

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2014

課題番号：24226011

研究課題名(和文) 高次機能半導体ナノフォトニックデバイスとその光RAMへの応用

研究課題名(英文) Highly functional semiconductor nanophotonic devices and their applications for photonic RAM

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 99,100,000円

研究成果の概要(和文)：SOI基板上に集積され、レーザ発振偏光により光出力導波路の切り換え可能なVCSELを提案し、基本動作を確認した。又、Fe/x-AlO_xを電極に持つLEDを作製し、室温でスピン偏極した電子の注入を実現した。偏光双安定VCSELを用いた光信号処理の基本動作である、ANDゲート機能をもつ全光型フリップ・フロップでほぼビット誤りのない動作を実現した。又、全光型のヘッダ識別とパケット切り替えを実現した。偏光双安定VCSELを2個用い、2ビットを識別し4出力ポート間のスイッチングに成功した。偏光双安定VCSELアレイを試作し、アレイ内の2つのVCSELを用いシフトレジスタ機能をもつメモリ動作を実現した。

研究成果の概要(英文)：We proposed and fabricated a high-index-contrast subwavelength grating vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) coupled with two orthogonal in-plane output waveguides. The output waveguide can be switched by changing the lasing polarization of the VCSEL. We also obtained the electrical spin injection into (110) GaAs quantum wells at room temperature using Fe/x-AlO_x tunnel barrier contacts. We measured bit error rates of all-optical flip-flop operations with AND gate functionality using a 1.55- μ m polarization bistable VCSEL and obtained almost error-free operations. We also demonstrated an all-optical 2-bit header recognition and packet switching method using two 1.55- μ m polarization bistable VCSELs. Optical packets were successfully sent to one of four ports according to the state of two bits in the 4-bit headers. We fabricated arrays of 1.55- μ m polarization bistable VCSELs, and demonstrated the memory operation with a shift register function using two VCSELs in one array.

研究分野：工学

キーワード：先端機能デバイス VCSEL 偏光双安定 光フリップ・フロップ ヘッダ識別 スピントロニクス 光RAM 偏光無依存高屈折率差サブ波長回折格子

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。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、電気的に行われており、中継のたびに電気光信号変換が必要になるため消費電力が大きい。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、パケット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。従来、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った。

研究代表者らは偏光双安定面発光半導体レーザ(VCSEL)の偏光状態を1ビットのメモリとして用いる光バッファメモリを考案した。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(図1)。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。光パルスを外部から入射すると、入射パルス光と同一偏光にスイッチし、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。偏光のスイッチング速度は約7ps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。

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。 0° 偏光の入力データ信号と 0° 偏光のセットパルスを 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のみ VCSEL の発振偏光が 0° 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 出力光にゲートをかけると記録された情報が再生される。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 90° 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。素子の性能としては、初段 (M_{1x}) の VCSEL は高速動作すること、中段 ($M_{2x} \dots M_{(m-1)x}$) は低消費電力であること、最終段 (M_{mx}) は高光出力であることが重要である。

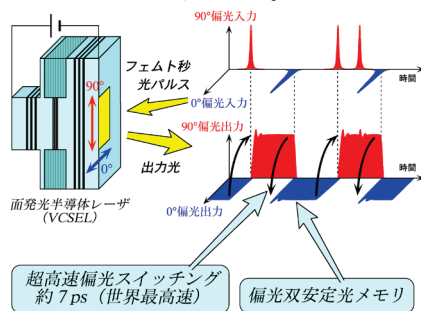


図1. 偏光双安定 VCSEL

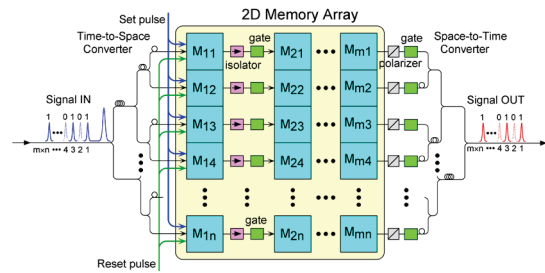


図2. 光バッファメモリの概念図

2. 研究の目的

グリーンテクノロジーの中で重要な技術の一つは、省エネルギー化のための通信の全光化である。研究代表者らは、偏光双安定 VCSEL を実現し、これを1ビットの光メモリ素子として用い、これまで実現困難とされていた光バッファメモリを実現した。40 Gb/s NRZ 信号のメモリ動作や、VCSEL を4個用いた4ビット動作を確認した。本研究では、プラズモンやスピン注入を半導体レーザへ導入し、高次機能化・省電力化をはかる。又、偏光双安定 VCSEL の省電力化・高速化の極限を追求する。さらにこれまでの長年にわたる研究実績を集大成し、これまで複数の個別の VCSEL で実現してきた多ビットメモリ動作を、偏光双安定 VCSEL 二次元アレイにより実現し、光 RAM の有力な候補となり得るデバイスとして完成する。

