

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420307

研究課題名(和文) 偏光双安定VCSELを用いた全光型JKフリップ・フロップの実現

研究課題名(英文) All Optical JK Flip-Flop Operation Using Polarization Bistable VCSEL

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：光通信に光電変換を用いない全光化は、高速化、低消費電力化のために不可欠であり、全光型フリップ・フロップ素子が多数研究されているが、そのほとんどはRS型であり、JK型の実現は遷移回路の単純化が容易になるため集積化に課題の多い光素子で回路を構築する際に、素子数が低減できメリットとなる。偏光双安定VCSELに帰還光学系を組み合わせることでJKフリップ・フロップ動作が可能であることを提案し、帰還光学系や異波長光パルス入力による信号処理など要素技術の研究を行った。

研究成果の概要(英文)：All-optical communication system, which does not use opto-electric conversion, is indispensable for high speed operation and low power consumption. A large number of all-optical flip-flop operation systems have been studied, but most of them are RS type. On the other hand, realization of the JK type makes it easy to simplify the transition circuit, so it is merit that the number of elements can be reduced when constructing a circuit with an optical element which is subject to integration many subjects.
In this study, we proposed that the JK flip-flop operation is possible by combining a polarization bistable VCSEL and an optical feedback system. We studied elemental technologies such as the optical feedback system and the signal processing by optical pulses having different wavelength.

研究分野：工学

キーワード：光デバイス 全光型論理素子 半導体レーザ 偏光双安定 フォトニクスネットワーク

1. 研究開始当初の背景

光通信に光電変換を用いない全光化は、高速化、低消費電力化のために不可欠であり、基礎的な要素技術の研究は活発に進められているが、実際のパケット処理の研究はあまり進展していない。この原因は、全光型論理回路が複雑な処理を柔軟にこなすことが困難であるためである。ルータの基本機能は、宛先のアドレスを識別して経路を切り替えるものであったが、現在の電子ルータは優先度などパケットの種類や、送出先の負荷状況に応じて経路を切り替えるなど複雑な処理も行っている。かつて、光コンピュータの実現のため汎用的な光論理素子の研究が行われていたが、電子素子の急速な高速化、高集積化に伴い、小型集積化に劣る光論理素子の研究は下火になり、ルータの信号処理に適応可能な全光型論理素子の研究は十分になされていない。そこで全光型の JK フリップ・フロップを実現することを本研究の目的とする。

現在、全光型フリップ・フロップ素子が多数研究されているが、そのほとんどは RS 型であり、JK 型は 1 例が報告されているのみである。JK 型は動作に冗長性があり状態遷移関数にドントケアが多く表れるため遷移回路の単純化が容易になる。これは集積化に課題の多い光素子で回路を構築する際に、素子数が低減できメリットとなる。

これまでに偏光双安定 VCSEL を用いた信号処理、光メモリの研究を行ってきた。図 1 に示す様に、直交する 2 つの発振偏光モードをもつ VCSEL に、発振偏光に直交する光パルスを入力すると、発振偏光が 90 度回転し、入力が途絶えてもその偏光を保持する偏光双安定スイッチ特性を示す。そして、発振している偏光と同じ偏光の光パルスを入力しても発振偏光は変化しない。つまり、直交する偏光を Set, Reset とみなすと、偏光双安定 VCSEL は RS 型のフリップ・フロップ素子であるといえる。これまでに 0.98 μm 帯 VCSEL の偏光双安定スイッチは、7 ps の世界最高速のスイッチング速度の全光型スイッチであることを、我々の研究グループが明らかにした。また、0.3 fJ の世界最低のスイッチングエネルギーで動作することも確かめた。さらに双安定型全光メモリとしては最高速の 40 Gb/s NRZ 信号の記録にも成功した。光通信に適用する場合、1.55 μm 帯において動作する必要があるが、片山が世界で初め

