

研究

波長可変受動モード同期 DBR-LD

荒平 慎・大柴小枝子・松井 康浩
国井 達夫・小川 洋

沖電気工業(株)半導体技術研究所 〒193 八王子市東浅川町 550-5

(1993年11月22日受付, 1994年1月13日受理)

Wavelength-Tunable Passively Mode-Locked DBR-LD

Shin ARAHIRA, Saeko OSHIBA, Yasuhiro MATSUI,
Tatsuo KUNII and Yoh OGAWA

Semiconductor Technology Laboratory, OKI Electric Industry Co., Ltd.,
550-5, Higashi-asakawa, Hachioji 193

(Received November 22, 1993; Accepted January 13, 1994)

We have fabricated a monolithic passively mode-locked distributed Bragg reflector laser diode (DBR-LD) for the first time. Transform-limited optical short pulses of a duration of 4-5 ps has been successfully generated at a high repetition rate of 40 GHz. The effect of spectral filtering by the DBR section on the achievement of the mode-locking has been investigated in detail. Wide lasing wavelength-tuning of 4 nm has been achieved by injecting bias current in the DBR section of the LD. The pulse width and pulse peak power were about the same and the transform-limited condition was maintained through the tuning. This LD is promising as an optical source for wavelength-division multiplexing optical soliton transmission systems.

1. はじめに

ピコ秒～サブピコ秒オーダーの超短光パルス発生技術は物質の緩和過程などの超高速現象の観測や光サンプリング,あるいは将来の超高ビットレート光ソリトン通信¹⁻⁵⁾の実現のために必要不可欠である。光ソリトン通信の場合,光パルスが変換リミット(光パルスとそのスペクトルとが互いにフーリエ変換の関係満足する状態)であるという条件は伝送特性に大きな影響を与え非常に重要である⁶⁾。

従来,光ソリトン通信用光源として用いられてきた利得スイッチ分布帰還型半導体レーザー(DBF-LD)から得られる光パルスはキャリア密度の変動に基づく光パルス中での動的波長変化(チャーピング)を持つため⁷⁾,ソリトン伝送するためには光ファイバ^{3,4)}や波長フィルタ⁵⁾といった煩雑なチャーピング補償手段が必要とされた。一方,モード同期法は利得スイッチ法やQ-スイッチ法といったレーザー発振のスイッチングを利用した

光パルス発生法と異なり,数本の縦モードの位相同期によって光パルスを得る方法であり,他の光パルス発生法と異なり変換リミットな光パルスが得られるという利点がある。したがって,モード同期レーザーは光ソリトン伝送に用いる際に付加的なチャーピング補償手段を必要としない。特に半導体モード同期レーザーは以下にまとめるような特徴を備えているため光ソリトン通信用光源への応用を期待した研究開発が近年活発になっている⁸⁻¹²⁾。

- (1) 広いゲイン幅(～25 nm)を持つため,サブピコ秒オーダーの超短光パルスの発生が可能である。
- (2) 共振器長が短いため,100 GHzを越える超高速繰り返しの超短光パルスの発生が可能である。
- (3) 光ファイバの最低損失波長領域(1.55 μm)での発振が可能である。
- (4) 小型で堅固,安定であり,変調器などの他デバイスとの集積化が可能である。

一方,10 Gbit/sを越えるような超高ビットレート光

通信においては高ビットレート化のための信号の多重化技術が必要とされる。光ソリトン通信においては時間多重^{2,3)}、あるいは波長多重光ソリトン通信¹³⁾が今日までに提案されてきた。特に波長多重光ソリトン通信においては広域な波長可変幅を持つ変換リミットな光パルス光源、すなわち波長可変モード同期 LD の開発が必要とされる。波長可変モード同期 LD については過去半導体のバンドギャップ波長の温度依存性を利用した方法が AT&T の Wu らによって報告されている¹⁴⁾。しかし、素子の温度特性を利用したこのような方法はまた素子特性の劣化を伴い、余り好ましくない。より簡便で、かつ素子特性 (パルス幅や光出力) の劣化をなるべく抑えた方法で広域な波長可変特性が得られるほうが望ましい。