3. 研究の方法

これまでの研究成果を生かし、省電力光 RAM の実現をめざし、高次機能半導体ナノフォトニックデバイス、および偏光双安定 VCSEL 二次元アレイの実現技術を研究し、光 RAM の有力な候補となり得るデバイスを完成する。具体的には、

- (1) 極微小領域に光とキャリアの閉じ込めが可能で、 μA 級のしきい値電流が期待できる半導体マイクロレーザを作製し、双安定性を実現する。又、(110)GaAs 量子井戸(QW)構造を持つ VCSEL に強磁性電極からスピン偏極電子を注入することにより円偏光レーザ発振を実現する。磁化方向が反平行な複数の電極を VCSEL 上に形成し、レーザ発振偏光の高速スイッチを可能にする。
- (2) 偏光双安定 VCSEL の低消費電力化と高速化の極限を追求する。低消費電力化では、0.2 mW の消費電力で1ビットのメモリ動作を可能とする。又、高速化では、低 Q 共振器 VCSEL や動的な Q 値制御により 100 Gbps でのメモリ動作をめざす。
- (3) 全光型バッファメモリの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新しい手法の創出および、2次元アレイ化に重点を置いて研究する。

4. 研究成果

(1) 高屈折率差サブ波長回折格子 (HCG) 反射鏡 VCSEL

偏光双安定 VCSEL と、我々が考案した偏光無依存高屈折率差サブ波長回折格子(HCG: High - Index - Contrast Subwavelength Grating)を組み合わせたことにより、発振偏光によって出力する光導波路を切り換えることが可能なデバイス(図 3)を考案した。SOI 基板の Si 層に HCG および出力光導波路を形成し、その上に活性層と DBR を配置している。数値解析の結果、VCSEL のレーザ発振偏光によって出力する光導波路を切り換えることができる新しい機能素子を実現できることがわかった。Ex 偏光発振の場合は y 方向光導波路へ、Ey 偏光発振の場合は x 方向光導波路へ光出力する。光出力が大きい導波路では TE モードで、光出力が弱い導波路では TM モードで伝搬することもわかった。

SOI 基板上に偏光無依存 HCG と導波路を作製し、外部から直線偏光をもつ光を入射し、偏光により出力導波路の切り換えができることを実証した。又、図 4 に示すような偏光無依存 HCG-VCSEL を作製し、室温で光励起レーザ発振に成功した。この VCSEL の共振器は偏光無依存であるため、発振偏光は不安定であるが、HCG の領域を長方形にすることにより偏光が制御できることがわかった。偏光双安定特性も実現できるものと考えられ、将来、SOI 上に多数の VCSEL が集積化され、Si - LSI と融合した新しい機能素子となることが期待される。これまでは自由空間を介して VCSEL 間の光結合を行っていたが、光導波路を介して結合できることにより、格段に小型化が可能になる。