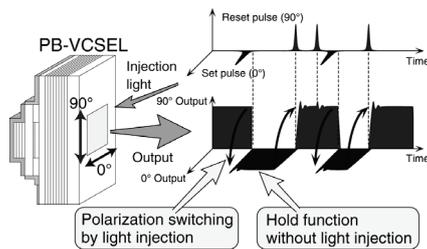


図 1: VCSEL の偏光双安定スイッチ

て 1.55 μm 帯 VCSEL における偏光双安定動作を実験により明らかにし、AND ゲート動作による全光型メモリを実現した。さらにそのメモリを直列と並列に 4 個接続し、信号列中の任意のビットが記録できる方式のバッファメモリとしては最大規模の 4 ビットの光信号を記録・再生するシフトレジスタ機能付き光バッファメモリも実現した。また、最近では AND ゲート動作によりヘッダ中の任意の 1 ビットを識別し、その結果によりパケットの出力ポートを切り替える全光型ヘッダ認識・パケットスイッチングも実現した。

2. 研究の目的

VCSEL の光入力による偏光双安定スイッチングは、RS フリップ・フロップの動作を示す。また、入力には閾値が存在し、2 つの光パルスが同時に入力した場合のみスイッチする AND ゲートとしても動作する。そこで、はじめの研究として偏光双安定 VCSEL を用いて、JK 型の動作を行う光学系を構築し、基本動作が可能であることを示す。RS フリップ・フロップは、出力(Q, \bar{Q})をそれぞれ K 入力と J 入力とで AND をとり、Reset と Set に入力する($S=\bar{Q} \cap J$, $R=Q \cap K$)と JK 型として動作することが知られている。そこで、図 2 に示す様に VCSEL の 90°偏光出力を 0°偏光として外部からの 0°偏光の信号光(J 入力)と合波して入力し、0°偏光出力も同様に 90°偏光へ入力すると、表 2 の動作を示す JK フリップ・フロップとなる。この JK 型の光学系を光ファイバとファイバカップラを用いて構築し、動作を確認する。次に、この JK フリップ・フロップを縦列に接続したカウンタ回路を構築し、低入力パワーで動作可能な偏光双安定 VCSEL の利点を明らかにする。さらに、光ファイバを用いた光学系ではファイバの長さによる遅延が生じ、動作速度が制限されるため、微小光学素子を組み合わせた自由空間光学系で光路長の短い帰還光学系を構築して高速化を図る。現在、同様の光学系で 9 GHz の光パルス発生に成功しているが、これは光学素子の大きさで制限されているため素子の小型化を図ることで更なる高速動作が期待できる。これらの研究と並行して、レート方程式を用いた解析により、入出力光の波長と入力光パワー、帰還光パワーの関係を求め、高速安定な動作条件や、入力光のトレランスを検討する。これは並列化による高速化を行う際に重要となる。これらをも

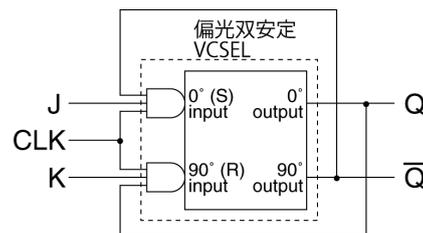


図 2: 偏光双安定 VCSEL を用いた JK フリップ・フロップ構成図

とに、2.5 GHz で動作する全光型 JK フリップ・フロップを実現し、40 Gb/s NRZ の光パケット信号の処理に必要なデバイス特性、システム構造の知見を得る。

3. 研究の方法

(1) VCSEL の偏光自己変調: VCSEL の発振光を、偏光、強度、遅延時間などを調整して元の VCSEL に戻す帰還光学系は図 2 に示す通り本研究の基本となる光学系である。ボールレンズを加工した自己集光機能を持つ半球ハーフミラーで外部共振器を構成し、共振器内に偏光を 90 度回転させるために 1/4 波長板を挿入し、VCSEL の発振光を自己変調させる研究を行った。偏光分離したレート方程式に帰還光学系の項を加えて偏光自己変調動作を数値解析した。

(2) 波長の異なる光パルスによる AND ゲート動作: これまでの光 AND ゲート機能を用いたフリップ・フロップ動作では、セット光とデータ光パルスを同一波長に設定していたため、位相と波長の制御が必要でありシステムが複雑化する。また、一般に VCSEL の 0° と 90° の発振波長は数 GHz 異なり、図 2 のように再帰して入力光と合波する場合、波長を一致させることは困難である。そこで、波長の異なる 2 つの光パルスによる AND ゲート動作を用いた光フリップ・フロップ動作を評価した。