本論文では今回我々が開発した利得領域、可飽和吸収領域、波長選択領域 (ブラッグ反射鏡) を集積化した多電極受動モード同期 distributed bragg reflector laser diode (DBR-LD)⁹⁾ と、その波長可変特性について報告する。

2. 素子構造

今回開発した受動モード同期 DBR-LD の素子構造を Fig. 1 に示す。素子は MO-VPE 法を用いて5回の結晶成長で作成した。電流狭窄および屈折率導波構造を実現するため、素子の横方向の構造は buried hetero 構造とした。導波路幅は $1\mu\text{m}$ 程度である。素子は4電極構造を持ち、各電極は可飽和吸収領域、利得領域、位相調整領域、DBR 領域に対応する。それぞれの領域の長さは可飽和吸収領域: $75\mu\text{m}$ 、利得領域: $750\mu\text{m}$ 、位相調整領域: $150\mu\text{m}$ とし、DBR 領域は $0\sim 500\mu\text{m}$ とした。また、電極分離部の長さは $20\mu\text{m}$ とした。電極間の分離抵抗は約 $1\text{k}\Omega$ であった。可飽和吸収領域と利得領域

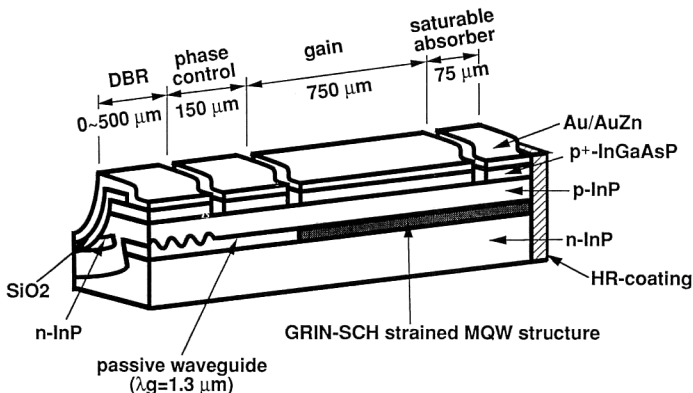


Fig. 1 Schematic cross section of a monolithic passively mode-locked DBR-LD used in this study.

の活性層は3層の圧縮歪量子井戸構造とした (井戸: InGaAs, 厚さ 40\AA , ウェル: InGaAsP, 厚さ 130\AA).

歪量子井戸構造の微分利得は注入電流に強く依存し、注入電流の増加に伴い減少する¹⁵⁾。受動モード同期においては可飽和吸収領域の飽和エネルギーは利得領域の飽和エネルギーよりも小さくなければならない。飽和エネルギーは微分利得に反比例するため、歪み量子井戸構造のもつこのような強い利得飽和特性は受動モード同期に適している¹⁶⁾。

光閉じ込め係数を高くし素子のしきい値を低減するため、導波層には grating index 構造を採用した。また、位相調整領域と DBR 領域の導波層にはバンドギャップ波長 $1.3\mu\text{m}$ のバルク構造を採用した。利得領域と位相調整領域の結合部分は butt-joint 構造とし、80% 以上の高い結合効率を得た。また、素子のしきい値低減のために可飽和吸収体側端面を高反射膜コーティングし、光出力は DBR 側端面から取り出した。両端面からでてくる光パルスの形状は同じで回折格子によって生じるチャージングの影響はほとんどないものと思われる。

3. 素子特性

3.1 DBR 長依存性

モード同期法の場合、屈折率分散により同期がかからないモードの影響を避けるため、レーザー共振器内にスペクトルフィルタを入れて発振モード数を減らしてやるのが一般的となっている^{8-10,17,18)}。逆に言えば、フィルタを入れることにより発振波長のコントロールが可能となる。DBR-LD の場合、DBR 領域がスペクトルフィルタとしての役割を持つわけだが、その振る舞いは DBR 長によって大きく変化する。スペクトルフィルタのモード同期に与える影響を調べるため、DBR 長を変えた素子について素子特性を調べた。