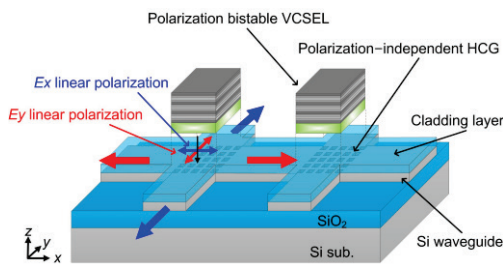


図 3. 光導波路結合型 HCG-VCSEL の構造

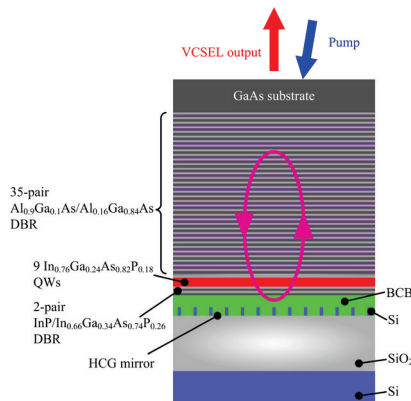


図 4. 偏光無依存 HCG-VCSEL の構造

(2) スピン注入 LED と円偏光間高速スイッチ

スピン VCSEL では半導体への電氣的スピン注入が必要であり、さらにレーザ発振を得るために大きな電流密度が求められる。電子スピン緩和時間が長い、(110)GaAs/AlGaAs QW への電氣的スピン注入は、Fe ショットキー電極を用いた報告があるが、高い注入スピン偏極率が期待できる MOS 構造を用いたものは報告されていない。Fe/x-AlOx トンネル電極をもつ LED (図 5) を作製し、1.5 kA/cm² の高電流密度においてスピン注入を実現し、室温で 9.3% の注入スピン偏極率を実現した。

スピンオプトエレクトロニクスデバイスでは、スピン緩和時間を長くするだけでは不十分であり、キャリア寿命との相対関係が重要になる。(110)MQW にマイクロポスト構造 (図 6(a)) を導入するとキャリア寿命時間は短くなるが、スピン緩和時間はほとんど変化しないことがわかった (図 6(b))。ポンププローブ法による精密な測定から、キャリア寿命が 30 ps に短縮されてもスピン緩和時間は ns オーダーに保たれることが新たに分かった。この手法は高速のスピンデバイスに広く用いることができる。

さらに、スピン VCSEL 実現のために必要となる、スピン偏極電子の半導体中の輸送に

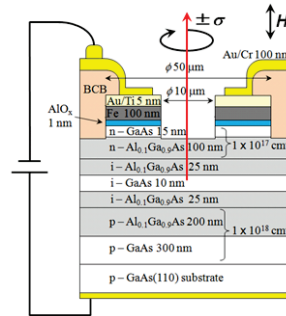
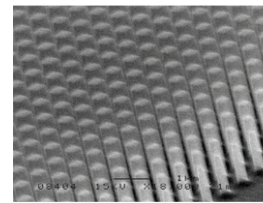
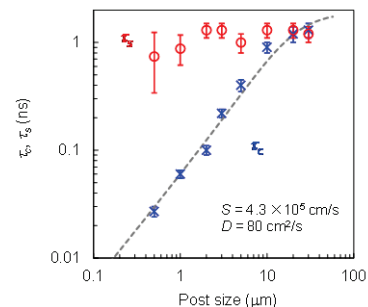


図 5. スピン注入 LED の構造



(a)



(b)

図 6. (a)マイクロポストの SEM 写真 (ポストサイズ 0.5 μm)、(b)キャリア寿命 τ_c とスピン緩和時間 τ_s のポストサイズ依存性

について検討した。(110)GaAs/AlGaAs QW を用い、電界を引加し、室温で $37\ \mu\text{m}$ とデバイスで用いるのに十分な距離の輸送に初めて成功した。

又、光通信波長帯におけるスピン光デバイスを目指し、InP(110)基板上 InGaAs/InAlAs QW を MBE 法により成長し、室温において $1\ \text{ns}$ 程度の電子スピン緩和時間を得た。

(3) 半導体マイクロレーザ

室温電流駆動プラズモニクナノレーザの実現に向けて、伝搬損失の小さい長距離伝搬表面プラズモン(SP)に着目し、種々のナノ共振器構造を提案し数値解析した。金属ナノワイヤ上の長距離伝搬 SP モードによるナノレーザ構造を検討し、利得係数 $1590\ \text{cm}^{-1}$ において発振が得られることが分かった。金属ナノワイヤ上の長距離伝搬 SP モードに対する光共振器を構成するため、モードのカットオフにより長手方向を閉じ込めた。自由空間への結合を遮断し高い反射率を得るため、構造の周囲に金属シールドをおいた。半導体では $1000\ \text{cm}^{-1}$ オーダーの光利得が得られることから、この共振モードによる室温レーザ発振が期待できることが分かった。

