レーザーオリジナル

双安定面発光MQW-DBRレーザーの
超高速スイッチング特性

(双安定面発光レーザーのスイッチング特性)

小島啓介*・久間和生*

(1988年7月26日 受理)

Ultrafast Switching Characteristics of Bistable
Surface-Emitting MQW-DBR Lasers

Keisuke KOJIMA* and Kazuo KYUMA*

(Received July 26, 1988)

Bistable surface-emitting MQW-DBR laser diodes have been fabricated for applications to optical computing. The output power was 2mW and the contrast was greater than 50:1. They can be switched-on by the trigger lights injected from the surface. Therefore, they can be applied to two-dimensional arrays. The switching time with an optical trigger input was as short as 50 ps. The minimum switching power and energy required for the switching was 1mW and 5pJ, respectively.

Key Words: Optical computing, Bistability, Switching, Laser diodes, Surface emitting lasers.

1. はじめに

光双安定素子は、光コンピュータのキーデバイスとして期待されている。半導体をベースにした光双安定素子としては、大きく分けて、

- 1) 可飽和吸収体を用いた双安定半導体レーザー^{1~8)}
- 2) 半導体レーザー増幅器^{9,10)}
- 3) 非線形エタロン^{11~12)}
- 4) SEED¹³⁾
- 5) ハイブリッド素子^{14,15)}

があげられる。これらにはそれぞれ特徴があるが、その中では可飽和吸収体を用いた双安定半導体レーザーには、on/off比が大きい、光出力が大きい、小さな入力光でもスイッチング動作が可能、入力光波長に敏感ではないためカスケード接続に有利である、などの特徴がある。

半導体レーザーの電極を分離して片方を可飽和吸収体として用いた双安定半導体レーザーは、1964年にLasherにより提案され¹⁾、その後多くの研究がなされている^{2~8)}。現在までに、立ち上がり、立ち下がりスイッチング時間として

* 三菱電機(株)中央研究所基礎研究部 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

* Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation (1-1, Tsukaguchi-honmachi 8-chome, Amagasaki, Hyogo 661)

は共に200ps前後の値が得られている⁶⁻⁷⁾。

多重量子井戸 (MQW) 構造は半導体レーザーの緩和振動周波数を増大させるのに非常に有効であるため^{16,17)}, これを双安定半導体レーザーに適用すればスイッチング時間の低減につながるものと期待される。しかしながら, GaAs系半導体レーザーはInP系に比べて微分利得が大きく非飽和時の吸収係数が小さいため⁸⁾, 双安定動作を得るのが難しい。AlGaAs/GaAs MQW構造は, 更に微分利得が大きく¹⁸⁾, また利得ピーク波長より長波長においては吸収係数が非常に小さい¹⁸⁾ ために10nm程度長波長において発振する。それに加えて, 励起子による吸収は飽和しやすく¹⁹⁾, 自然放出光によるself-bleachingが生じ易い。以上の理由により, タンデム電極MQWレーザーにおいては双安定動作は得にくい²⁰⁾。Taruchaらは16層の井戸層を含むMQW構造を用いたタンデム電極レーザーにおいて利得領域長を100 μm と極めて短くし, 吸収領域に逆バイアスを加えて双安定性を得たが, ヒステリシス幅はかなり小さく, また条件によっては自励発振を生じている²¹⁾。我々もMQWレーザーの一部にのみ電流を注入して電流-光出力特性を調べたが, 利得領域長が短い場合にのみ非常に小さなヒステリシスが観測された。

MQWレーザーにおいて大きな光双安定性を得るための方法としては以下の事が考えられる。まず, 非常に高いMQWの微分利得を補うためには利得領域長を短くすればよい。次に, 吸収領域における吸収係数を高めるには, DFB又はDBRレーザーにおいて回折格子によって発振波長を利得ピークより短波長に設定することである (ディチューニング)。このディチューニングはスイッチング速度を高めるのにも非常に有効である。