まず、DBR 長が $0\sim 50\mu\text{m}$ の素子については発振波長は $1.58\sim 1.6\mu\text{m}$ でほぼ活性層のフォトルミネッセンスのピーク波長で縦多モード発振した。この素子の可飽和吸収領域を接地あるいは逆バイアス電圧を印加し、利得領域にのみ電流を流した場合の電流-光出力特性は、しきい値での光出力の不連続な飛びとヒステリシスを示した (双安定)。これは、非電流注入領域がある一定以上の光強度で透明となり、可飽和吸収体として働いていることを示している。しかし、この素

子においては可飽和吸収体の逆バイアス電圧や利得領域の注入電流を変えてもモード同期は起こらなかった。

一方、DBR 長を $500 \mu\text{m}$ と長くした素子については、電流-光出力特性での双安定は示したものの常にブラッグ波長近傍で縦単一モード発振し、モード同期はかからなかった。

モード同期は DBR 長が $100 \mu\text{m}$ 前後の素子において達成された。これら DBR 領域の長さの効果を定性的に議論するため DBR 長を変えた場合の DBR 反射率プロファイルを計算した。DBR の複素反射率 r は次式で与えられる¹⁹⁾。

$$r = \{ [\gamma r_0 \exp\{-j(2\beta_0 L_B + \phi)\} \cosh(\gamma L_B) - [(\alpha/2 + j\delta)r_0 \exp\{-j(2\beta_0 L_B + \phi)\} + j\kappa] \sinh(\gamma L_B)] / [\gamma \cosh(\gamma L_B) + [(\alpha/2 + j\delta) + j\kappa r_0 \exp\{-j(2\beta_0 L_B + \phi)\}] \sinh(\gamma L_B)] \} \exp(j\phi)$$

ただし $\delta = 2\pi n_{\text{eq}}(1/\lambda)(1/\lambda_B)$, $\gamma^2 = (\alpha/2 + j\delta)^2 + \kappa^2$

ここで、 κ は結合係数、 α は吸収係数、 ϕ は回折格子の初期位相、 L_B は DBR 長、 r_0 は DBR 端面の反射率、 λ_B はブラッグ波長、 n_{eq} は等価屈折率である。

Fig. 2 に DBR 領域の長さを変えた場合の DBR のエネルギー反射率プロファイルの変化を示す。ただし、各パラメータの値は、 $\kappa = 20 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\phi = 0$ 、 $r_0 = 27.4\%$ (へきかい面)、 $\lambda_B = 1560 \text{ nm}$ 、 $n_{\text{eq}} = 3.2$ とした。また、入射端面の反射率はゼロとした。反射率プロファイルにいくつかのピークが見えるが、これは端面反射によるもので、その間隔は DBR 領域を通常のファブリペロ-エタロンと考えた場合の自由スペクトル領域 (FSR) とほぼ等しい。

Fig. 3 に DBR 長を変えた場合の主ピーク (ブラッグ波長近傍) の反射率およびバンド幅の変化を示す。DBR 長を長くするに従い、主ピークの反射率が高くなると同時にバンド幅が狭くなる。このことは長い DBR 領域は狭帯域波長フィルタとして働くことを示しており、そのため、長い DBR 領域を持つ DBR-LD は縦単一モード発振しやすい。しかし、このような長い DBR 領域をモード同期の波長フィルタとして使うことを考えた場合、狭帯域のフィルタは光パルス幅を広げる効果を持ち、可飽和吸収体による光パルスの短縮化を妨げる。DBR 長の長い素子においてはモード同期が達成されなかったのはそのためと思われる。それに対し、DBR 領域を短くすると、ピーク反射率は小さくなるが、バンド幅は大きくなる。したがって、DBR 領域の長さを適度に短くすると、主ピークのバンド幅が広く取れ、かつ、ブラッグ波長から離れた波長との反射損失差も大きく取

