

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360034

研究課題名（和文） 光通信波長帯多ビット偏光双安定光メモリ

研究課題名（英文） Multi-bit polarization bistable optical memory operating in the optical fiber transmission wavelength range

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：40211180

研究成果の概要（和文）：980 nm 帯偏光双安定 VCSEL を用いて、フリップ・フロップ型として世界最高速である、20 Gb/s RZ 信号と 40 Gb/s NRZ 信号に対する光メモリ動作を実現した。又、酸化狭窄構造を導入し、従来より 1 桁低く世界最小の 0.85 mA のバイアス電流で、フリップ・フロップ動作を実現した。1.55 μm 帯においても、12.5 Gb/s RZ 信号の光メモリ動作および光メモリモジュールを実現した。

研究成果の概要（英文）：The fastest known operation of all-optical flip-flop memory was experimentally demonstrated using a 980-nm polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL). All-optical flip-flop operation was achieved at a record low bias current of 0.85 mA using a VCSEL with an oxidation confinement structure. The memory operation was also achieved for 12.5 Gb/s RZ signals in the 1.55 μm wavelength range. 1.55 μm pigtailed modules of the optical memory were successfully constructed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2010 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：工学

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、全光型フリップ・フロップ、偏光双安定、面発光半導体レーザ、全光型バッファメモリ、光 RAM、光双安定モジュール

1. 研究開始当初の背景

急速な情報量の増大に応えるため、より一層高速の光ファイバ通信システムの開発が望まれている。高速化に伴い、信号の収束分配を行うノードにおける信号処理量の増大が問題になっている。現状のネットワークでは IP パケットのルーティング等の信号処理は、ルータ等において電氣的に行われている。しかし、電氣的な処理では、その速度限界に

よって大容量化が難しいこと、及び中継のたびに電気光信号変換が必要になるなどの欠点がある。最終的には、光信号のまま IP パケット毎にルーティング処理を行うルータの実現が期待される。ルータには、IP 単位でのスイッチ機能とパケットの衝突防止のためのメモリ機能が不可欠であり、これらをフォトニック技術によって実現することが課題である。

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を用いること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。例えば、時系列信号を空間並列信号に変換した後、各チャンネル毎に分岐し、全てのチャンネルの信号をそれぞれ受光器で受け、電気信号に変換した後、処理しようとするものである。ノードごとに光電変換が必要であり、その構成法が極めて複雑である。

一方、全光型バッファメモリの研究動向は光双安定素子などを用いたビットメモリと、大きな屈折率分散を用いた“slow-light”の2種類に大別される。本研究の光バッファメモリは前者に属する。本提案以外では、光学的に結合した2つのリングレーザの発振方向のスイッチを利用したビットメモリが報告されている。又、フォトリソニック結晶構造を用いると極めて小さなビットメモリが実現できる可能性があるが、本研究の方式を用いた方がはるかに低光入力で動作する。屈折率分散を用いた“slow-light”は、物理的興味から最近多くの報告がなされている。しかし、遅延時間と帯域はトレードオフの関係にあり、原理的に見て数ビットのメモリが実現できる程度である。

以上述べたいくつかの技術の比較から、本研究で提案している偏光双安定面発光半導体レーザ(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: VCSEL)を用いた、シフトレジスタ機能付光バッファメモリは極めて有望な方法であると言える。

2. 研究の目的

本研究では、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VCSEL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機能をもつ、全光型バッファメモリを光通信波長帯(1.55 μm 帯)で実現する。特に、実用化に向け大きな課題である多ビット光メモリの実現をめざし、メモリ動作特性の均一化の手法およびモジュール化の実現に重点を置いて研究する。又、高速化についても合わせて検討する。

3. 研究の方法

本研究で実現するバッファメモリの基本となる素子は偏光双安定VCSELである。図1に示すように、光導波路が正方形の断面形状をもつVCSELには、電界方向が正方形の辺に沿う2つの固有モードが存在する。この2つのモードは利得飽和を通して強結合し、双安定性が生じる。光パルスを外から入射すると、入射パルス光と同一偏光のモードに

