

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2008

課題番号：17068003

研究課題名（和文）偏光双安定面発光半導体レーザを用いた全光型信号処理

研究課題名（英文）All-optical signal processing using polarization bistable VCSELs

研究代表者

河口 仁司（KAWAGUCHI HITOSHI）

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授

研究者番号：402011180

研究成果の概要： 正方形メサ構造をもつ 980 nm 帯および 1.55 μm 帯面発光半導体レーザを試作し、偏光双安定特性を実現した。全光型信号処理への応用として全光型信号再生を実現した。又、980 nm 帯で 10 Gbit/s の光信号から 1 ビットを選択し、記録・再生するメモリ動作を確認した。光通信波長帯である 1.55 μm 帯ではシフトレジスタ機能をもつ光メモリを 2 個並列に接続した 4 ビットメモリを実現し、光 RAM 実現の可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	16,400,000	0	16,400,000
2006 年度	19,600,000	0	19,600,000
2007 年度	16,400,000	0	16,400,000
2008 年度	13,100,000	0	13,100,000
年度			
総計	65,500,000	0	65,500,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎，応用光学・量子光工学

キーワード：先端機能デバイス，フォトニックネットワーク，面発光半導体レーザ，光双安定，光バッファメモリ，全光型信号再生，偏光スイッチング，全光型フリップ・フロップ

1. 研究開始当初の背景

超高速通信を実現するため、光信号を電気信号に変換することなく再生中継できる光 3R 機能が必要とされ、いくつかの方式が提案されているが、本命が見い出されているとは言えない。一方、将来技術として、光パケット通信の実現が期待されている。光パケットメモリとして、ファイバ遅延線バッファメモリが提案されているが、各ビット毎の制御や必要なタイミングに情報を読み出すことが困難である。現在存在する技術を用いて、パケット交換を行おうとする試みも始まっているがその構成法が極めて複雑であるため、実用化には多くの困難が予想される。従って

全く新しい技術の創生が必要とされている。

2. 研究の目的

現在の光ファイバ通信システムは、光の特性をまだ十分には活用していない。今後の情報量の増大に応えるためには、より一層の超高速光通信システムの開発が望まれているが、その超高速化のためには信号処理も光で行う全光化が期待されている。とりわけ、全光型でのパケット単位のルーティング技術が必要とされている。本研究では、全光型 3R (Retiming, Reshaping, and Regenerating) 機能の実現をはかるとともに、これまでぜひ必要とされながらも、その実現が困難とされ

ていた、全光型超高速光パケットメモリを研究する。光信号を電気信号に変換することなく、時系列の光信号を偏光双安定面発光半導体レーザアレイの各レーザに1ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリの実現を目指す。

3. 研究の方法

偏光双安定特性を実現し、全光型信号処理へ応用するため、正方形のメサ構造をもつ VCSEL を、VCSEL の作製が比較的容易な 980 nm 帯と光通信波長帯である 1.55 μm 帯で準備した。980 nm 帯 VCSEL は MBE 成長法を用いて自作し、偏光特性が制御できる新しい構造の VCSEL を作製できるようにした。1.55 μm 帯は、研究代表者らが現在所有している装置の制限から自作が困難であったため、メーカーと共同で試作を行った。これらの VCSEL の偏光スイッチング特性を明らかにするとともに、全光型信号再生および光 RAM への応用を検討した。

4. 研究成果

(1) 980 nm 帯偏光双安定 VCSEL と光バッファメモリ

VCSEL の発振偏光が、光入力の偏光と同一の偏光にスイッチし、保持されることから、全光型フリップ・フロップ動作が実現できる。注入光の波長をそれぞれ最適化することにより、540 MHz のくり返しでは、0.2~0.3 fJ という極めて小さな光入力で安定なフリップ・フロップ動作を実現した。この値は、我々の知る限り、双安定半導体レーザでの最小スイッチングエネルギーである。又、くり返し周波数を上げていくとスイッチングパワーは上昇するが、双安定半導体レーザでは最高速である、くり返し 10 GHz までの動作を実験的に確認した。

偏光双安定 VCSEL の 2 次元アレイを自作した。一方の分布ブラッグ反射鏡 (DBR) を正方形のメサ構造に高密度プラズマ反応性イオンエッチング (Inductively-Coupled-Plasma Reactive-Ion-Etching: ICP RIE) を用いて加工し、このメサをポリイミドで埋め込む構造である。偏光分解電流-光出力特性に双安定スイッチング特性を得るとともに、光入力によるフリップ・フロップ動作も実現した。又、偏光双安定性は VCSEL では極めて一般性のある特性であり、2 つの直交偏光でレーザ発振が可能なように設計すれば、VCSEL の構造や作製プロセスによらず一般的に得られることが実験的にも明らかになった。