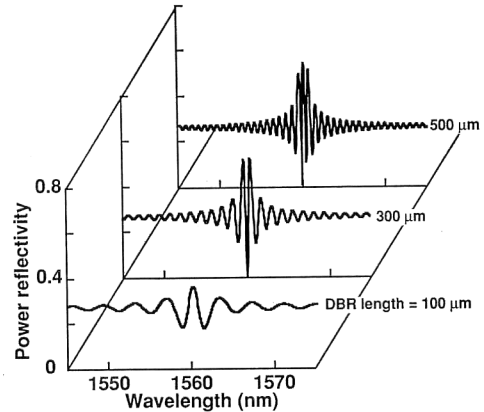


Fig. 2 Calculated reflectivity profiles of the DBR section with various DBR length.

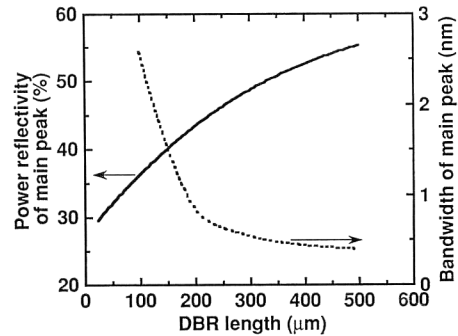


Fig. 3 The dependence of the reflectivity (solid line) and the bandwidth (dashed line) of the main peak of the DBR reflectivity profiles on the DBR length.

ることができる。このような DBR 領域は可飽和吸収体の働きを妨げることなく波長フィルタとしての働きをすることができ、モード同期が達成される。

以上の議論から本素子においては短い DBR 領域による緩やかなスペクトルフィルタリングがモード同期の達成に寄与していると結論される。また、発振波長がゲインピーク波長よりも 20 nm 程度短波長側であり、デチューニングによる線幅増大係数の減少もまた光パルスの短縮に寄与しているものと考えられる²⁰⁾。

3.2 逆バイアス電圧依存性

3.1 の結果から、以下の測定では、素子は DBR 領域の長さが $90 \mu\text{m}$ のものを用いた。この素子の電流-光出力特性を Fig. 4 に示す。可飽和吸収領域に加える逆バイアス電圧を上げていくとしきい値が上昇するとともにしきい値での光出力の飛びも大きくなる。これは、逆バイアス電圧を増加させると、可飽和吸収体で生じる光電

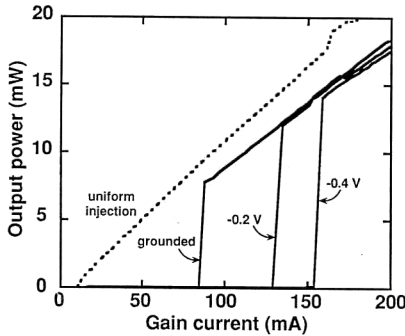


Fig. 4 The dependence of the light-gain current characteristics on the bias condition of the saturable absorber section.

流が外部へ掃き出されるため可飽和吸収体の非飽和損失が大きくなり、可飽和吸収体がブリーチングを起こすのに必要な光強度が大きくなるのが原因と考えられる。

3.3 バイアス電流依存性

次に、光パルス幅の利得領域バイアス電流依存性について述べる。Fig. 5 に電流-光出力特性のヒステリシス曲線を示す。可飽和吸収領域の逆バイアス電圧は -0.2 V である。Fig. 6 に利得領域のバイアス電流を変えた場合の光パルスの SHG 相関波形およびスペクトルの変化を示す。バイアス電流を増加させるとパルス幅が広がり、かつスペクトルが非対称になってくる⁸⁾。これはバイアス電流を増加させると光強度および非飽和利得が増加し、そのため利得飽和の効果が大きくなり、自己位相変調によるチャージングが現れるためと思われる^{20,21)}。

