レーザー解説

光 IC の 信 号 処 理 へ の 応 用

—— 半導体光機能デバイス ——

若 尾 清 秀*

(1991年2月26日 受理)

Applications of optical integrated circuits to signal processing

—— Semiconductor Optical Functional Devices ——

Kiyohide WAKAO*

(Received February 26, 1991)

Optical functional devices are indispensable for light signal processing systems. So far, various functions have been realized by use of integrated configuration of semiconductor optical devices. This paper describes progress in semiconductor optical functional devices based on semiconductor laser diodes and their application to light signal processing. First, it is shown that memory operation can be demonstrated with a bistable laser diode with a tandem electrode structure, and then ultra-optical flip-flop operation of a bistable laser diode is introduced. Second, a wavelength converter laser and a tunable wavelength filter, which are thought to be promising for wavelength division switching networks, are described. Finally, it is shown that various optical logic operations can be attained by using the bistable laser diode.

Key Words : Optical functional device, Light signal processing system, Optical integrated device.

1. はじめに

最近の光システムの動向を見ると、超高速・コヒーレント化などのシステム高性能化とともに、ファイバの広帯域性を利用して計算機や交換機の内外を光で配線する、あるいは光で種々のネットワークを組む、という新しい動きが活発化している。このような光リンク化、光ネットワーク化が進むとシステムで使われるスルー

プットの光信号量が急激に増大することになり、その多量の光をいかに信号処理するかが大きな問題となる。これまでのように光信号を一旦電気に変換して信号処理した後に再び光に戻す方法を採用すると、光の広帯域性を損ねたり、発光・受光素子が必ず必要となるため寸法、価格、信頼性の面でシステムの長所を出せなくなる公算が強い。従って、光信号を電気に変換せずに光の状態のまま信号処理できる新しい技術が

* 株式会社富士通研究所 (〒243-01 厚木市森の里若宮10-1)

* Fujitsu Laboratories Ltd. (10-1, Morinosato - Wakamiya, Atsugi 243-01)

望まれており、そのための光デバイスの開発が重要な課題となっている。

このような光信号処理用デバイスとして光機能素子の研究開発が活発化している。特に、ここ数年、半導体材料の光機能素子が着目され、デバイス構造の工夫や光学的材料特性の活用により新しい機能を実現したり、新しい信号処理方式を構築しようとする試みが精力的になされている。

本稿では、光機能素子として半導体レーザーを基本構造とする複合集積型光素子を採用し、このような複合集積化により光信号処理に必要な種々のスイッチング機能が実現できることを述べる。

2. 光信号処理に必要な機能と材料

Table I に光信号処理を行う上で必要となる機能とそのデバイスの例を示す。光では時分割、波長分割、空間分割の3つの多重化方式があることから、まず、これらの軸上で信号を切り換えるスイッチング素子が必要となる。時分割では光信号をメモリする機能、波長分割では搬送波である光の波長を自由に変えられる波長変換機能や波長多重された光の中から任意の波長の光信号だけを選択的に選び出す波長フィルタリング機能が必要である。また、空間分割では光を振り分ける偏向機能が必要である。一方、多重化信号の切り換え処理のほかに、光信号の波形整形、クロックパルス抽出、再生、多重化、復調化などの処理も必要であり、これを行うための光論理素子、増幅器、非線形光回路などの光機能素子も必要である。

これらの機能を実現する材料としては半導体材料が最も有力と考えられている。その理由として、

1) 電流を注入したり電界を印加することにより屈折率や吸収係数など材料の光学的特性を大きく変えることができるため、種々の機能が実現できる。

2) 半導体レーザー・アンプをベースとして構成することにより、入出力間で光の増幅特性

Table I Functions necessary for light signal processing and optical functional devices.

