にわたってRF信号には影響されず、受動モード同期動作時とほとんど変わらない。このことは、パルス波形はほぼ可飽和吸収体の光学的非線形性によって決定されており、印加しているRF信号は単にパルス位置のタイミングを制御しているこ

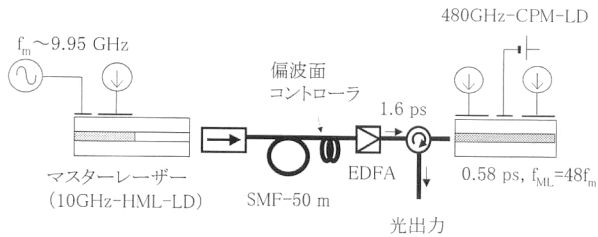


図4 サブハーモニック光シンクロナスモード同期実験系。

とを示している。ただし、RF パワーを強くしていくと、パルス波形も影響を受けるようになる。図3はRF パワーを17.5 dBm としたときのパルス特性であり、パルス幅が2.6 ps 程度に狭くなるとともに同期帯域幅も160 MHz 程度まで広がる様子が観測された。これは、受動モード同期動作に、外部からの電気信号による能動モード同期動作の効果が加わるためと考えられる。

## 2.2 サブハーモニック光シンクロナスモード同期法

図4にSSML実験系を示す。スレーブレーザーとして繰り返し周波数約480 GHzの衝突パルスモード同期半導体レーザー(colliding pulse mode-locked laser diode; CPM-LD)<sup>10)</sup>を、マスターレーザーとしては繰り返し周波数9.954 GHzのハイブリッドモード同期半導体レーザーを用いた。また、高繰り返しのパルス光列の時間ジッターの測定は、参照パルス光とのビート信号を発生して、そのビート信号の位相雑音から被測定パルスの位相雑音を見積もるダウンコンバート法を用いた<sup>11)</sup>。ここで、参照パルス光としてハイブリッドモード同期半導体レーザーを用いて発生した39.92 GHzのパルス光を用い、ビート発生デバイスとして半導体光アンプを用いた。ビート信号のRFスペクトルを図5に示す。CPM-LDにパルス光を注入しない場合(受動モード同期動作時)は明瞭なビート信号が観測されなかったのに対し、平均パワー12 dBmのパルス光を注入したとき(SSML動作時)には、CPM-LDの繰り返し周波数と参照パルス光の12次高調波とのビート信号が観測された。ビート信号スペクトルのシングルサイドバンド雑音(SSB雑音)からCPM-LDの出力パルス光列の時間ジッターを見積もったところ、0.14 psと良好な値が得られた。この結果は、SSML法により480 GHzモード同期レーザーのパルス発生タイミングがマスターレーザーパルス光によって律則されるため外部クロックとの同期が可能となること、ならびにモード同期周波数が完全にロックされる結果、位相雑音が低減されることを意味し、SSML法の有用性を実証する実験結果となっている。

モノリシック型受動モード同期半導体レーザーは、電子

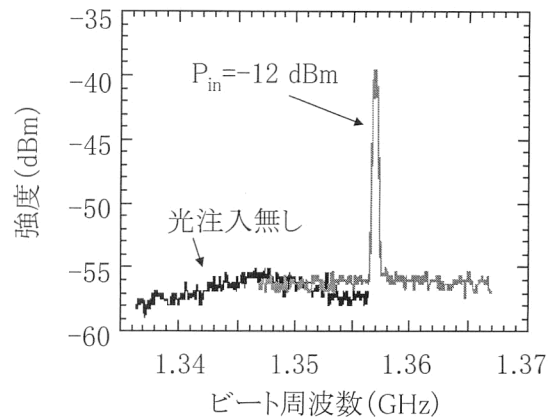


図5 ビート信号のRFスペクトル。

デバイスの応答速度に制限されない、高速のパルス光発生が可能である。ただし、外部の電気信号と同期がとれないため、このままではシステムに適用することはできないが、ハイブリッドモード同期や光シンクロナスモード同期により、受動モード同期半導体レーザーのすぐれた特性を損なうことなく制御可能なパルス光の発生が可能である。

モード同期半導体レーザーは次世代超高速光通信のキーデバイスであり、今後のさらなる進展を期待したい。

本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)から研究を委託されたフェムト秒テクノロジー研究機構(FESTA)の研究の一環として行った。

## 文 献

- 1) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara and T. Ono: "10.92-Tb/s (273×40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," *OFC2001*, PD24-1 (Anaheim, CA, 2001).
- 2) M. Nakazawa, E. Yoshida, T. Yamamoto, E. Yamada and A. Sahara: "TDM single channel 640 Gb/s transmission experiment over 60 km using 400 fs pulse train and walk-off free, dispersion flattened nonlinear optical loop mirror," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 907-908.
- 3) M. Nakazawa, E. Yamada, H. Kubota and K. Suzuki: "10 Gbit/s soliton data transmission over one million kilometers," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 1270-1272.
- 4) S. Arahira, Y. Matsui, T. Kunii, S. Oshiba and Y. Ogawa: "Transform-limited optical short-pulse generation at high repetition rate over 40 GHz from a monolithic passive mode-locked DBR laser diode," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **5** (1993) 1362-1365.
- 5) H. A. Haus: "Modelocking of semiconductor laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) 1007-1020.
- 6) S. Arahira, N. Mineo, K. Tachibana and Y. Ogawa: "40 GHz hybrid modelocked laser diode module operated at ultra-low RF power with impedance-matching circuit," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 287-289.
- 7) H. Yokoyama, T. Shimizu, T. Ono and Y. Yano: "Synchro-

- nous injection locking operation of mode-locked diode lasers," *Opt. Rev.*, **2** (1995) 85-88.
- 8) S. Arahira and Y. Ogawa: "Synchronous mode-locking in passively mode-locked semiconductor laser diodes using optical short pulses repeated at subharmonic of the cavity round-trip frequency," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 191-193.
  - 9) X. Wang, H. Yokoyama and T. Shimizu: "Synchronized harmonic frequency mode-locking with laser diodes through optical pulse train injection," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 617-619.
  - 10) Y. K. Chen and M. C. Wu: "Monolithic colliding-pulse mode-locked quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2176-2185.
  - 11) S. Arahira, Y. Katoh, D. Kunimatsu and Y. Ogawa: "Stabilization and timing jitter reduction of 160 GHz colliding-pulse mode-locked laser diode by subharmonic-frequency optical pulse injection," *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C** (2000) 966-973.

(2003年6月2日受理)