我々は最近MQW構造の一部に電流を注入して利得領域 (活性領域) とし, また残りの部分は回折格子を設けて比較的低損失の導波路として用いたDBRレーザーを作製し²²⁾, GaAs系では初めてDBRレーザーの室温連続発振に成功した²³⁾。このレーザーは2次の回折格子を用い

ているために, 1次の回折光が基板に垂直に面発光として取り出され, 2次元アレイ化も可能である²⁴⁾。また, 吸収領域 (DBR領域) に電極が存在しないために, 基板上部から入射した光によりキャリアを発生させ, 吸収を飽和させることにより, スwitchingをさせることが可能である。

この論文においては, まず, MQW-DBRレーザーにおいて, 活性領域長が短かく, またディチューニングが大ききときには双安定動作を示すことを示す。次に電流トリガによるスイッチング特性及び基板に垂直な方向から入射した外部光によるスイッチング特性を報告する。最後に, 光コンピュータへの応用について述べる。

2. 双安定動作

双安定面発光MQW-DBRレーザーの基本構造は以前報告したものとはほぼ同一であり²³⁾, Fig.1に示す。MQW構造は10nmのGaAs井戸層5層と5nmの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ バリア層4層から成り立っており, $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ のクラッド層にはさまれている。横方向閉じ込めとしてはリッジ導波路を用いており, その幅は約4 μm である。導波路の一部はクラッド層厚が0.2~0.4 μm になるまでエッチングをしてから2次の回折格子 (周期:257.5nm) を形成する。この領域は通常のブラッグ反射器 (DBR) として, 機能すると同時に, 基板に垂直に光を取り出すグレーティングカップラー, 及び可飽和吸収体としても機能する。また残りの導波路は電極に

Fig.1 Schematic diagram of the bistable surface-emitting MQW-DBR laser.

より電流が注入され、活性領域（利得領域）として機能する。活性領域側の端面には反射率約90%のコーティングを施し、DBR領域側の端面はへき開のままである。20℃におけるDBRモードでの発振波長は863 nmであり、また利得ピーク波長は871 nmであった。従って20℃でのディチューニングは-8 nmである。また、バンドギャップの温度変化による利得ピーク波長変化率が屈折率の温度変化による発振波長変化率より大きいために、温度が10℃上昇するたびにディチューニングは約-2 nm増大する。

Fig. 2 は、活性領域長 $290\mu\text{m}$ 、DBR領域長 $310\mu\text{m}$ の素子のCWでの電流-光出力特性の温度による変化を表したものであり、温度上昇と共にディチューニングが増大すると双安定性が生じることがわかる。しかしながら30℃以下では双安定性はほとんど生じない。この傾向はパルス動作においても同様であった。Fig. 3はこの素子と同一基板から取られた活性領域長 $150\mu\text{m}$ 、DBR領域長 $300\mu\text{m}$ の素子の電流-面発光出力特性の温度依存性を表す。用いた電流は、

Fig. 2 Current vs output power characteristics of the device with the active section length of $290\mu\text{m}$,

Fig. 3 Current vs output power characteristics of the device with an active section length of $150\mu\text{m}$.

8 ns幅の三角波で、繰り返し周波数は1 MHzであった。また、測定系の帯域帯は200 MHzである。この場合は、25℃でも双安定性を生じている。以上の結果より、ディチューニングと活性領域長がヒステリシスを生じさせるのに重要であることがわかる。以下の実験では後者の素子（活性領域長 $150\mu\text{m}$ ）を用いた。なお、良好な素子においては、on/off比として50:1以上が得られた。

面発光レーザーの1つの特徴は共振器内部の光強度分布を外部から直接観察できることである。Fig. 4は素子上部から観測された面発光の近視野像のプロファイルの励起レベルによる違いを示したものである。発振直前は光は $40\mu\text{m}$ しかDBR領域に侵入していないが、発振直後は $175\mu\text{m}$ も侵入しており、その時のモードに対する（ブラッグ反射を含んだ）減衰係数はそれぞれ 170cm^{-1} 、 40cm^{-1} と見積もられる。従って

Fig. 4 Near-field pattern of the surface-emission measured from the top of the device.