(3) VCSEL アレイを用いた光信号処理: VCSEL は作製時にアレイ形状をとっているため集積システムに適している。しかし、これまでの VCSEL の偏光双安定動作は、駆動電流、デバイス温度などの動作条件が限られているため、デバイスの動作温度を個別に制御する必要があり、集積化された VCSEL アレイでの偏光双安定動作は確認されていなかった。デバイス温度で VCSEL の発振波長を大まかに設定し、駆動電流で個々の発振波長を精密に調整することで、アレイ内の複数の素子で偏光双安定状態を実現した。さらに、アレイ内のある素子の光出力を別の素子へ入力して偏光スイッチングを行い、アレイ内で全光型シフトレジスタ動作を実現した。

(4) 並列化による 2 ビットヘッダ識別: 光論理回路の拡張性を確認するために、偏光双安定 VCSEL を 2 個並列に使い 4 ビット 500 Mb/s RZ のヘッダ信号列中の 2 ビットに対し

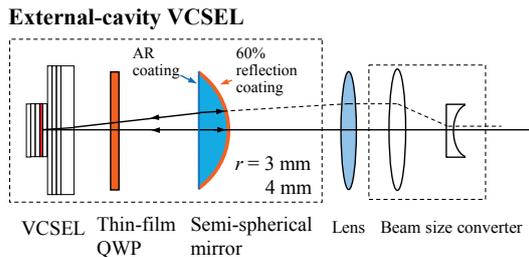


図 3: VCSEL の偏光自己変調のためのボールレンズを用いた外部共振器構成図

て AND ゲート動作を行い、その識別結果信号によって光スイッチを制御して 40 Gb/s 11 段 PRBS NRZ 信号のパケットスイッチングを行った。

(5) 導波路を結合した高屈折率差サブ波長回折格子(HCG): 複数の VCSEL を用いる JK フリップ・フロップでは、同一基板上的 VCSEL 素子を光学的に接続することと、その光を偏光状態を保持したまま効率よく取り出すことは重要である。この光導波路結合型 HCG を VCSEL の反射鏡として使い、導波路でアレイ内の VCSEL 素子を接続する方法を提案している。矩形の偏光無依存 HCG とそれに直交して接続する 2 つの光導波路を Silicon-on-insulator (SOI) 基板上に作製し、HCG へ入射する光の偏光により出力導波路を切り換えることができることを実験的に明らかにした。

4. 研究成果

(1) VCSEL の偏光自己変調: 発振偏光に直交した光パルスを入力すると偏光双安定 VCSEL の発振偏光は入射光と同じ偏光にスイッチする。そこで 1.55 μm 帯 VCSEL にハーフミラーを用いて外部共振器を構成し、共振器内部に $\lambda/4$ 板を配置して、発振偏光を 90 回転して戻し偏光自己スイッチング動作を行う。これを繰り返すことで光パルスが発生し、その周期は外部共振器の共振器長に反比例する。共振器を短くするために、図 3 に示す様にボールレンズを加工し自己集光機能を持つ半球ハーフミラーと、厚さ 8 μm の薄膜ポリマ波長板を用いた。半径 4 mm で、13 GHz(図 4)、3 mm で 15 GHz 程度の繰返し周波数の光パルスを得た。

VCSEL の駆動電流を変え、発振スペクトルと偏光を詳細に測定したところ、この短共振器では外部共振器の波長の異なる 2 つの共振モードで発振する光のビートで VCSEL 出力光が自己変調していることが分かった。また、直交する偏光間の相互利得飽和と戻り光により結合された 2 モードレート方程式を元に出力光の時間変化の数値解析を行った。その結果、VCSEL の駆動電流が少ないと偏光自己変調の周波数は VCSEL の緩和振動周波数で制限されることが分かった(図 5)。つまり、低しきい値 VCSEL を使い大電流で動作することで高速化が期待できる。