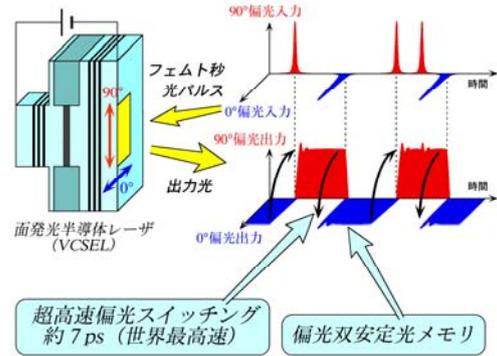


図1. 偏光双安定面発光半導体レーザ

スイッチし、入射パルスがなくなった後もスイッチした偏光を保持する偏光双安定光メモリが実現できる。我々の測定の結果、偏光のスイッチング速度は約7 psであり、半導体レーザをベースにした光双安定素子の中で、最も高速にスイッチングできる。

この偏光双安定VCSELを用いた光バッファメモリの動作原理を図2に示す。VCSELには、0°と90°の2つの発振偏光が存在する。90°偏光の入力データ信号と90°偏光のセットパルス(VCSEL (M_{1x}))に注入すると、データ信号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。

研究代表者らはこれまでに、980 nm帯のVCSELを用いて、世界最小の入力エネルギー動作である0.2~0.3 fJでの全光型フリップ・フロップ動作を実現するとともに、世界最高速である10 GHzまでの高速全光型フリップ・フロップ動作を実現した。さらに、4ビットの入力信号から1ビットを抽出し、記録/再生する光バッファメモリの基本動作を10 Gbit/s RZ光信号に対し実現した。又、VCSELを2つ並列に配置し、4ビットのデータ信号から、2ビットを抽出して記録/再

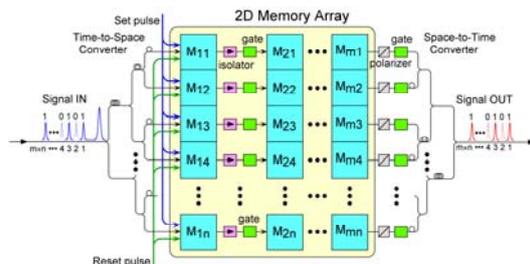


図2. 光バッファメモリの概念図

生することにも成功した。さらに、1 段目の VCSEL がもつ情報を 2 段目の VCSEL へ転送するシフトレジスタ機能も実現した。

又、研究代表者らは 1.55 μm 帯で動作する正方形メサ構造 InAlGaAs/InP VCSEL (図 3) を試作し、偏光双安定動作を実現し、光注入による全光型フリップ・フロップ動作を実現した。さらに、1 ビットの光バッファメモリ動作を実証し、シフトレジスタ機能も実現した。又、シフトレジスタを 2 つ並列に用いることにより、4 ビット光メモリ動作にも成功している。

本研究では、これらのこれまでの研究成果を発展させ、省電力化、高速化を検討した。

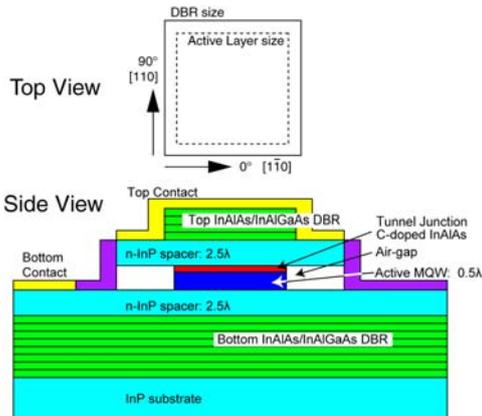


図 3. 1.55 μm 偏光双安定 VCSEL の構造

4. 研究成果

(1) 偏光双安定 VCSEL の低消費電力化

偏光双安定 VCSEL を用いたメモリ動作では VCSEL の駆動電流は 10 mA のオーダーであった。活性層近傍の AlAs 層を酸化して電流を狭窄し、活性層へ注入される電流密度を増加する酸化狭窄構造は VCSEL の低閾値化に有効な手法である。この手法を偏光双安定 VCSEL に導入し、閾値電流を低下することにより、双安定動作が可能な電流も下がり、消費電力の低減が期待できる。