閉じ込め係数 (0.15) を考慮してバルクの吸収係数を見積もるとそれぞれ 1100 cm^{-1} 以下、及び 270 cm^{-1} 以下となる。

3. 電流トリガによるスイッチング

まず、MQW-DBRレーザーの電流トリガによるスイッチング時間の測定を行った。出力光はストリークカメラ (浜松ホトニクス C1587) により測定した。

Fig. 5 はしきい値電流の約 8 倍の電流パルスを加えた時の立ち上がり特性である。この時の時間分解能は 5 ps であった。立ち上がり時間は 12 ps と見積もられる。また立ち上がりの時間遅れはバイアス電流を加えない時は 1 ns 前後で、バイアス電流を増大させると 100 ps 以下にまで減少した。

Fig. 6 は電流をしきい値電流の約 8 倍からゼロにした時の立ち下がり特性を示す。立ち下がりがり時間は約 90 ps である。電流パルスの立ち下

Fig. 5 Turn-on characteristics of the bistable surface-emitting laser with a current trigger.

Fig. 6 Turn-off characteristics of the bistable surface-emitting laser when the current was turned-off.

がり時間は 250 ps であるので、より高速のパルサーを用いれば更に立ち下がり時間の低減が期待できる。

4. 外部光トリガによるスイッチング

次に外部光をトリガにしたスイッチング特性

Fig. 7 Experimental setup for measuring the switching characteristics with input optical triggers.

Fig. 8 Turn-on characteristics of the bistable surface-emitting laser with external laser diode trigger light.

の測定を行った。Fig. 7はその測定系を示す模式図である。外部光源としてCSP半導体レーザー（波長830nm）あるいはCWモードロックYAGレーザー励起色素レーザー（色素：Rh6G, 波長：610nm）を用いた。外部光に同期したパルス電流を双安定MQW-DBRレーザーに加え、しきい値直前に設定した。外部光は通常のレンズ（L2）で集光された後、更に双安定レーザーのDBR領域上に取り付けられたシリンドリカルレンズ（L3：直径75 μ mの光ファイバー）²⁵⁾によって導波路上に集光された。入力光及び双

安定レーザーの出力光はストリークカメラにより測定された。なお外部光は基板にほぼ垂直な方向から入射されるが、実際には入射角度には全り依存しなかった。

Fig. 8に半導体レーザーからのトリガ光入力によるスイッチング特性を示す。トリガ光パワーは20mWであった。双安定レーザーの立ち上がり遅れ時間は110ps, 立ち上がり時間は250psであった。双安定レーザーのスイッチングに必要な最小パワーは1mW, エネルギーは5pJであった。この5pJというエネルギーは非線形エタロンをスイッチするのに必要な最小エネルギーとほぼ同程度であった¹²⁾。

次に、より狭いパルス幅と高いピークパワーを得るため、パルス幅800fs, 繰り返し周波数3.8MHzの色素レーザー光を用いて双安定レーザーのスイッチング速度の限界を調べる。Fig. 9は色素レーザーのパルスエネルギーが2nJの時の色素レーザー光及び双安定レーザーの光出力である。全スイッチング時間（立ち上がり遅れ時間+立ち上がり時間）は50psと非常に小さいことが分かった。

Fig. 9 Turn-on characteristics of the bistable surface-emitting laser with external dye laser trigger light.