	Function	Optical functional device
Time-division	Memory	Optical bistable device
	Modulation, Amplification	Modulator, Amplifier, Optical nonlinear device
Wavelength-division	Wavelength conversion	Wavelength converter
	Wavelength selection	Tunable filter
Space-division	Deflection	Optical switch
Logic	AND, OR, NOT, NAND, NOR, EXOR, etc.	Optical logic gate, Optical inverter

が得られる。

3) 発光素子や受光素子だけでなく電子デバイスとのモノリシック集積化も可能であるため、機能性・汎用性に優れた光集積回路が実現できる。

4) 膜厚制御性に優れた結晶成長技術、選択結晶成長技術、ウエハ微細加工技術などの超精細素子作製技術が構築されつつあり、3次元光導波路などの複雑な素子構造にも柔軟に対応できる。

ここに挙げられた長所は現状ではまだ十分に活かされていないが、今後、光機能素子の研究開発が進むにつれて徐々にその優位性が実証されてくるものと考えられる。

3. 半導体光機能素子

ここでは、半導体光機能素子として半導体レーザーを基本構造とする複合光素子を主に採り上げ、その開発状況について述べる。

3.1 双安定半導体レーザー

Fig. 1 にタンデム電極型双安定半導体レーザー¹⁻⁶⁾の構造を示す。電流を注入する利得領域と電流を注入しない可飽和吸収領域がレーザー共振器内に複合化されている。可飽和吸収領域は、透過する光強度が強くなるに従って吸収係数が小さくなるいわゆる光学非線形特性を持つ。このためFig. 1 (b) 示すように電流-光出力特性に光双安定特性が現れ、“H”と“L”の2つの安定な光出力状態が存在することにな

Fig. 1 Bistable laser diode. (a) Device structure; (b) Fundamental characteristics.

Fig. 2 Memory operation of a bistable laser diode.

る¹⁾。この双安定特性を用いると光メモリ動作が可能となる。Fig. 2に示すように“L”の状態から外部からレーザー活性層に光パルスを入力すると、この光パルスにより可飽和吸収領域の吸収係数が小さくなるため、レーザー発振を開始して“H”の状態に変わる。これをセットと呼ぶが、外部光パルスがメモリされ定常的に光が出力されることになる。“L”の状態にリセットするためには、負の振幅を持つ電流パルスを加えてバイアス電流を一時的にヒステリシスの下まで下げれば良い。双安定レーザーは半導体レーザーをベースとしているため、他の光双安定素子と比べ光出力特性面で優れており、出力光強度1～3 mW、光増幅度10～30 dB、H-Lレベル間の消光比10～20 dBという良好な値が得られている。

双安定レーザーを高速で動作させるために

は、レーザー活性層内のキャリア変動を抑制することが重要である⁶⁾。セットパルスあるいはリセットパルスを入力すると、素子の内部状態が変わるため活性層内のキャリアが変動する。この変動は時間が経つに従って小さくなり定常状態に近づくが、あるレベルまで安定しないと次のセットパルスあるいはリセットパルスを入力しても安定に動作しない。従って、高速でセット・リセット動作させるためには、セットパルスあるいはリセットパルスを入力してもキャリアが大きく変動しないような状況を作り出すことが必要となる。このようなキャリア変動抑制策として、双安定レーザーの片側のバイアスを大きな微分利得特性が得られる低注入電流レベルまで下げる方法が提案されている⁶⁾。Fig. 1に示す高抵抗層埋込み構造を採用すると、2つの電極間の分離抵抗が10 kΩ前後と大きいので、一方の電極をp-n接合の立上がり電圧以下の極低バイアスに、他方の電極をレーザー発振に必要となる高電流注入レベルにバイアスすることが可能となる。この手法によりこれまでに繰り返し5 Gb/sの高速フリップ・フロップ動作が達成されている⁷⁾。

また、通常、リセット時に電流パルスを用いているが、光パルスを入力することによりリセットさせる試みもなされている⁸⁻¹¹⁾。スペクトル的に“均一広がり (Homogeneous broadening)”を持つレーザー活性媒質に外部から光

Fig. 3 All-optical Flip-flop operation.