(4) 光フリップ・フロップ動作のビット誤り率評価

偏光双安定特性を用い、全光型フリップ・フロップ動作や AND ゲート動作が可能であるが、システムへの応用にはこれらの動作のビット誤り率の評価が必要であり、初めて測定した。光セット・光リセット信号による全光型フリップ・フロップ動作では $1\ \text{Gb/s}$ までほぼデジタル信号エラーのない 10^{-10} オーダーの誤り率を測定した。又、光メモリや(6)で述べる光パケットスイッチには AND ゲート動作を含む全光型フリップ・フロップ動作が用いられることから、そのビット誤り率を評価した。図 7(a)にアイダイアグラムの測定結果

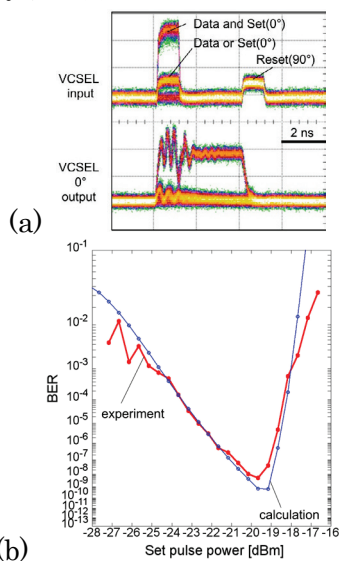


図 7. (a)アイダイアグラムの測定結果、(b)セット光パルスパワーに対するビット誤り率

結果を示す。誤り率は 5×10^{-9} であり、アイが十分開いている。データ光のパワーを一定とし、セット光のパワーを変化させたときのビット誤り率の変化を図 7(b)に示す。数値計算との比較により、スイッチングしきい値の揺らぎと、データ光とセット光の間の位相揺らぎが、BER 変化の要因であることが分かった。以上の結果は、光フリップ・フロップ動作や光 AND ゲート動作が実用に耐えうるものであることを初めて示したものである。

(5) データ光と波長の異なるセット光を用いたフリップ・フロップ

VCSEL に入射するデータ光とセット光を一般的には同一波長に設定して AND ゲート動作を行っているため、波長や位相を制御する必要がある。本研究において、波長の異なるデータ光とセット光を用いて光フリップ・フロップ動作を実証した(図 8(a))。データ光とリセット光のパルス幅は $1\ \text{ns}$ とし、データ信号は $2^{11}-1$ PRBS とした。セット光のパルス幅は $500\ \text{ps}$ とした。これらの信号を $8\ \text{ns}$ 周期で偏光双安定 VCSEL へ入力した。ビート周波数を $2.0\ \text{GHz}$ とするため、データ光(周波数 f_1)を VCSEL の発振波長よりも長波長側に設定し、セット光(周波数 f_2)の離調をデータ光の離調よりもさらに長波長側に $2.0\ \text{GHz}$ 大きくした。データ光とセット光に対し、VCSEL の偏光スイッチング閾値入力パワーは $10\ \text{dB}$ 以上異なるため、各々の入力光パワーがスイッチング閾値よりも $1\ \text{dB}$ 程度低くなるように、セット光をデータ光よりも強くした。実験結果を図 8(b)に示す。データ光とセット光が同時に入力されている時間領域では、位相差の変化により光パルスの形状が毎回異なっているが、このような光入力に対しても、フリップ・フロップ動作が可能であることがわかった。