最短の光パルスは利得領域のバイアス電流をしきい値直上にしたときに得られた (Fig. 6(a) に対応する)。この時の SHG 自己相関波形およびスペクトルの包絡線はガウス波形と良く一致し、実際のパルス幅およびスペクトル幅はそれぞれ 5.3 ps, 0.8 nm と見積られた。

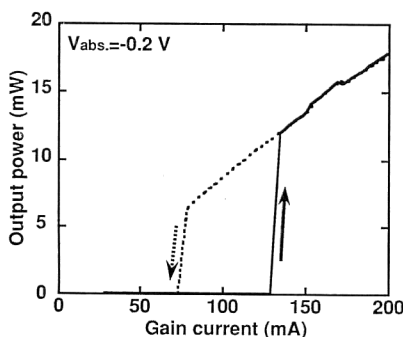


Fig. 5 The hysteresis of the light-gain current characteristics. The absorber section was reverse biased at -0.2 V.

時間帯域幅積は 0.52 でガウス波形の変換リミット値 (0.44) に非常に近い。また、相関波形の繰り返し周期からパルス繰り返し周波数は 39.3 GHz と見積られた。この値はレーザー共振器長 (約 1100 μm) から見積られるラウンドトリップ周波数と良く一致した。また、この光パルスの出力波形を帯域 13 GHz のフォトダイオードで測定したところ、CW 出力が得られた。このことから、これらの光パルスを内部構造とするような、より繰り返し周期の遅いパルセーションは存在せず、観測された光パルス列が完全なモード同期によるものであることが確認された。パルスピークパワーは 41 mW でパルスエネルギーは 0.22 pJ であった。この値は過去報告されているモード同期 LD のパルスエネルギーと同程度である²⁰⁾。

4. チューニング特性

今回開発したモード同期 LD の特徴は簡便な方法でモード同期中心波長のチューニングができる点にある。チューニングは DBR 領域あるいは位相調整領域に順バイアス電流を加えることで達成される。チューニングの物理的背景はプラズマ効果による屈折率変化である²²⁾。DBR 領域に電流注入するとブラッグ波長が変化し、波長チューニングができる。一方、位相調整領域に電流注入すると、素子の実効共振器長が変化するため、発振波長の微調とパルス繰り返し周波数のチューニングが可能となる。今回は DBR 領域にのみ電流注入し、その波長チューニング特性を調べた。

Fig. 7 に DBR 領域のバイアス電流を変化させたときのモード同期中心波長の変化を示す。なお利得領域の注入電流は 95 mA, 可飽和吸収領域の逆バイアス電圧は -0.25 V で固定して測定を行った。注入電流を増加させると、中心波長は短波長側へシフトし、最大 4 nm の波長チューニングが得られた。また、このときの光パルス幅および時間帯域幅積の変化を Fig. 8 に示す。チューニングによる光パルス幅の変化は 1 ps 以内であり、また、時間帯域幅積の変化は 0.44~0.58 でほぼ変換リミットな状態を維持しながら、波長チューニングが達成された。

Fig. 9 に DBR 領域の注入電流を変化させた場合の SHG 相関波形と光スペクトルの変化を示す。両者ともに包絡線形状の変化はほとんどない。Fig. 10 に平均光出力とパルスピークパワーの変化を示す。注入電流の増加に伴い平均光出力が減少するのは、光を取り出す側である DBR 領域の自由キャリア吸収が増加するためであ