図 1 に示すように、AND ゲート動作およびメモリ動作を行う複数個の偏光双安定 VCSEL を用いて、光信号を電気信号に変換すること

なく全光型で、時系列の光信号を各双安定 VCSEL に 1 ビットずつ記録し、必要なタイミングにあわせ時系列信号として記録信号を読み出すことができる光バッファメモリを検討している。90° 偏光の入力データ信号と 90° 偏光のセットパルス を VCSEL (M_{1x}) に注入すると、データ信号 “1” とセットパルスが同時に注入された時にのみ VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わり、セットパルスと同時に入射されたデータ信号の情報が発振偏光状態として記録される。VCSEL 出力光を 90° 方向の偏光子を通してゲートをかけると、記録された情報が再生される。この光信号を隣の VCSEL (M_{2x}) に入力すると、 M_{1x} が記録していた情報が M_{2x} に転送される。その後リセットパルスを VCSEL M_{1x} に注入し、VCSEL の発振偏光を 0° に戻す。転送動作をくり返すことにより M_{mx} から信号が再生される。

偏光双安定 VCSEL を用い、1 ビットの光バッファメモリ動作を実験的に実証した。図 2 に構成とタイミングチャートを示す。90° 偏光の入力データ信号と 90° 偏光のセットパルスを VCSEL に注入すると、データ信号 “1” とセットパルスが同時に注入された時にのみ VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わ

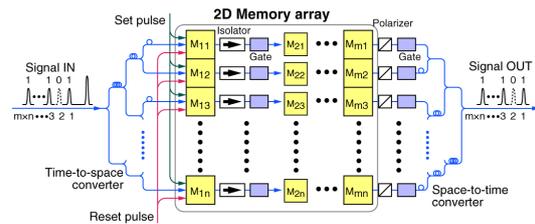
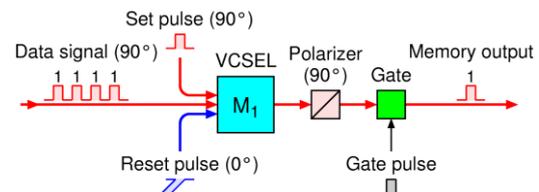
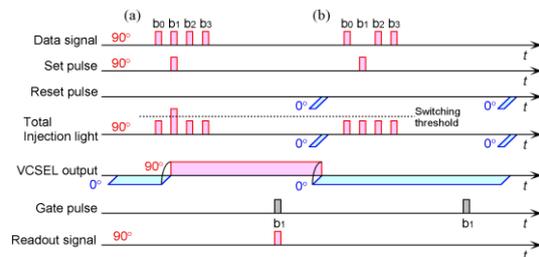


図 1: シフトレジスタ機能付き光バッファメモリ



a.



b.

図 2: 1 ビット光バッファメモリ
(a) 構成と (b) タイミングチャート

り、データ信号の情報が発振偏光状態として記録される。VCSEL 出力光を 90° 方向の偏光子に通してゲートをかけると、記録された情報が再生される。再生後にリセットパルスを VCSEL に注入すると、VCSEL の発振偏光が 0° に戻る。入力データは前半を “1111” 後半を “1011” とし、2 ビット目にセットパルスのタイミングを合わせた。前半は VCSEL の発振偏光が 90° に切り替わりメモリ出力のパルス光が得られているのに対して、後半は発振偏光が 0° のままでパルス光が出力されていない。この結果から、4 ビットの入力信号から 1 ビットを抽出し記録/再生する基本動作を確認できる。図 3 に 10 Gbit/s RZ 信号に対する実験結果を示す。書き込み、読み出しの基本動作が実現されていることがわかる。

又、VCSEL を 2 個使い、同一波長の注入光により 2 つの VCSEL の並列スイッチング動作を行うことにより、2 ビットの光バッファメモリ動作を実現した。 0° および 90° 偏光の注入光波長は、それぞれ 0° および 90° 偏光の VCSEL 発振波長に数 GHz の精度で合わせる必要がある。実験結果から、4 ビットの入力信号から 2 ビットを抽出し、記録/再生する基本動作を確認した。