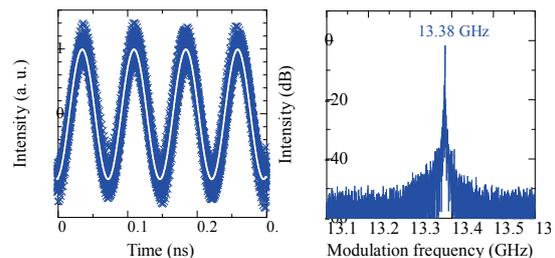


図 4: 自己変調出力波形とその周波数スペクトル

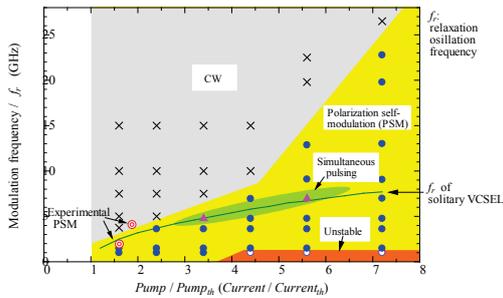


図 5: 駆動電流と共振器長を変えた場合の発振状態

(2) 波長の異なる光パルスによる AND ゲート動作: 実用性の高い光 AND ゲート動作のために、図 6 に示すように波長の異なる光パルスを入力した場合の AND ゲート動作を評価した。1 ns 幅のデータ光パルスの後半に 500 ps 幅のセット光パルスを重畳し、光の周波数差が 2.0 GHz の場合の光フリップ・フロップ動作を図 7 に示す。波長差を変えて測定したところ、波長差を大きくすると大きな入力光パワーが必要となった(図 8)が、タイミングジッタが小さくなった。この方法を用いることにより、システムの構成を簡便に出来る可能性がある。

(3) VCSEL アレイを用いた光信号処理: VCSEL アレイは、室温で連続発振する矩形メサの 1.55 μm 帯 VCSEL が、図 9 に示すよ

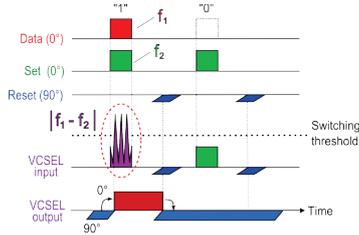


図 6: 波長の異なる光パルスによる AND ゲート動作

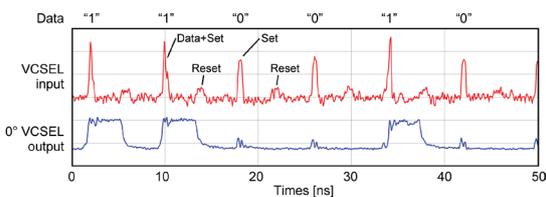


図 7: 波長の異なる光パルスによる AND ゲート動作の測定結果

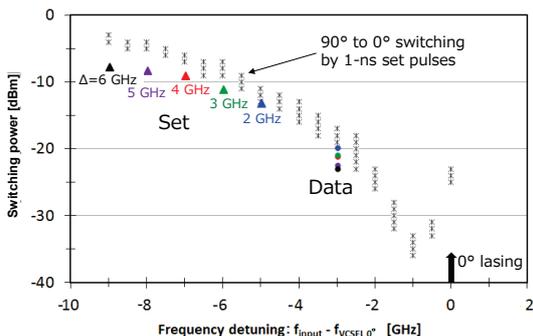


図 8: 波長差とスイッチングパワーの関係

うに 250 μm 間隔で 12 個 1 列に同一チップに配置されている。図 10 に示すシフトレジスタ動作では、これまでは個々の VCSEL の温度と駆動電流を調節し、偏光双安定状態と発振波長を調節していた。しかし、アレイでは温度は一括制御し、2 素子が同じ波長で双安定性を示すように駆動電流を調節した。隣接する 4 素子と 4 本の光ファイバを一括して光結合可能なモジュールを試作し用いた。1 ns 幅のセット光、リセット光パルスを 4 ns 毎に交互に 1 段目の VCSEL へ入力し、フリップ・フロップ動作を行った。そして、1 段目の VCSEL 出力光を LN 変調器で 1 ns 幅の光パルスとして切り出した後、1 段目のリセット光パルスと同じ波長のリセット光と交互に 2 段目の VCSEL へ入力してシフトレジスタ動作を行った。この時の VCSEL1, 2 の出力は、+0.25, -1.94 dBm で、セット光のパワーはそれぞれ -11.7, -14.6 dBm であり、VCSEL は光利得を持った状態でフリップ・フロップ動作した。