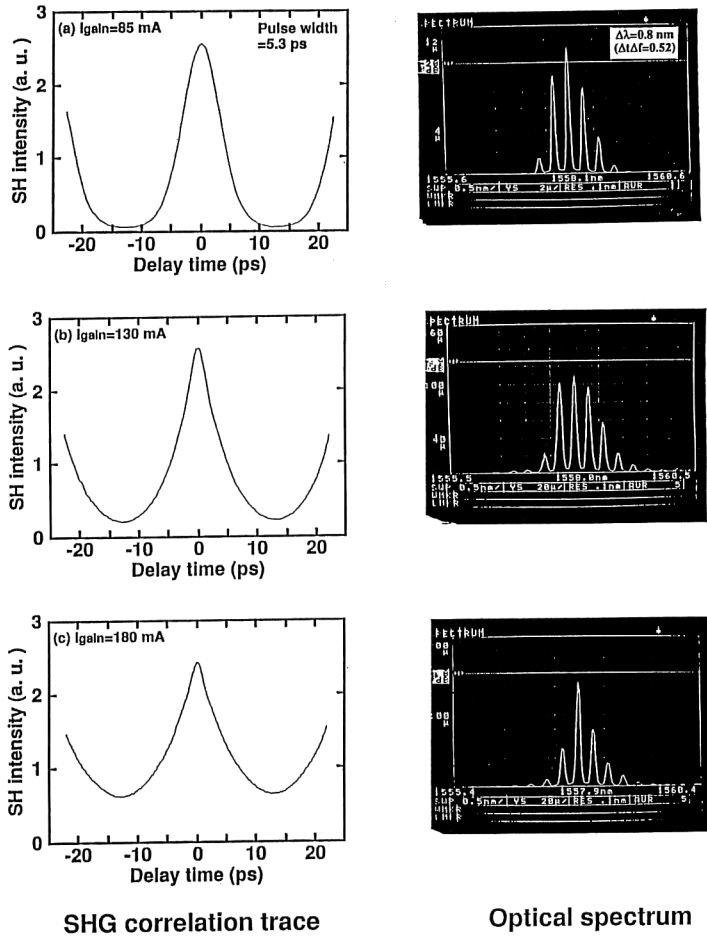


Fig. 6 SHG correlation traces and optical spectrum at various bias level of the gain section.

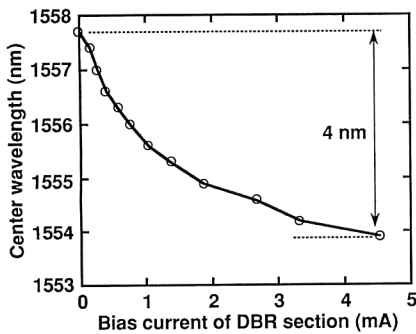


Fig. 7 Wavelength-tuning characteristics of the DBR-LD used in this study. The tuning current was injected in the DBR section and the phase control section was open. The gain current and the reverse voltage biased on the absorber section were fixed at 95 mA and -0.25 V, respectively.

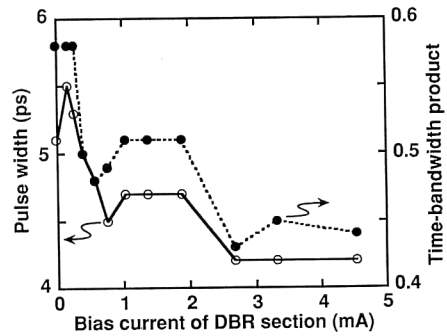


Fig. 8 The dependence of the pulse width (open circle) and the time-bandwidth product (closed circle) on the bias current of the DBR section.