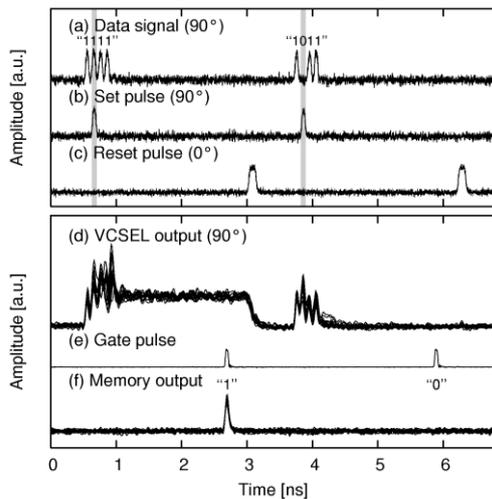
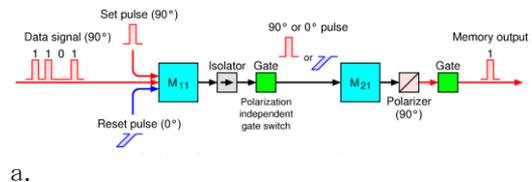


図 3: 10 Gbit/s RZ データ信号の光記録・再生実験結果

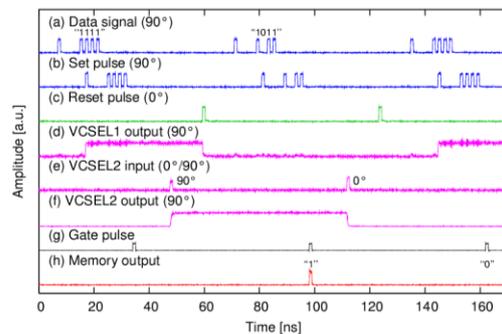
(2) シフトレジスタ機能

光入力信号の “1” 又は “0” は VCSEL の発振偏光として記録される。この VCSEL (VCSEL1) の発振光を 2 番目の VCSEL (VCSEL2) へ注入することにより、VCSEL2 の偏光をスイッチし、情報を転送することができる。この機能を我々はシフトレジスタ機能と呼んでいる。2 つの方式によりシフトレジスタ機能を実現した。1 つは、VCSEL1 の発振光を VCSEL2 へ注入することにより情報を転

送した後、VCSEL2 から信号を読み出し、その後、リセット光で VCSEL2 の偏光を 0° にリセットする方法である。もう 1 つは、図 4 に示す「上書き式」である。VCSEL2 に VCSEL1 の発振光を注入することにより、VCSEL1 の情報を VCSEL2 に上書きする方式であり、VCSEL2 から信号を読み出した後もリセット動作を行なわない。両方式を実験的に実証したが、本報告書では「上書き式」について詳しく述べる。前半、後半ともセットパルスのタイミングを 2 番目のビットに合わせている。前半では “1” であるので、VCSEL1 は 90° 偏光にスイッチし、“1” が VCSEL1 の 90° 偏光として記録される。ゲート 1 を開くことにより、VCSEL1 の光出力を切り出し、VCSEL2 の光入力とする。この光入力により、VCSEL2 の偏光は 90° にスイッチし、VCSEL1 の情報が VCSEL2 に転送され記録される。VCSEL2 の光出力を 90° 偏光が通過する偏光子を通し、ゲート 2 を開くことによりメモリ出力が得られる。一方、後半では、2 番目のビットは “0” であるから VCSEL1 の偏光はスイッチせず 0° 偏光のままである。ゲート 1 を開くと 0° 偏光の VCSEL1 出力が VCSEL2 に注入され、VCSEL2 の偏光が 0° にスイッチされる。VCSEL2 の光出力を 90° 偏光が通過する偏光子を通し、ゲート 2 を開くことによりメモリ出力を得るが、VCSEL2 の偏光は 0° のため出力は “0” となり、2 番目の信号が読み出されたことになる。実験により、上書きのすべての組み合わせ、つまり、“0” → “1”, “1” → “1”, “1” → “0”, および “0” → “0” が実現できることを示した。



a.



b.