Fig. 4 Time-division optical exchange system.

を注入すると、レーザー利得が減少する。この利得クエンチング現象を利用すると、光入力によりリセットさせることができる。Fig. 3にその一例を示す⁸⁾。波長の異なる2つの光によりフリップ・フロップ動作している。この例では波長の異なる光を用いているが、同一波長でパルス振幅あるいはパルス幅が異なる光を用いた場合にも同様のフリップ・フロップ動作が得られている⁹⁾。このような全光型の光メモリ動作は、レーザー物理の研究の観点で興味深いとともに、光信号処理の面においても有用な手段になるものとして興味を持たれている。

Fig. 4に双安定レーザーの光信号処理への適用例として時分割型光交換システムの例を示す^{12, 13)}。時間多重された光信号を双安定レーザーにメモリ保持させ、時間軸上で信号の順番を入れ換えて出力している。光信号を電気信号に変換せずに処理するので光の広帯域性を活かした信号処理が可能になる。これまでにスループット512Mb/sの光交換機が試作され、4チャンネルの画像信号の切り換え実験が報告されている¹³⁾。

Fig. 5 Tunable wavelength conversion laser.

3.2 波長変換レーザーと波長可変フィルタ

光波を用いると電気では使われている空間分割と時間分割に加え波長分割の多重方式も利用できる。大容量信号処理が実現できるものと期待されている。波長分割型の信号処理を行うためには波長軸上でスイッチング動作する機能素子が必要である。このような光機能素子として、光の波長を変える波長変換レーザー¹⁴⁻¹⁷⁾、任意の波長の光を選択的に選び出す波長可変型のフィルタ¹⁸⁻²⁰⁾が実現されている。

Fig. 5に波長変換レーザーを示す¹⁵⁾。双安定レーザーに波長可変DBR (Distributed Bragg Reflector) を集積化した構造となっている。素子はレーザー発振しきい値のすぐ下にバイアスされており、外部から光が入力された時のみレーザー発振動作する。レーザー発振波長 λ は、DBR回折格子のピッチを Δ 、次数を N 、DBR部の屈折率を n とすると、 $\lambda \div 2n\Delta/N$ で表される。従って、DBR領域に電流を注入して屈折率

Fig. 6 Multi-channel operation of a tunable wavelength conversion laser.

Fig. 7 Tunable filter.

Fig. 8 Transmission gain spectra of a tunable filter.

n を変えると同じ波長の入力光に対し出力波長を自由に変えることができる。Fig. 6 に波長 $1.5356\mu\text{m}$ の入力光をいろいろな波長に変換して出力した時の例を示す。DBR領域に流す電流値を変えることにより4チャンネルの波長切り換えが可能となっている¹⁶⁾。出力波長の可変幅として3.5nmの値が得られている。この素子は光とキャリアの非線形応答素子であるため、応答速度が入力光強度と電流バイアス条件に大きく依存する。これらのパラメータを最適化することにより1Gb/sの光信号の波長変換動作が確かめられている¹⁷⁾。

一方、波長可変フィルタに関しては、DFB (Distributed Feedback) レーザ構造をベースとしたものが実現されている¹⁸⁻²⁰⁾。DFBレー

Fig. 9 Wavelength-division optical switching system.

ザーを発振直前に電流バイアスすると、ブラッグ波長に相当する光だけが選択的に透過される。これにより狭帯域で増幅作用を有するフィルタリング機能が得られる。Fig. 7 に素子の一例を示す²⁰⁾。光を増幅する活性層と透過波長を変えるチューニング層を積層配置し、別々に電流駆動する構造²¹⁾ となっている。チューニング層に電流を注入すると、ブラッグ波長が変わるためFig. 8 のように透過波長を変えることができる。透過増幅率12dB、バンドパス波長幅0.3nm (10dB遮断時)²³⁾、透過波長可変幅4.2nmの値が得られている。基礎検討の結果、回折格子の結合定数を最適化することにより透過遮断比を26dBまで改善できることが分かっており²²⁾、また5Gb/sの高速光信号も透過可能となっている²³⁾。多チャンネル高速光信号の波長選別処理に適した素子と言えよう。