作製した 980 nm 帯酸化狭窄構造 VCSEL を図 4 に示す。p-DBR は $5.5 \times 6.0 \mu\text{m}$ の矩形光導波路で、横モードを規定する。酸化狭窄層、活性層および光出射側の n-DBR は $50 \mu\text{m}$ 角の正方形のメサをもつ。酸化狭窄、p-DBR メサ導波路形成の後、ポリイミドで埋め込み、その上に p 側電極を形成する。電流狭窄層となる高 Al 組成層を、 $50 \mu\text{m}$ 角のメサ側面から水蒸気により選択的に酸化し、 $50 \mu\text{m}$ 角メサの中心部に約 $3 \mu\text{m}$ 角の電流アパーチャを形成した。

酸化狭窄構造 VCSEL の 10°C における電流-電圧特性と電流-偏光分解光出力特性の測定結果を図 5 に示す。閾値電流は 0.22 mA であり、0.71~1.64 mA および 2.28~3.53 mA で偏光双安定特性が得られた。この閾値

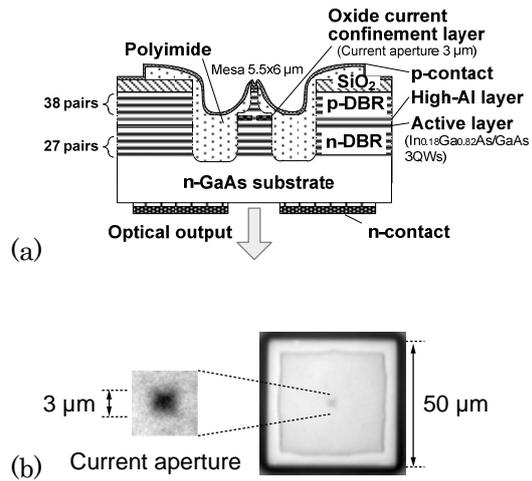


図 4. 酸化狭窄偏光双安定 VCSEL の構造 (a) と酸化狭窄構造の透過像 (b)

電流は、偏光双安定 VCSEL としては最小である。発振偏光は矩形メサの辺に沿った 0° と 90° であり、2 つの発振偏光状態とも偏光消光比が 20 dB 以上の直線偏光であることがわかった。又、単一縦モード・最低次単一横モードで発振している。

この VCSEL に、外部から光を注入することにより、発振偏光のスイッチを行う全光型フリップ・フロップ動作をバイアス電流 0.85 mA で実証した。図 6 に示す様に、 90° 偏光で発振している VCSEL に 5 Gb/s NRZ 信号に相当する 200 ps 幅の 0° 偏光パルスを入力したところ発振偏光が 0° にスイッチした。その状態を保持したまま 7.3 ns 後に 90° 偏光パルスを入力したところ発振偏光が 90° にスイッチし、18.3 ns 後に再び 0° 偏光パルスを入力して 0° 偏光に切り換えるまでその発振状態

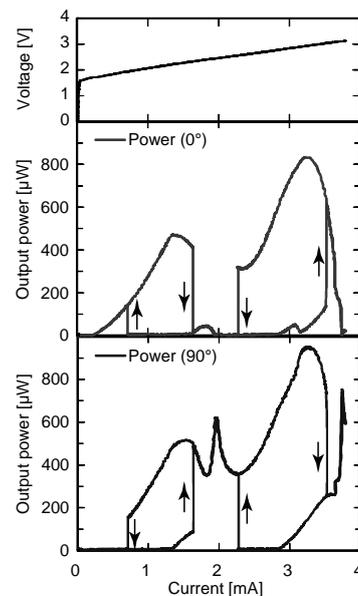


図 5. 電流-電圧特性と電流-偏光分解光出力特性

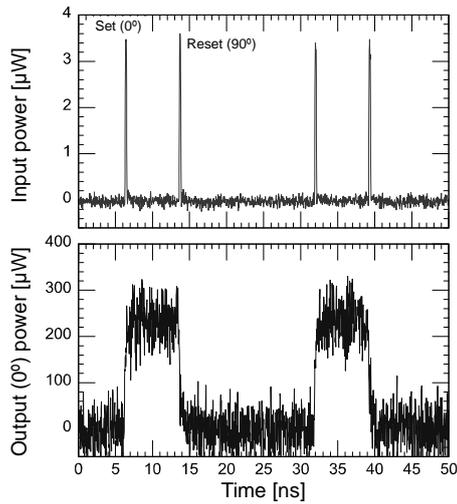


図 6. 全光型偏光フリップ・フロップ動作

を保持した。この時 VCSEL の光出力は 258 μW で、入力光パルスのパワーは 3.6 μW (パルスエネルギー: 0.72 fJ)であり、この様な低バイアス電流動作でも光利得を持ったフリップ・フロップ動作を得た。