図 4: 上書き方式によるシフトレジスタ機能付き光バッファメモリ
(a) 構成と (b) 記録・再生実験結果

(3) 1.55 μm 帯光バッファメモリ

光通信の中で用いるためには、波長を 1.55 μm にすることが望ましい。正方形メサ構造を有する 1.55 μm 帯 VCSEL を試作し、偏光双安定特性と全光型のフリップ・フロップ動作を実現した。図 5 に VCSEL の構造を示す。VCSEL の上部 DBR および活性層の形状と大きさを設計し、試作した。VCSEL は InP 基板上に減圧有機金属気相成長 (MOCVD) 法でモノリシックに成長されている。活性層は歪補償多重量子井戸である。上部の n-InP と活性層の間に、炭素をドーパした InAlAs 層によるトンネル接合層が設けられている。上部と下部の反射鏡は InAlAs/InAlGaAs の DBR である。活性層を選択的にウエットエッチングして空気ギャップを形成し、電流狭窄を行っている。矩形のメサ構造となっている上部 DBR の辺は、InP 基板の $[110]$ 軸と $[\bar{1}10]$ 軸に沿っている。全ての VCSEL で良好な単一縦モード発振が得られ、サイドモード抑圧比は 30 dB 以上であった。また、基板結晶の $[\bar{1}10]$ 軸方向と $[110]$ 軸方向のどちらかの向きの直線偏光で発振した。以降、 $[\bar{1}10]$ 軸方向の偏光を 0° 、 $[110]$ 軸方向の偏光を 90° とする。

偏光分解電流-光出力特性を測定した結果、DBR および活性層のサイズが 10 μm の素子では、多くの素子がヒステリシスを伴う偏光スイッチ特性を示した。直線偏光発振し、直交偏光抑圧比は約 31 dB であった。偏光分解したスペクトルと偏光分解した近視野像の測定から、VCSEL は両偏光とも単一波長・最低次単一横モードで動作していることが分かった。ヒステリシスを示す電流値に設定し、発振偏光に直交した偏光の光を VCSEL に注入すると、発振偏光が切り替わり、光注入を停止しても切り替わった方向で発振偏光が保持された。注入光の波長は、切り替える偏光方向の発振波長に合わせた。光強度は 80

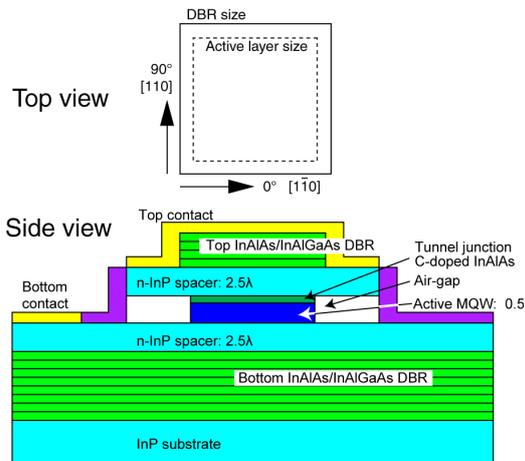
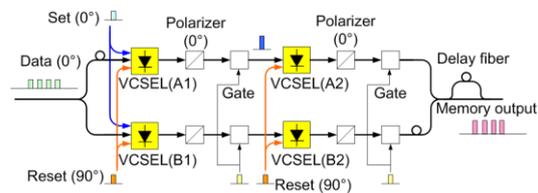


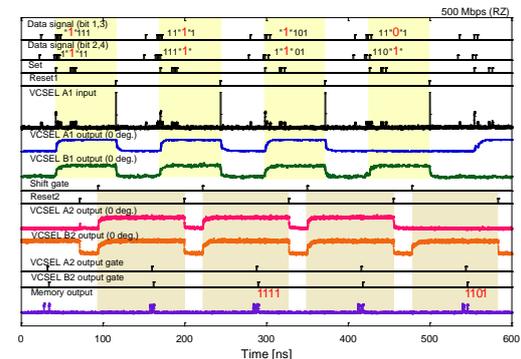
図 5: 1.55 μm 帯 InAlGaAs/InP 面発光半導体レーザ

nW と偏光双安定 VCSEL の光出力 720 μW に比べて非常に小さい。このように 2 つの直交する偏光間で全光型のフリップ・フロップ動作を実現した。又、最近の実験により、3.1 GHz でのフリップ・フロップ動作が光入力 10 fJ で実現した。