Fig. 9 に波長変換素子と波長可変フィルタを用いた波長分割型信号処理システム²⁴⁻²⁸⁾ の例を示す。Fig. 9 (a) は光信号の波長を切り換えることにより出力ターミナルを変えるシステム^{24, 25)} であり、Fig. 9 (b) は各ターミナルへ

分配された波長多重光信号の中から任意の1波長を選び出すシステム²⁶⁻²⁸⁾である。どちらのシステムにおいてもクロスコネクト処理が実現されている。これらのシステムの波長多重度は使用する素子の波長可変動作幅とフィルタのバンドパス波長幅との比により決まる。波長変換レーザーおよび波長可変フィルタの場合、電流注入時の屈折率変化が大きい多重量子井戸層²⁹⁾を導入することにより波長可変動作幅を12~15nmまで広げられることが予想されている。これより、さしあたって多重度40~50波程度の信号処理システムが構成できるものと考えられる。今後、波長多重の光通信システムと相伴って波長分割型の信号処理技術が急速に開発されていくであろう。

3.3 空間光スイッチ

Fig. 10に全反射型光スイッチ³⁰⁻³⁴⁾の構造とスイッチング特性を示す。2つの単一モード光導波路を交差させ、交差部に電流を注入する構造となっている。電流を注入すると交差部の屈折率が減少するため光が全反射して光路が切り替わる。半導体材料で全反射型光スイッチを構成すると、電流注入時の屈折率変化が大きいので交差角を大きくでき、素子長を短くすることができる。このような小型化は光集積回路を実現する上で非常に有利となる。Fig. 10の例では交差部の長さが86 μm まで短縮化されてい

Fig. 10 Total internal reflection optical switch.

Fig. 11 Logic operation of bistable laser diode. (a) AND operation; (b) OR operation.

Fig. 12 Bias condition and logic operation of a bistable laser diode.

る³⁴⁾。数値解析では数十 μm の超小型光スイッチが実現可能であると予測されている³³⁾。集積化の例では、全反射型光スイッチを2次元状にアレイ配置した4 $\times$ 4マトリックス・光スイッチが実現されており³⁵⁾、これを用いた4チャンネルのクロスバー方式の光信号処理実験も報告されている³⁶⁾。

3.4 光論理演算素子

双安定半導体レーザーは光メモリ素子であるが、そのしきい値特性を応用すると論理演算素子としても使うことができる³⁷⁻⁴⁰⁾。双安定レーザーを発振しきい値以下に電流バイアスして光を入力するとFig. 11に示すような光出力特性が得られる。ここで“0”，“1”に相当する2つの光を入力するとAND出力やOR出力が得られる。一方、利得クエンチング効果を利用するとNOT³⁹⁾，NOR，NAND，EXOR動作⁴⁰⁾

Fig. 13 Optical AND gate.

Fig. 14 AND operation.

も得られる。Fig. 12に双安定レーザーのバイアス条件とその時に得られる論理演算動作をまとめた。このように双安定レーザーは、バイアス条件を変えるだけで光メモリ、波長変換、論理演算などの複数の機能を実現できるので、光集積回路の構成要素デバイスとして非常に魅力的である。光信号処理への適用例としては、双安定レーザーをフォトニック・ハイウェイや光LANのノード部に用いて光データの分岐・挿入を行った実験が報告されている⁴¹⁾。

Fig. 13に電界吸収型の光強度変調器と光増幅器を集積化した光AND素子^{42, 43)}の例を示す。このような光強度変調器と光増幅器の組み合わせは同一の半導体レーザーをそれぞれ逆バイアス、順バイアス動作させることにより構成される。Fig. 14にこの素子の基本動作を示す。制御光が入射すると光強度変調器の逆バイアス条件が緩和されて吸収係数が減少するため信号光が透過して出力される。制御光に対する光増幅率を大きくすることにより高速化が可能とな