(2) 高速全光型メモリ動作

偏光双安定 VCSEL は 1 ビットの情報を偏光状態として記録する全光型メモリとして使用できる。データ信号光中の記録したいビットに時間を合わせてセット光を合波し、VCSEL の発振偏光(90°)と直交する偏光(0°)で入射する。‘1’のデータ光とセット光を合波した時に VCSEL の偏光スイッチング閾値を越える AND ゲート動作をするように光強度を設定すれば、データ光が‘1’か‘0’かに応じて VCSEL の発振偏光が 90°か 0°に定まる。そして、記録した信号は、VCSEL の光出力にゲートを用いることで、任意のタイミングで読み出すことができる。

データ信号の速度が速くなるに従い、偏光スイッチングに必要な光ピーク強度は大きくなる。さらに連続したデータビット列を入射した際に、VCSEL 共振器内に光パルスが多数蓄積し、活性層中のキャリア数の変化が大きくなり、セット光パルスを入射していない場合でも偏光がスイッチし、メモリが誤動作する場合が生ずる。VCSEL 発振光に対するデータ信号光の周波数の差(離調周波数)を大きくすると、共振器内での入力光パルスの寿命が短くなり、蓄積が抑制されこの問題は低減できる。しかし、偏光スイッチングに必要な入力光強度は入射光と偏光スイッチ後の VCSEL 発振光との間の離調周波数に強く依存するので、光メモリが正常に動作する離調と光パワーの条件を、2 モードのレート方程式を用いて解析することにより求めた。

20 Gb/s 2^6-1 PRBS RZ および 40 Gb/s NRZ 信号の光メモリ動作を実現した。980

nm 帯 InGaAs/GaAs VCSEL を、偏光双安定状態となる駆動電流 9.28 mA で動作させる。この時の光出力は約 430 μW であった。レート方程式解析や、離調特性の測定により求めたメモリ動作条件を基にして、VCSEL 発振光とデータ及びセット光の離調が約 23 GHz、データ光強度 250 μW 、セット光強度 190 μW で 20 Gb/s RZ データ信号のメモリ動作を行った。図 7 に示すように、データ光は 2^6-1 ビットの擬似ランダムパターン RZ 信号を 9 回入力している。最初の 3 回は 2^6-1 ビットのデータ列の最初の 3 ビットを、次はデータ列の中央辺りの 3 ビットを、最後の 3 回はデータ列中の最後の 3 ビットを対象として、各回毎に異なるビットにセット光を合わせて VCSEL に入射している(図 7(a)、(b))。‘1’のデータ光とセット光が重なった時に VCSEL の発振偏光が 90°から 0°に変化している事が、0° 偏光の出力光波形からわかる(図 7(c))。入力光信号の波長も強度も変えず、セット光のタイミングのみを変えて実験している。データ光信号パルスの共振器内への蓄積が少ない最初の 3 回と、多く蓄積される可能性のある最後の 3 回が同じ条件で正しく動作していることから、蓄積が抑制されていることが分かる。以上の結果から 20 Gb/s の 2^6-1 ビットのデータ信号列の任意のビットに対してメモリ動作が可能な事が分かる。このような高ビットレートにおいても、光利得を持った全光メモリ動作をしている。

ほぼ同様の構成で 40 Gb/s NRZ 信号に対しても光利得を持った全光メモリ動作を実現した。

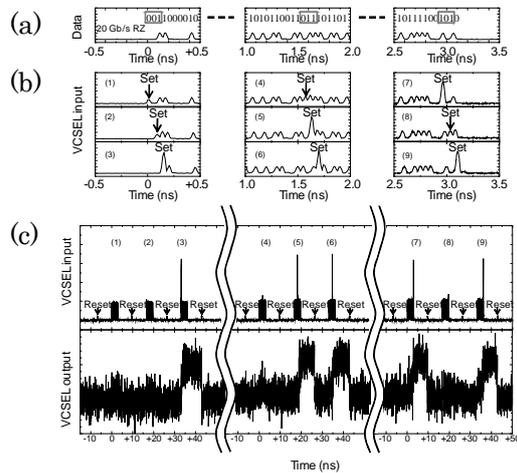


図 7. 20 Gb/s 2^6-1 ビット擬似ランダム RZ 信号光メモリ実験結果 (a) 入力波形(拡大), (b) 入力波形, (c) 0°偏光成分の出力波形