(6) 光パケットスイッチへの応用

偏光双安定 VCSEL による、全光型フリップ・フロップ動作を利用して、全光型ヘッダ

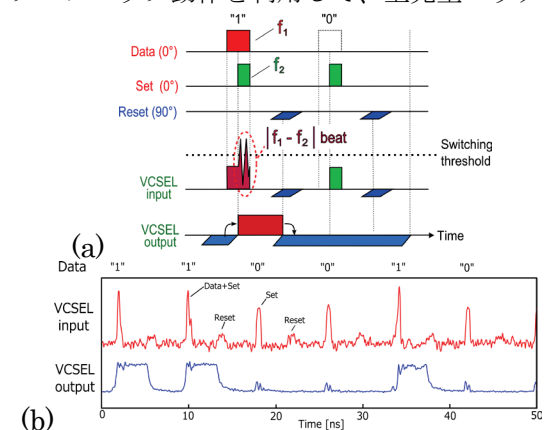


図 8. 波長の異なるデータ光とセット光を用いた AND ゲート光フリップ・フロップ (a) タイミングチャート、(b)光フリップ・フロップの測定結果

識別を実現した。光パケットのヘッダ部を 4 ビット 500 Mb/s RZ 信号、ペイロード部を 40 Gb/s $2^{11}-1$ ビット PRBS NRZ 信号とし、ヘッダの 2 ビット目の信号によりペイロードの出力先を切り換えた(図 9)。光パケット信号の光強度は VCSEL 光出力よりも十分小さく光利得をもつ動作である。最初の光パケットのヘッダの 2 ビット目は“0”であり、セット光を合波しても光強度は VCSEL の偏光スイッチング閾値を超えず、ペイロードは LN スイッチのポート 0 に出力されている。次の光パケットのヘッダの 2 ビット目は“1”で、セット光との合波により光強度が偏光スイッチング閾値を超え、ペイロードは LN スイッチのポート 1 に出力されており、全光型ヘッダ識別によるペイロードのスイッチングが実現されている。又、偏光双安定 VCSEL を 2 個並列に使用し、4 ビットのヘッダの中から 2 ビットを識別し、4 つの出力ポート間のスイッチングにも成功した。

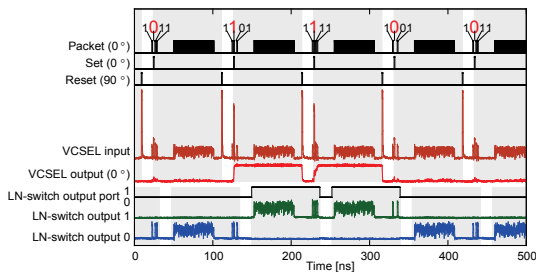


図 9. ヘッダ識別によるパケットスイッチングの実験結果

(7) 偏光双安定 VCSEL アレイ

偏光スイッチングの高速化および多ビット光メモリの実現に向け、偏光双安定 VCSEL のアレイ化を検討した。0.98 μm 帯では、高速化・多ビット化を目指し、光出力側の DBR の層数を 18, 21, 25, 28 ペアと変えることにより、レーザ共振器の Q 値を変えた 4 種の 8×8 アレイを自作した。いずれのアレイにおいてもレーザ発振が得られ、いくつかの素子で偏光双安定特性が得られた。しかし、電流注入時に素子特性が劣化し、詳細な特性評価には至らなかった。レーザ素子の劣化がウエハ自体に起因するものか、素子構造や作製工程に問題があるのか不明であり、さらに検討が必要である。

一方、海外のデバイス試作メーカーと共同で 1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL の 1×12 アレイを試作した(図 10)。アレイ内の 2 つの

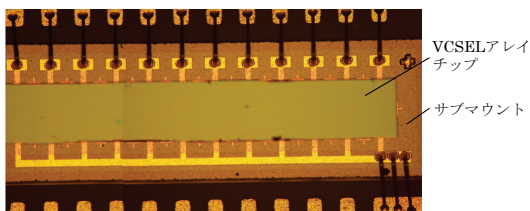


図 10. 実装した 1.55 μm 帯偏光双安定 VCSEL アレイチップ

VCSEL を使い、1 つの VCSEL に情報を記録し、読み出し、別の VCSEL に転送し記録する、シフトレジスタ機能をもつ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 18 件)

- ① D. Hayashi, K. Nakao, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “All-optical 2-bit header recognition and packet switching using polarization bistable VCSELs,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 23, No. 7, 2015, pp. 8357-8364, DOI: 10.1364/OE.23.008357.
- ② K. Ikeda and H. Kawaguchi, “Effects of Spin Diffusion on Electron Spin Relaxation Time Measured with a Time-Resolved Microscopic Photoluminescence Technique,” *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.117, No, 5, 2015, pp. 053903-1~6, DOI: 10.1063/1.4906847.
- ③ D. Hayashi, H. Takahashi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “Bit-Error-Rate Measurements of All-Optical Flip-Flop Operations of a 1.55- μm Polarization Bistable VCSEL,” *Journal of Lightwave Technology*, 査読有, Vol. 32, No. 15, 2015, pp. 2671-2677, DOI: 10.1109/JLT.2014.2332535.
- ④ N. Yokota, Y. Yasuda, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Electron Spin Relaxation Time in (110) InGaAs/InAlAs Quantum Wells,” *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.116, No, 2, 2014, pp. 023507-1~6, DOI: 10.1063/1.4887803.
- ⑤ Y. Tsunemi, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Analysis of Optical Output Characteristics in Waveguide Coupled HCG-VCSELs,” *IEICE Transactions on Electronics*, 査読有, Vol. E97-C, No. 4, 2014, pp. 369-376, DOI: 10.1587/transle.E97.C.369.
- ⑥ N. Yokota, Y. Aoshima, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Room temperature spin transport in undoped (110) GaAs/AlGaAs quantum wells,” *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol. 104, No. 7, 2014, pp. 072406-1~4, DOI: 10.1063/1.4866168.
- ⑦ Y. Tsunemi, N. Yokota, S. Majima, K. Ikeda, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “1.55- μm VCSEL with a polarization-independent HCG mirror on SOI,” *Optics Express*, 査読有, Vol. 21, No. 23, 2013, pp. 28685-28692, DOI: 10.1364/OE.21.028685.