この様に面発光レーザーを基板の上から入射した光でスイッチングする方法は以下の様な利点がある。1) 2次元アレイ化に適している。2) 入力光の波長にほとんど依存しない。3) 入力光の角度にほとんど依存しない。4) 入力光と出力光の角度を変えることができるために入力光側に出力光の影響を与えず、アイソレータを必要としない。

5. 議論

双安定半導体レーザーの立ち上がり時間および立ち下がり時間は通常の半導体レーザーの高速変調の場合と同様に微分利得(利得係数のキャリア濃度に対する変化率)の増大に伴って減少する(およそ $\frac{1}{2}$ 乗に反比例)と考えられる。また立ち上がりの時間遅れは微分利得にほぼ反比例することが示されている²⁶⁾。従って微分利得を大きくすることが双安定半導体レーザーの高速動作にとって重要である。

Fig. 10はAlGaAs/GaAs MQWの微分利得の波長依存性の計算例を示す。利得の計算にはバンド内緩和を考慮したモデル²⁷⁾を用いているが、詳細な計算方法は文献²⁸⁾にまとめてある。DBR領域長の実効反射率を0.1、へき開面の反射率を0.9とし、活性領域長を $150\mu\text{m}$ とするとしきい値モード利得は 80cm^{-1} となる。また活性領域における吸収係数を 5cm^{-1} 、閉じ込め係数を0.15、バンド内緩和時間を 0.1ps と仮定

Fig. 10 Calculated differential gain dg/dn as a function of detuning.

している。Fig. 10に示されるように微分利得は強い波長依存性を持つが、ファブリーペローレーザーの場合には利得ピークより数nm以上長波長で発振するのに対し、今回のレーザーの場合には8nm短波長に設定してあるために微分利得は5倍以上増大することが示される。またMQWの効果によっても微分利得は3—5倍増加することが示されており¹⁶⁾、両者の効果により一桁以上の微分利得の増加が達成されていることが分かる。

この素子のヒステリシス幅は用途によっては必ずしも十分でないかもしれないが、MQWの井戸数を増やすこと、閉じ込め係数を上げること、ディチューニングを更に大きくすること、あるいは活性領域長を更に短くすること等によりヒステリシス幅の増大が可能だと思われる。

今のところこの素子のスイッチングに必要な外部光パワーはやや大きい、この原因としては外部光を吸収するMQW層が薄いのでほとんどが吸収されず下のクラッド層及び基板まで突き抜けてしまうことがあげられる。外部光を効率良く導波路に結合させるには、波長あるいは入射角度を調節して回折格子をグレーティングカップラーとして働かせることが考えられる。またMQWの井戸層数を増やすことにより吸収効率を高めることも有効であろう。

6. 光コンピュータへの応用

近年、人間の脳細胞の働きを模倣するニューロ・コンピュータの研究が盛んになされているが、膨大なベクトル・マトリクス演算を必要とするために長い計算時間を要することが欠点となっている。この欠点を解決する手段の一つとして、光を用いてニューロ・コンピュータを実現しようとする試みがなされて来ている^{29), 30)}。これらをさらに高速にするためには、しきい値処理等の非線形演算も光学的に行うことが望ましい。

Fig. 11は将来の非線形光素子を用いた光ニューロ・コンピュータの模式図である。ここでは光源としては面発光レーザーアレイを用い、ま

Fig.11 Schematic diagram of a future neuro-computer with nonlinear optical devices.

たしきい値素子としては本論文で述べた面発光型双安定レーザーを用いてある。この様な構成により、比較的簡単な構成ながら、超高速な光ニューロ・コンピュータの実現が期待される。

7. 結 論

- 1) MQW構造と回折格子によるディチューニング効果により面発光DBRレーザーにおいて双安定動作をさせることに成功した。
- 2) 電流トリガによる立ち上がり時間は12ps, また電流オフ時の立ち下がり時間は90psであった。
- 3) 基板にほぼ垂直な方向から入射した外部光によりスイッチングすることに成功した。スイッチングに必要な最小パワーは1mW, エネルギーは5pJであった。また色素レーザー光入力によるスイッチング時間は50psであった。
- 4) このタイプの素子は基板に垂直な方向に光の入出力が可能であり、2次元アレイ化が可能である。また入射光の波長や角度にはあまり依存しないスイッチングが可能であり、入射光側への戻り光の影響も抑えることができカスケード接続に有利である。今後光コンピュータへの応用が期待される。