980 nm 帯と同様に、VCSEL を 2 個並列に用いた 2 ビット動作、およびシフトレジスタ動作を実現した。さらに、シフトレジスタ機能を持つ光メモリを 2 個並列に接続することにより、4 ビットのデータの記録と任意のタイミングでの再生が行える、シフトレジスタ機能付き 4 ビット光バッファメモリを初めて実現した。実験構成と実験結果を図 6 に示す。データ信号 “1” とセット信号を同時に VCSEL に入力したとき、注入光のパワーが偏光スイッチングの閾値を上回る AND ゲート動作により、1 列目の VCSEL (A1, B1) の発振偏光が 0° に切り替わる。これにより、4 ビットのデータの中から 1, 2 ビット目の情報が VCSEL の偏光状態として記録される。そして 1 列目の VCSEL 発振光 (0°) を 2 列目の VCSEL (A2, B2) へ入力することにより、2 列目の VCSEL の偏光が 0° に切り替わり、情報が転送される。さらに 1 列目の情報が 90° 偏光のリセット信号により消去された後、VCSEL に新たに 4 ビットのデータの中から 3, 4 ビット目のデータを記録することにより、光メモリに 4 ビットの情報が記録される。この実験では並列化の規模が 2 つであり小さいため、4 ビットのデータを 2 回に分けて読み込み、



a.



b.

図 6: シフトレジスタ機能付き 4 ビット光バッファメモリ
(a) 構成と (b) 記録・再生実験結果

さらに出力信号を出力直前の遅延ファイバで1周期遅延して合波することにより4ビットのデータの記録と再生を行った。その結果、示すようにビットレート 500 Mbit/s の RZ 光入力信号に対しシフトレジスタ機能付き 4 ビット光バッファメモリ動作を実現した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① T. Katayama, Y. Sato, T. Mori, and H. Kawaguchi, “Polarization bistable characteristics of 1.55 μm vertical-cavity surface-emitting lasers,” *Japanese J. Appl. Phys., Lett.*, 査読有, vol. 46, no. 49, pp. L1231-L1233, Dec. 2007.
- ② H. Kawaguchi, T. Mori, Y. Sato, and Y. Yamayoshi, “Optical buffer memory using polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers,” *Japanese J. Appl. Phys., Express Lett.*, 査読有, vol. 45, no. 34, pp. L894-L897, Aug. 2006.
- ③ T. Mori, Y. Yamayoshi, and H. Kawaguchi, “Low-switching-energy and high-repetition-frequency all optical flip-flop operations of a polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser,” *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol. 88, no. 10, pp. 101102-1-101102-3, May 2006.

[学会発表] (計 48 件)

- ① T. Katayama, T. Ooi, and H. Kawaguchi, “4-bit all-optical buffer memory with shift register function using polarization bistable VCSELs,” OFC 2009, JThA33, San Diego, USA, Mar. 26, 2009.
- ② H. Kawaguchi, “All-optical flip-flop operation in polarization bistable VCSELs and its application for photonic buffer memory,” 2009 IEEE / LEOS Winter Topical Meetings, TuB2.4, Innsbruck, Austria, Jan. 13, 2009.
- ③ T. Mori, Y. Sato, and H. Kawaguchi, “10 Gb/s optical buffer memory using a polarization bistable VCSEL,” 33rd European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2007), Berlin, Germany, 3.4.3, Sep. 18, 2007.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：シフトレジスタ型光メモリ装置
発明者：森隆、河口仁司、片山健夫
権利者：奈良先端科学技術大学院大学
種類：特許

番号：公開 2008-262122

出願年月日：平成 19 年 4 月 13 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

平成 17 年度文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」領域 Web ページ内「ニュースレター」等
<<http://www.allopt.pi.titech.ac.jp/~Tokutei/>>

プレスリリース「次世代光通信のための高速光メモリーを初めて実現 ～「全光型」通信の実現に突破口開く～」
<http://www.naist.jp/pressrelease/detail_j/topics/597/>

プレスリリース「光通信の速度限界を突破～次世代光ルータ・光交換機の小型化・高速化に期待～」
<http://www.naist.jp/pressrelease/detail_j/topics/212/>

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・河口研究室
<<http://mswebs.naist.jp/LABs/kawaguchi/index-j.html>>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河口 仁司 (KAWAGUCHI HITOSHI)
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・教授
研究者番号：402011180

(2) 研究分担者

片山 健夫 (KATAYAMA TAKEO)
奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・助教
研究者番号：80313360

(2005 年 4 月～2006 年 3 月)

高橋 豊 (TAKAHASHI YUTAKA)
山形大学・工学部・電気電子工学科・准教授
研究者番号：00260456