(4) 並列化による 2 ビットヘッダ識別: 全光型のフリップ・フロップ特性を利用し、'1' のヘッダビットとセット光を合波し、VCSEL に入射した時に VCSEL の偏光スイッチング閾値を超えるように光強度を設定することで、ヘッダビットの '1' が '0' かに応じて VCSEL の発振偏光が 0° が 90° に定まり、

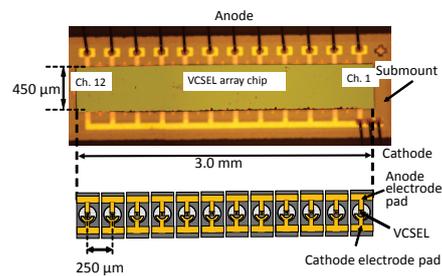


図 9: 1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL アレイ (上:サブマウント上のアレイ写真、下:アレイチップの模式図)

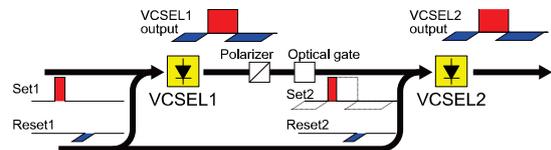


図 10: 偏光双安定 VCSEL によるシフトレジスタ

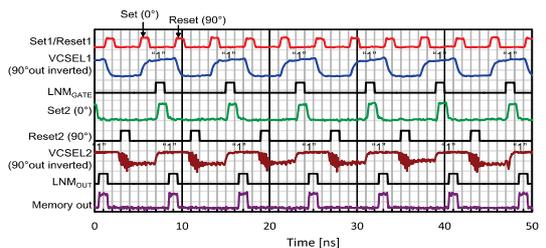


図 11: 偏光双安定 VCSEL アレイのシフトレジスタ動作

VCSEL を利用した全光型ヘッダ識別が実現する。偏光双安定 VCSEL の出力光を偏光子に通し、ヘッダビットが‘1’のときにのみ光出力が得られるようにする。これを光パッケージが通過する LN 光スイッチ(LNSW)の制御信号とすることで、ヘッダ識別の結果にもとづく光パッケージスイッチングが可能となる。下に識別・スイッチ回路を図 12 に示す実験構成の様に 2 段にし、2 ビット目の状態により、VCSEL1 で LNSW1 を制御し、3 ビット目の状態により、VCSEL2 で LNSW2、3 を制御することにより、ペイロードの出力ポートを切り替える。図 13 に示す結果の通り、500 Mb/s RZ 信号 ヘッダ中の 2 ビットを識別し、40 Gb/s NRZ 信号 ペイロードを 4 つの出力ポート間で切り替える、全光型 2 ビットヘッダ識別パッケージスイッチングシステムを実現した。

(5) 導波路を結合した高屈折率差サブ波長回折格子(HCG): 高屈折率差サブ波長回折格子(HCG)に連続して光導波路を形成し、レーザ出力を光導波路へ結合させる図 14 の様な光導波路結合型 HCG VCSEL を提案している。偏光無依存 HCG は、SOI 基板の Si 層を格子状の回折格子とし、ベンゾシクロブテン(BCB)で埋め込まれている。HCG は 20, 30, 40 μm 角で、SOI 基板の Si 層に HCG とともに光導波路を形成した(図 15)。波長 1.55 μm のレーザ光を集光し、 E_x 偏光又は E_y 偏光で HCG に垂直に入射した。反射率はシミュレーションと同じく、入射偏光によらずほ