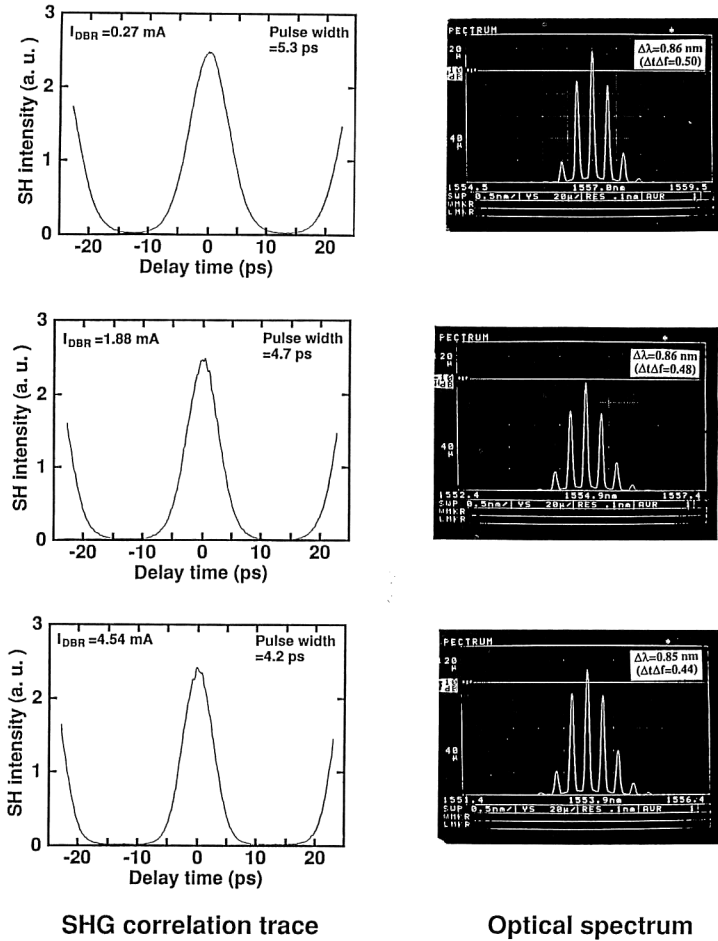


Fig. 9 SHG correlation traces and the optical spectrum at various bias level of the DBR section.

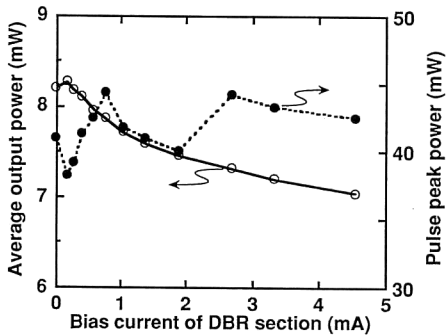


Fig. 10 The dependence of the average output power (open circle) and the pulse peak power (closed circle) of the mode-locked pulses on the bias current of the DBR section.

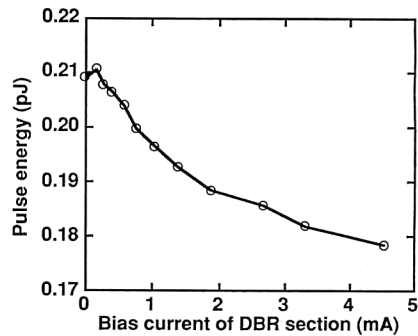


Fig. 11 The dependence of the output pulse energy on the bias current of the DBR section.

る。しかし、ピークパワーは 40 mW 近傍であり変化がない。

Fig. 11 にパルスエネルギーの変化を示す。注入電流

の増加に伴い、パルスエネルギーは若干減少するが、これは前述したように、DBR 領域の吸収損失の増加のため、実際に利得領域、可飽和吸収領域を通過する時の光パルスのエネルギーは、DBR 領域に電流注入してもあ

まり変化はないと考えられる。このことは受動モード同期レーザーのパルスエネルギーは利得領域と可飽和吸収領域の飽和エネルギーの兼ね合いによって決まるため、利得領域、可飽和吸収領域のバイアス状態を一定にした場合に得られるパルスエネルギーは DBR 領域のバイアス状態には依存しないことを示している。

5. ま と め

受動モード同期 DBR-LD を開発し、超高速繰り返し周波数 (40 GHz) をもつ変換リミットな光パルス列を得た。DBR 領域によるスペクトルフィルタリングがモード同期の達成に与える効果を詳しく調べ、短い DBR 領域による緩やかなスペクトルフィルタリングがモード同期に適していることがわかった。さらに、素子の DBR 領域に電流注入することにより、4 nm の広域な波長チューニング特性を得た。チューニングによるパルス幅、パルスピークパワー、時間帯域幅積の劣化はほとんどなく、素子特性の劣化を抑えた形での波長チューニングが達成された。同光源は将来の波長多重光ソリトン通信などへの応用が期待される。