(3) 1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL を用いた 12.5 Gb/s RZ 信号の全光型メモリ動作

12.5 Gb/sのRZ信号の1ビットメモリ動作を1.55 μm 帯で実現した。入力光の波長をVCSEL発振波長に対して約-6.5 GHz離調し、データ光強度を250 μW 、セット光強度を190 μW とした。図8に示す6ビットのデータパルスの4ビット目に合わせ、セット光パルスを入力した。データ"1"の時にのみVCSELの発振偏光が90°から0°にスイッチしている。VCSELの発振偏光はリセット光が入力されるまで保持されており、その間に任意のタイミングでVCSELの出力ポートに配置した光ゲートを開くことにより、記録した情報を読み出すことも成功した。また、このときのVCSELの出力光強度は880 μW であり、光利得をもった全光型メモリとして動作している。

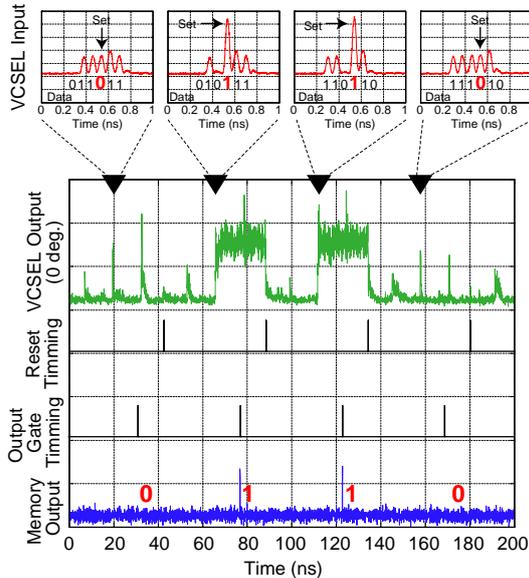


図8. 12.5 Gb/s RZ信号の光メモリ動作

(4) ピグテール型偏光双安定 VCSEL モジュール

これまでの偏光双安定 VCSEL を用いた光

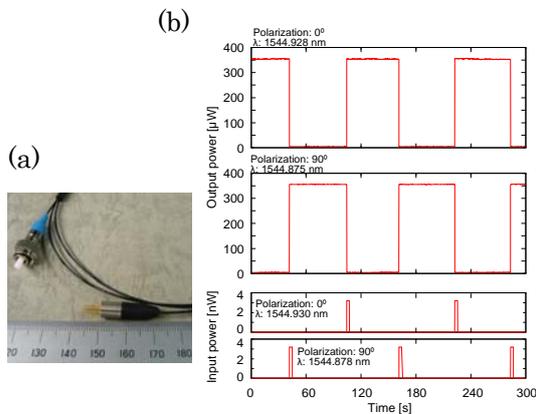


図9. ピグテール型偏光双安定 VCSEL モジュールの外観(a)と全光フリップ・フロップ動作(b)

メモリの実験では、VCSEL と光ファイバを対物レンズを用いて結合していたため、大型で、不安定であった。実用的なメモリにするためには、小型で安定にする必要がある。そこで偏光双安定 VCSEL へ偏波保持ファイバをマイクロレンズで結合し、図9(a)に示すピグテール型モジュールを作製した。このモジュールに加工した後も I-L 特性に偏光双安定特性が得られた。双安定領域にバイアス電流を設定し、モジュールのピグテールファイバに光サーキュレータを接続して、外部から偏光が直交する光を交互に入力し、図9(b)に示すように VCSEL の発振偏光が交互に切り替わる全光フリップ・フロップ動作を実現した。

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8件)

① 河口仁司、「双安定半導体レーザーによる光信号処理」、レーザー研究、40巻、369-374、2012、査読有

② T. Katayama, A. Yanai, K. Yukawa, S. Hattori, K. Ikeda, S. Koh, and H. Kawaguchi, “All-optical flip-flop operation at 1-mA bias current in polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers with an oxide confinement structure,” IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 23, 1811-1813, 2011, 査読有