ぼ同じ値で、HCG が大きいほど高かった。また、図 16 に示す通り、入力偏光により氏出力される光導波路が選択された。

(6) まとめ: これまでの偏光双安定 VCSEL を用いた信号処理、光メモリの研究を元に、より柔軟な全光型信号処理を実現する全光型 JK フリップ・フロップの提案を行った。VCSEL への帰還光学系の適用、波長の異なる光パルスを入力した場合の AND ゲート動作などの要素技術の開拓は良好な結果が得られた。しかし、研究に必要な不可欠なパルス・パターン・ジェネレータが修理不能で故障し、代替手段の確保が困難であったため、統合した JK フリップ・フロップ動作を行うことが十分出来なかった。今回得られた知見では JK フリップ・フロップ動作は可能であると考えられるので、これらを元に今後研究を進展させる。

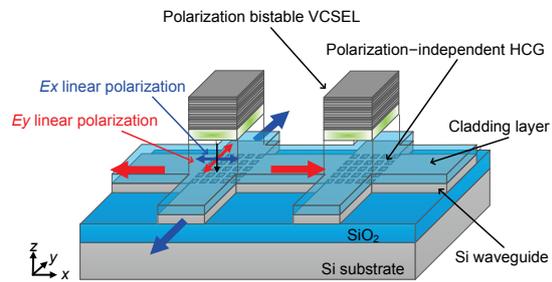


図 14: 光導波路結合型偏光双安定 HCG VCSEL

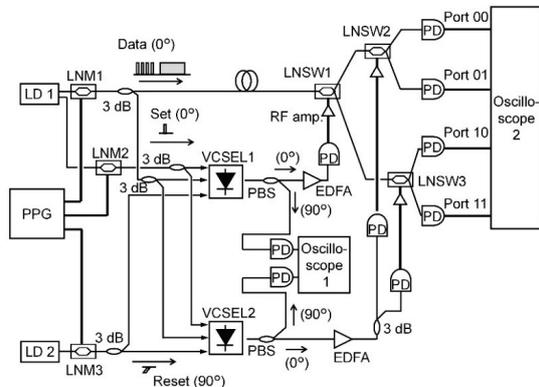


図 12: 2 ビットヘッダ識別パッケージスイッチングの実験系

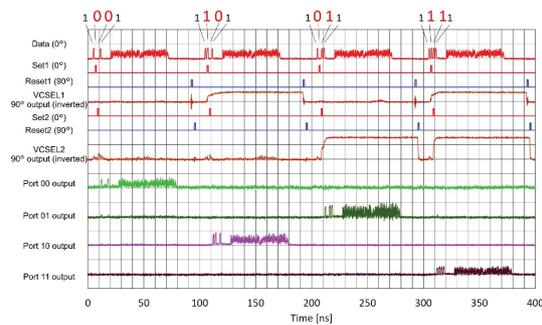


図 13: 2 ビットヘッダ識別パッケージスイッチングの実験結果

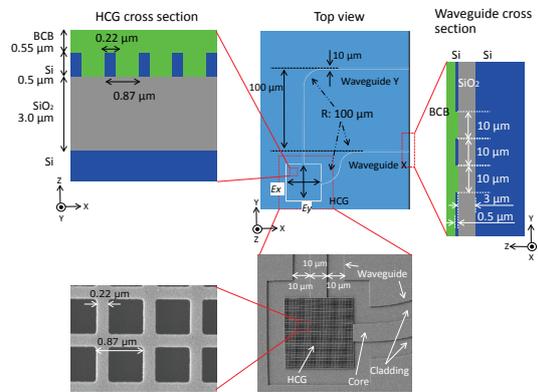


図 15: 光導波路結合型偏光無依存 HCG の構造と SEM 写真

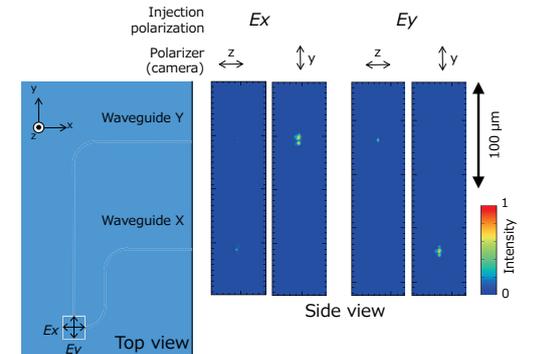


図 16: HCG から入力した光の光導波出力の偏光分解近視野像

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 6 件)