り、これまでに1 Gb/sの光AND動作が達成されている⁴³⁾。

4. まとめ

半導体レーザーをベースとする複合光素子により信号処理に必要な種々の機能を実現できることを述べた。これらの光機能素子はまだ基礎研究の段階であり実用化には遠い。しかし、半導体材料の光学特性を活かすことにより従来の発光・受光と異なる新しい機能を実現できることは非常に魅力的であり、光技術の今後の発展に大いに役立つものと思われる。光波の場合、空間と時間だけでなく波長という独自の多重軸も持つことから、これらの軸を有効利用することができれば処理能力に優れた信号処理技術が構築されるであろう。今後の光機能素子の発展を期待する。

謝 辞

本稿には光技術研究開発株式会社で行った結果が一部含まれており、発表にあたり関係各位に感謝いたします。また、本稿をまとめるにあたりご協力いただいた富士通研究所の関係各位に感謝いたします。

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) Ch. Harder, K. Y. Lau and A. Yariv : Appl. Phys. Lett. 39 (1981) 382.
- 4) H. F. Liu, T. Kamiya and B. X. Du : IEEE J. Quantum Electron. QE-22 (1986) 1579.
- 5) A. Tomita, T. Terakado and A. Suzuki : J. Appl. Phys. 59 (1986) 1839.
- 6) T. Sanada, T. Odagawa, T. Machida, K. Wakao and S. Yamakoshi : Extended Abstracts of the 21th Conference on Solid-State Devices and Materials, Tokyo, August, 1989, p321.
- 7) T. Odagawa, T. Machida, T. Sanada, K. Wakao and S. Yamakoshi : Conference on Laser and Electro-optics, Anaheim, May, 1990, CFL4.