③ J. Sakaguchi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “High Switching-Speed Operation of Optical Memory Based on Polarization Bistable Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser,” IEEE J. Quantum Electron., Vol. 46, 1526-1534, 2010, 査読有

④ J. Sakaguchi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “All-optical memory operation of 980-nm polarization bistable VCSEL for 20-Gb/s PRBS RZ and 40-Gb/s NRZ data signals,” Optics Express, Vol. 18, 12362-12370, 2010, 査読有

⑤ H. Kawaguchi, “Polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers – application for bit memory,” Opto-electronics Review, Vol. 17, 265-274, 2009, 査読有

⑥ T. Katayama, T. Ooi, and H. Kawaguchi, “Experimental demonstration of multi-bit optical buffer memory using 1.55- μm polarization bistable vertical-cavity surface-emitting lasers,” IEEE J. Quantum Electron., Vol. 45, 1495-1504, 2009, 査読有

⑦ 河口仁司、「偏光双安定 VCSEL と光バッファメモリへの応用」、レーザー研究、37巻、

608-613, 2009, 査読有

⑧ T. Mori, Y. Sato, and H. Kawaguchi, "10-Gbps optical buffer memory using a polarization bistable VCSEL," IEICE Trans. Electron., E92-C, 957-963, 2009, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

① T. Katayama, A. Yanai, K. Yukawa, S. Hattori, K. Ikeda, S. Koh, and H. Kawaguchi, "All-optical flip-flop operation of polarization bistable VCSELs with an oxide confinement structure," IEEE Photonics 2011 Conference (IPC11), 2011.10.12, Arlington, USA

② 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた光メモリ」, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会(依頼講演), 2011.9.15, 北海道大学(札幌市)

③ 片山健夫, 河口仁司, 「酸化狭帯偏光双安定 VCSEL を用いた全光フリップ・フロップのサブ mA 動作」, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011.9.13, 北海道大学(札幌市)

④ 片山健夫, 矢内彰雄, 湯川浩平, 服部聡史, 池田和浩, 黄晋二, 河口仁司, 「酸化狭帯構造を持つ偏光双安定 VCSEL の全光フリップ・フロップ動作」, 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 2011.5.20, 金沢大学(金沢市)

⑤ 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた光メモリモジュールの基礎的検討」, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2010.9.15, 大阪府立大学(堺市)

⑥ H. Kawaguchi, "Ultrafast all-optical memory operation using a polarization bistable VCSEL," The 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2010) (Invited), 2010.7.1, Munich, Germany

⑦ J. Sakaguchi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "All-Optical Memory Operation for 20-Gb/s PRBS RZ and 40-Gb/s NRZ Signals Using 980-nm Polarization-Bistable VCSEL," The 15th European Conference on Integrated Optics (ECIO 2010), 2010.4.8, Cambridge, United Kingdom

⑧ 片山健夫, 尾藤直樹, 河口仁司, 「1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL を用いた 12.5 Gb/s RZ 信号の全光型メモリ動作」, 第 57 回応用物理学会関係連合講演会, 2010.3.18, 東海大学(平塚市)

⑨ 坂口淳, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた 20-Gb/s RZ 及び 40-Gb/s NRZ 信号全光型メモリ動作」, 2010 年電子情報通信学会総合大会, 2010.3.17, 東北大学(仙台市)

台市)

⑩ 坂口淳, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた光メモリの高速動作に向けた検討」, 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 2009.12.11, 機械振興会館(東京都港区)

⑪ 坂口淳, 片山健夫, 河口仁司, 「高速光メモリ実現をめざした偏光双安定 VCSEL の動作解析」, 第 56 回応用物理学会関係連合講演会, 2009.4.2, 筑波大学(つくば市)

⑫ 大井智裕, 尾藤直樹, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いたシフトレジスタ機能付き 4 ビット光バッファメモリ」, 第 56 回応用物理学会関係連合講演会, 2009.4.2, 筑波大学(つくば市)

[産業財産権]

○取得状況(計 1 件)

名称: 双安定半導体レーザを用いた超高速光メモリー方法及びその装置

発明者: 河口仁司

権利者: 科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 第 4368573 号

取得年月日: 平成 21 年 9 月 4 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページアドレス

<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: 40211180

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

黄 晋二 (KOH SHINJI)

奈良先端科学技術大学院大学・物質創成科学研究科・准教授

研究者番号: 50323663

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