謝辞

日頃御指導頂く当研究所中山部長及び石井次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) G. J. Lasher: Solid-State Electron., **7** (1964) 707.
- 2) H. Kawaguchi and G. Iwane: Electron. Lett., **17** (1981) 167.
- 3) C. H. Harder, K. Y. Lau, and A. Yariv: IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 1351.
- 4) A. Tomita, T. Terakado, and A. Suzuki: J. Appl. Phys., **59** (1986) 1839.
- 5) H. -F. Liu, T. Kamiya, and B. -X. Du: IEEE J. Quantum Electron., **QE-22** (1986) 1579.
- 6) H. -F. Liu, and T. Kamiya: Technical digest of the 10th International Semiconductor Laser Conference, Kanazawa, October, 1986, p. 138.
- 7) A. Tomita, S. Ohkouchi, And A. Suzuki: Technical digest of the OSA Topical Meeting on Photonic Switching, Lake Tahoe, March, 1987, p. 119.
- 8) 新田, 小山, 伊賀: 信学技報, **OQE87-38**, (1987).
- 9) K. Otsuka and H. Iwane: IEEE J. Quantum Electron., **QE-19** (1983) 1184.
- 10) T. Nakai, N. Ogasawara, and R. Ito: Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983) L310.
- 11) H. M. Gibbs, S. S. Tarng, J. L. Jewell, D. A. Weinberger, K. Tai, A. C. Gossard, S. L. McCall, A. Passner, and W. Wiegmann: Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 221.
- 12) J. L. Jewell, Y. H. Lee, M. Warren, H. M. Gibbs, N. Peyghambarian, A. C. Gossard, and W. Wiegmann: Appl. Phys. Lett., **46** (1985) 918.
- 13) D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, T. H. Wood, C. A. Burrus, Jr., A. C. Gossard, and W. Wiegmann: IEEE J. Quantum Electron., **QE-21** (1985) 1462.
- 14) 晏, 伊藤, 稲葉: 信学技報, **OQE86-20~21** (1986).
- 15) 晏, 星, 伊藤, 稲葉: 信学会全国大会予稿集, 論文850 (1987春).
- 16) Y. Arakawa, K. Vahala, and A. Yariv: Appl. Phys. Lett., **45** (1984) 950.
- 17) K. Uomi, N. Chinone, T. Ohtoshi, and T. Kajimura: Jpn. J. Appl. Phys., **24** (1985) L539.
- 18) S. Tarucha, Y. Horikoshi, and H. Okamoto: Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983) L482.
- 19) D. A. B. Miller, D. S. Chemla, D. J. Eilenberger, P. W. Smith, A. C. Gossard, and W. T. Tsang: Appl. Phys. Lett., **41** (1983) 679.

- 20) 富田, 鈴木: 第33回応用物理学会予稿集, 論文 2p-K-3 (1986).
- 21) S. Tarucha and H. Okamoto: Appl. Phys. Lett., **49** (1986) 543.
- 22) K. Kojima, S. Noda, K. Mitsunaga, K. Kyuma, K. Hamanaka, and T. Nakayama: Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 227.
- 23) 小島, 野田, 光永, 久間, 浜中: 信学技報, OQE-86-165 (1987).
- 24) K. Kojima, S. Noda, K. Mitsunaga, K. Kyuma, and K. Hamanaka, Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 1705.
- 25) 光永, 亀谷, 小島, 野田, 久間, 浜中: 信学技報, OQE-86-152 (1987).
- 26) 小路, 荒川, 藤井: 信学技報, OQE87-54, (1987).
- 27) M. Asada, A. Kameyama, and Y. Suematsu: IEEE J. Quantum Electron., **QE-20** (1984) 745.
- 28) K. Kojima, S. Noda, and K. Kyuma: Electron. Lett., **22** (1986) 1246.
- 29) N. H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata, and E. Paek, Appl. Opt., **24** (1985) 1469.
- 30) 太田, 田井, 黒田, 追田, 久間, 浜中: 信学技報, OQE87-174 (1988).