文 献

- 1) A. Hasegawa and F. Tappert: "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers I. anomalous dispersion," *Appl. Phys. Lett.*, **23** (1973) 142-144.
- 2) P. A. Andrekson, N. A. Olsson, M. Haner, J. R. Simpson, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan, D. Coblentz, H. M. Presby and K. W. Wecht: "32 Gb/s optical soliton data transmission over 90 km," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (1992) 76-79.
- 3) K. Iwatsuki, K. Suzuki, S. Nishi and M. Saruwatari: "80 Gb/s optical soliton transmission over 80 km with time/polarization division multiplexing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5** (1993) 245-248.
- 4) H. F. Liu, Y. Ogawa, S. Oshiba and T. Nonaka: "Picosecond pulse generation from a 1.3 μm distributed feedback laser diode using soliton effect compression," *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (1991) 1655-1660.
- 5) 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.
- 6) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, INC., CA, 1989).
- 7) 末松安晴, 岸野克巳, 荒井滋久, 伊賀健一, 小山二三夫: "半導体光源の動的波長変動", *応用物理*, **58** (1989) 180-192.
- 8) 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 Photon. Technol. Lett.*, December (1993).

- 9) S. Arahira, Y. Matsui, T. Kunii, S. Oshiba and Y. Ogawa: "Optical short pulse generation at high repetition rate over 80 GHz from a monolithic passive modelocked DBR laser diode," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 1013-1015.
- 10) P. B. Hansen, G. Raybon, U. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, M. Chien, C. A. Burrus and R. C. Alferness: "5.5-mm long InGaAsP monolithic extended-cavity laser with an integrated Bragg-reflector for active mode-locking," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (1992) 215-217.
- 11) P. B. Hansen, G. Raybon, U. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, M. A. Newkirk, M.-D. Chien, B. Tell and C. A. Burrus: "2 cm long monolithic multisection laser for active modelocking at 2.2 GHz," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 739-741.
- 12) Y. K. Chen, M. C. Wu, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan and M. A. Chin: "Subpicosecond monolithic colliding-pulse mode-locked multiple quantum well lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 1253-1255.
- 13) N. A. Olsson, P. A. Andrekson, J. R. Simpson, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan and K. W. Wecht: "Bit-error-rate investigation of two-channel soliton propagation over more than 10,000 km," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 695-697.
- 14) M. C. Wu, Y. K. Chen, T. Tanbun-Ek, R. A. Logan and M. A. Chin: "Tunable monolithic colliding pulse mode-locked quantum-well lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3** (1991) 874-876.
- 15) H. Temkin, T. Tanbun-Ek and R. A. Logan: "Strained InGaAs/InP quantum well lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 1210-1212.
- 16) Y. K. Chen and M. C. Wu: "Monolithic colliding-pulse mode-locked quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2176-2185.
- 17) T. Schrans, R. A. Salvatore, S. Sanders and A. Yariv: "Subpicosecond (320 fs) pulses from CW passively mode-locked external cavity two-section multi-quantum well lasers," *Electron. Lett.*, **28** (1992) 1480-1482.
- 18) S. W. Corzine, J. E. Bowers, G. Przybylek, U. Koren, B. I. Miller and C. E. Socolich: "Actively mode-locked GaInAsP laser with subpicosecond output," *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 348-350.
- 19) 末松安晴編著: 半導体レーザーと光集積回路, 11章 (オーム社, 1984) p. 327.
- 20) D. J. Derickson, R. J. Helkey, A. Mar, J. R. Karin, J. G. Wasserbauer and J. E. Bowers: "Short pulse generation using multisegment mode-locked semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2186-2202.
- 21) G. P. Agrawal and N. A. Olsson: "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 2297-2306.
- 22) Y. Tohmori, Y. Suematsu, H. Tsushima and S. Arai: "Wavelength tuning of GaInAsP/InP integrated laser with butt-jointed built-in distributed Bragg reflector," *Electron. Lett.*, **19** (1983) 656-657.