- ⑧ Y. Tsunemi, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Lasing-Polarization-Dependent Output from Orthogonal Waveguides in High-Index-Contrast Subwavelength Grating Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser,” *Applied Physics Express*, 査読有, Vol. 6, No. 9, 2013, pp. 092106-1~4, DOI: 10.7567/APEX.6.092106.
- ⑨ K. Ikeda and H. Kawaguchi, “Metallic nanowire lasers,” *Journal of the Optical Society of America B*, 査読有, Vol. 30, No.7, 2013, pp. 1981-1986, DOI: 10.1364/JOSAB.30.001981.
- ⑩ T. Katayama, T. Okamoto, and H. Kawaguchi, “All-optical header recognition and packet switching using polarization bistable VCSEL,” *IEEE Photonics Technology Letters*, 査読有, Vol. 25, No. 9, 2013, pp. 802-805, DOI: 10.1109/LPT.2013.2252161.
- ⑪ K. Ikeda, K. Takeuchi, K. Takayose, I-S. Chung, J. Mørk and H. Kawaguchi, “Polarization-independent high-index contrast grating and its fabrication tolerances,” *Applied Optics*, 査読有, Vol. 52, No. 5, 2013, pp. 1049-1053, DOI: 10.1364/AO.52.001049.
- ⑫ N. Yokota, Y. Tsunemi, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Pump probe measurement of electron spin relaxation time in (110)-oriented GaAs/AlGaAs multiple quantum well microposts,” *Applied Physics Express*, 査読有, Vol. 5, No. 12, 2012, pp. 122401-1~3, DOI: 10.1143/APEX.5.122401.
- ⑬ Y. Yasuda, S. Koh, K. Ikeda, and H. Kawaguchi, “Crystal growth of InGaAs/InAlAs quantum wells on InP(110) by MBE,” *Journal of Crystal Growth*, 査読有, Vol. 364, 2012, pp. 95-100, DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.11.039.

[学会発表] (計 52 件)

- ① 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)*, June 21-25, 2015, Munich (Germany)
- ② D. Hayashi, H. Takahashi, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “Bit Error Rate Measurements of All-Optical Flip-Flop

Operations using a 1.55- μm Polarization Bistable VCSEL,” *The 19th Optoelectronics and Communication Conference 2014 (OECC 2014)*, July 6-10, 2014, Melbourne (Australia)

- ③ Y. Tsunemi, N. Yokota, S. Majima, K. Ikeda, T. Katayama, and H. Kawaguchi, “Room Temperature Operation of Optically Pumped 1.55- μm VCSEL with Polarization-Independent HCG Mirror on SOI,” *The Conference on Lasers and Electro-Optics 2014 (CLEO 2014)*, Jun 8-13, 2014, San Jose (USA)

[図書] (計 1 件)

H. Kawaguchi, O. Shulika, I. Sukhoivanov, et al., Springer, *Advanced Lasers: Laser physics and technology for applied and fundamental science*, 2015, 234(1-18)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：面発光レーザ装置

発明者：河口仁司、片山健夫、池田和浩

権利者：奈良先端科学技術大学院大学

種類：特許

番号：特願 2014-531512

出願年月日：平成 24 年 1 月 24 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学

科学研究科 超高速フォトニクス研究室

<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：40211180

(2) 連携研究者

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

池田 和浩 (IKEDA, Kazuhiro)

産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究グループ長

研究者番号：70541738