- 8) T. Odagawa, T. Sanada and S. Yamakoshi : Extended Abstracts of the 20th Conference on Solid-State Devices and Materials, Tokyo, August, 1988, p331.
- 9) T. Odagawa and S. Yamakoshi : Electron Lett. 25 (1989) 1428.
- 10) K. Inoue and K. Oe : Electron Letters 24 (1988) 512.
- 11) P. Blixt and U. Ohlander : International Topical Meeting on Photonic Switching, Kobe, April, 1990, 14C - 4 .
- 12) S. Suzuki, T. Terakado, K. Komatsu, K. Nagashima, A. Suzuki and M. Kondo : J. Light-wave Technol. **LT-4** (1986) 894.
- 13) T. Shimoe, T. Kuroyanagi, K. Murakami, H. Rokugawa, N. Mekada and T. Odagawa : International Topical Meeting on Photonic Switching, Salt Lake City, February, 1989, FC - 2 .
- 14) H. Kawaguchi, K. Oe, H. Yasaka, K. Magari, M. Fukuda and Y. Itaya : Electron Letters 23 (1987) 1088.
- 15) S. Yamakoshi, K. Kondo, M. Kuno, Y. Kotaki and H. Imai : Optical Fiber Communication Conference, New Orleans, January, 1988, PD10.
- 16) 延原裕之, 町田豊稔, 若尾清秀, 近藤賢太郎, 小田川哲史, 小林宏彦, 三川孝 : 電子情報通信学会春季全国大会, (1991年3月) C-160.
- 17) K. Kondo, H. Nobuhara, S. Yamakoshi and K. Wakao : International Topical Meeting on Photonic Switching, Kobe, April, 1990, 13D - 9 .
- 18) T. Numai, S. Murata and I. Mito : Appl. Phys. Letters 54 (1989) 1859.
- 19) R. Schimpe, B. Bauer and S. Illek : 12th International Semiconductor Laser Conference, Davos, September, 1990, L - 17 .
- 20) 田中一弘, 井上忠夫, 松田学, 山本剛之, 小林宏彦, 若尾清秀, 三川孝 : 電子情報通信学会春季全国大会, (1991年3月) C-161.
- 21) C. F. J. Schanen, S. Illek, H. Lang, W. Thulke and M. C. Amann : IEE Proceedings 137 (1990) 69.
- 22) 山本剛之, 田中一弘, 若尾清秀, 三川孝 : 第38回応用物理学関係連合講演会, (1991年3月) 29a-SF - 5 .
- 23) H. Nobuhara, H. Kobayashi, K. Wakao and S. Yamakoshi : 16th European Conference on Optical Communication, Amsterdam, September, 1990, TuB2. 4 . 延原裕之, 小林宏彦, 若尾清秀, 山腰茂伸 : 電子情報通信学会春季全国大会, (1990年3月) C-144.
- 24) M. Sakaguchi and E. Goto : Technical Digest of 1st Optoelectronic Conference, Tokyo, July, 1986, C9 - 3 .
- 25) H. Rokugawa, N. Fujimoto, T. Nakagami and K. Wakao : International Topical Meeting on Photonic Switching, Salt Lake City, March, 1991, WA3.
- 26) M. Nishio, T. Numai, S. Suzuki, M. Fujiwara, M. Itoh and S. Murata : 14th European Conference on Optical Communication, Brighton, September, 1988, PDP p.49.
- 27) C. Lin, H. Koblinski, A. Frenkel and C. A. Brackett : 14th European Conference on Optical Communication, Brighton, September, 1988, p.251.
- 28) 藤本暢宏, 六川裕幸, 山口一雄, 中神隆清 : 電子情報通信学会春季全国大会, (1990年3月) B-962.
- 29) K. Tanaka, K. Wakao, T. Fujii, H. Soda and S. Yamakoshi : Integrated Photonic Research, Hilton Head, March, 1990, WE5.
- 30) C. S. Tsai, B. Kim and F. R. El-Akkari : IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 513.
- 31) O. Mikami and H. Nakagome : Electron. Letters 20 (1984) 228.
- 32) K. Ishida, H. Nakamura, H. Matsumura, T. Kadoi and H. Inoue : Appl. Phys. Letters 50 (1987) 141.
- 33) K. Wakao, K. Nakai, M. Kuno and S. Yamakoshi : IEEE J. on Selected Areas in Communications 6 (1988) 1199.
- 34) 若尾清秀, 中井建弥, 小林宏彦, 山腰茂伸 : 電子情報通信学会春季全国大会, (1988年3月) C-481.
- 35) H. Inoue, H. Nakamura, K. Morosawa, Y. Sasaki, T. Katsuyama and N. Chinone : IEEE J. on Selected Areas in Communications 6 (1988) 1262.
- 36) 高橋靖, 天田栄一, 井上宏明 : 電子情報通信学会研究会資料, OSW89 - 4 (1989).
- 37) H. Kawaguchi : IEEE J. Quantum Electron. **QE-23** (1987) 1429.
- 38) 山腰茂伸, 若尾清秀, 延原裕之, 小田川哲史 : 電気・情報関連学会連合大会, (1989年9月) 16 - 5 .
- 39) K. Kondo, H. Nobuhara, S. Yamakoshi and K. Wakao : 7th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Kobe, July, 1989, 19C4 - 1 .
- 40) H. Nobuhara, K. Kondo, S. Yamakoshi and K.

- Wakao : Electron. Letters 25 (1989) 1485.
- 41) H. Rokugawa, N. Fujimoto, S. Masuda, K. Yamaguchi and S. Yamakoshi : 7 th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Kobe, July, 1989, 19B3 - 25.
- 42) K. Wakao, K. Nakai, T. Sanada and S. Yamakoshi : 14th European Conference on Optical Communication, Brighton, September, 1988, p316.
- 43) K. Wakao, T. Sanada, K. Kondo and S. Yamakoshi : 15th European Conference on Optical Communication, Gothenburg, September, 1989, WeA13 - 5 .