- ① T. Katayama, D. Hayashi, and H. Kawaguchi, "All-optical Shift Register Using Polarization Bistable VCSEL Array," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 28, pp. 2062-2065, 2016, DOI: 10.1109/LPT.2016.2582212, 査読有
- ② T. Katayama, J. Ito, and H. Kawaguchi, "Polarization-dependent coupling between a polarization-independent high-index-contrast subwavelength grating and waveguides," *Applied Physics Express*, Vol. 9, pp. 072703, 2016, DOI: 10.7567/APEX.9.072703, 査読有
- ③ T. Katayama, K. Nakao, D. Hayashi, and H. Kawaguchi, "Flip-flops using polarization bistable VCSEL with AND-gate functionality by two wavelengths inputs," *IEICE Electronics Express*, Vol. 13, pp. 20160064, 2016, DOI: 10.1587/elex.13.20160064, 査読有
- ④ D. Hayashi, K. Nakao, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "Bit error rates of flip-flop operations with AND gate functionality using a 1.55- μm polarization bistable VCSEL," *IEICE Electronics Express*, Vol. 12, pp. 20150479, 2015, DOI: 10.1587/elex.12.20150479, 査読有
- ⑤ D. Hayashi, K. Nakao, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "All-optical 2-bit header recognition and packet switching using polarization bistable VCSELs," *Optics Express*, Vol. 23, 2015, DOI: 10.1364/OE.23.008357, 査読有
- ⑥ T. Liu, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "High-Frequency Self-Modulation in Short-External-Cavity VCSEL with Concave Mirror," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 27, 2015, DOI: 10.1109/LPT.2014.2368582, 査読有

[学会発表] (計 10 件)

- ① 片山健夫, 林大介, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL アレイを用いた全光型シフトレジスタ」, 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2015 年 9 月 9 日, 東北大学(宮城県・仙台市)
- ② T. Liu, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "High-Frequency Self-Modulation in Short-External-Cavity VCSEL with Semi-Spherical Mirror," *The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2015)*, Aug. 26, 2015, Busan (S. Korea)
- ③ T. Katayama, D. Hayashi, K. Nakao, and

H. Kawaguchi, "BER Performance Evaluation and Header Recognition Using All-Optical Flip-Flop Operation with AND-Gate Functionality," *The Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conference 2015 (CLEO/Europe-EQEC 2015)*, Jun. 23, 2015, Munich (Germany)

- ④ 仲尾一也, 林大介, 片山健夫, 河口仁司, 「波長の異なるデータ光とセット光を用いた AND ゲート光フリップ・フロップ動作」, 2015 年電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月 11 日, 立命館大学(滋賀県・草津市)
- ⑤ 林大介, 仲尾一也, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた全光型 2 ビットヘッダ識別による光パケットスイッチング」, 2014 年 10 月 30 日, 長崎歴史文化博物館(長崎県・長崎市)
- ⑥ 林大介, 仲尾一也, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた光メモリ動作のビット誤り率測定」, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 24 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)
- ⑦ 劉涛, 片山健夫, 河口仁司, 「凹面鏡外部共振器 VCSEL による高速光パルス発生」, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 24 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)
- ⑧ 仲尾一也, 林大介, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光双安定 VCSEL を用いた全光型 2 ビットヘッダ識別パケットスイッチング」, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 24 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)
- ⑨ 伊藤隼, 片山健夫, 河口仁司, 「偏光無依存 HCG に結合した光導波路の入射偏光による出力切り換え」, 2014 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2014 年 9 月 24 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)
- ⑩ 片山健夫, 「偏光制御による高機能フォトニックデバイス」, 第 4 回先端フォトニクスシンポジウム, 2014 年 8 月 8 日, 日本学術会議(東京都・港区)

[その他]

ホームページ等

<http://mswebs.naist.jp/LABs/kawaguchi/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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