

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560396

研究課題名(和文) 1.55 μm帯偏光双安定デバイスの超高速スイッチング特性の測定・評価

研究課題名(英文) Ultrafast switching characteristics of 1.55-um polarization bistable devices

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) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：情報通信において、通信量と消費電力の増大が大きな問題となっており、全光型通信の実現が求められている。面発光半導体レーザー(VCSEL)の偏光スイッチのスイッチングの過渡応答を測定し、偏光双安定スイッチの機構を解明し、さらなる高速化を目指したVCSELの構造を設計することを目的とした。そこで、VCSELの高速化、低消費電力化、高機能化のための構造の研究を行い、測定システムの検討、さらにVCSELを用いた応用システムの研究も行った。

研究成果の概要(英文)：The increasing speed and power consumption in optical telecommunications has focused attention on all-optical signal processing. The aims of this study are the measurement of the ultrafast transient response of the polarization switching in the polarization bistable VCSEL, the clarification of the mechanism of the polarization bistability, and the designing the structure of the VCSEL which aimed in the high speed operation. So, I improved the VCSEL structure for the high speed and the low-power consumption operation. I also investigated the measurement system of the ultrafast switching and the applied system for the optical communication using the VCSEL.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：光スイッチ 高性能レーザー 応用光学・量子光工学 計測工学 先端機能デバイス

1. 研究開始当初の背景

情報通信において、通信量と消費電力の増大が大きな問題となっており、全光型通信の実現が求められている。その実現には、光通信波長帯の 1.55 μm 帯で動作し、高速な光信号が電気変換なく記録できる光バッファメモリの実現が大きな課題となっていた。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。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、ストリークカメラを用いて申請者ら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。さらに最近、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り、申請者が世界で初めて 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。

1.55 μm 帯においても 0.98 μm 帯と同様に超高速・低エネルギー動作が期待できる。しかし、現時点では偏光フリップ・フロップの繰り返し周期と最小入力光パルスエネルギーの関係や、スイッチに必要な注入光の最小パワーの離調特性（注入光波長と発振波長の差）など初期的な特性しか評価できていない。0.98 μm 帯のメモリ実験に際しても、高速な動作になるにつれて、測定装置の応答速度の制限から、通常市販の測定装置を用いては評価が困難になりつつある。特に 1.55 μm 帯においては数十 ps 程度の分解能のストリークカメラしか存在しないため、偏光が切り替わろうとしている過渡状態を測定できていない。そこで本研究で新たな測定・評価手法を開拓する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、全光型通信の実現のための課題となっている全光型メモリに適用可能で、世界最高速のスイッチング速度で動作可能な面発光半導体レーザ (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: VCSEL) の 1) 偏光スイッチのスイッチングの過渡応答を測定し、2) 偏光双安定スイッチの機構を解明し、3) さらに高速化を目指した VCSEL の構造を設計することである。そのために、まず 1.55 μm 帯において光サンプリング測定により数百フェムト秒オーダーの高時間分解能で、偏光スイッチング動作を測定する。そこ

から得られたパラメータをもとに、直交偏光間の相互利得飽和に基づく偏光スイッチングをレート方程式を用いて解析する。そして、共振器構造を変えたレーザのシミュレーションを行い、高速、低エネルギー動作する偏光双安定 (Polarization Bistability: PB) VCSEL の設計指針を得て、光双安定を用いたものとしては最高速の 160 Gb/s を超える光信号を記録・再生する全光型バッファメモリ構築のための知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 偏光自己スイッチングによる高速光パルス発生: 偏光スイッチングの一形態として、偏光双安定 VCSEL の発振光の偏光を 90 度回転して戻す簡便な光学系で、自己偏光スイッチング動作を実現して評価した。1.55 μm 帯偏光双安定 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 $\lambda/4$ 波長板を配置する。するとハーフミラーで反射された光は波長板で偏光が 90° 回転して VCSEL に戻り、発振偏光がスイッチする。これを繰り返すことで自己偏光変調により光パルスが発生する。この光学系では、外部ミラーと VCSEL 間隔に反比例して偏光スイッチングの繰り返し周期が高速になる。

(2) 光非線形相互相関計の構築: これまでストリークカメラを用いて偏光スイッチング速度の測定を行っていた。より高速な偏光スイッチングを測定するために、光非線形相互相関計を構築した。

(3) 全光型パケットのヘッダ識別による光パケットスイッチングと AND ゲート動作の誤り率: 偏光双安定スイッチングの応用として、AND ゲート動作による光パケットヘッダの全光型識別を行い光パケットのスイッチングに適用した。さらに、全光型フリップ・フロップ動作、AND ゲート動作の安定性についてビット誤り率を測定して定量化を行った。

(4) 偏光双安定 VCSEL の低消費電力化: 偏光双安定 VCSEL の低消費電力動作に関する検討も行った。作製が比較的容易な 0.98 μm 帯 VCSEL に酸化狭帯構造を導入し、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・フロップ動作を実証した。

(5) 高速動作を目指し低 Q 値 VCSEL の実現: 偏光双安定 VCSEL のさらなる高速化を目指した構造として、DBR のペア数を減らして共振器の Q 値を下げるのが有効であるため、低 Q 値 VCSEL を作製した。

(6) 偏光双安定 HCG-VCSEL の検討: 高屈折率差サブ波長回折格子 (HCG) をレーザ反射鏡として採用した VCSEL は、作製工程が簡便になることが期待でき、光導波路との結合も可能である。そこで、通常は反射率の偏光依存性が高い HCG を偏光無依存化し、偏光双安定性の実現を目指した。

4. 研究成果

(1) 偏光自己スイッチングによる高速光パルス発生: 厚さ 8 μm のポリイミド薄膜 1/4 波長板とハーフミラーを VCSEL のマウントと一体化して安定にし、外部共振器長 13.1 mm の光学系で繰り返し周波数 5.1 GHz の光パルスを実現した。しかし、これ以上の短共振器化は共振器内にコリメートレンズが存在するため困難であった。そこで、図 1 の様にハーフミラーを凹面鏡にすることでコリメートレンズを不要とし、5 mm 程度まで短共振器化して図 2 に示す 12.7 GHz の光パルスを実現した。

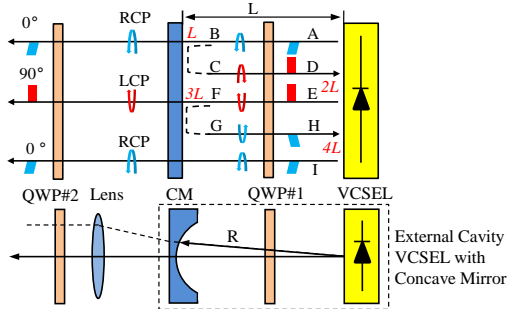


図 1: 凹面鏡を用いた偏光自己変調の動作原理と実験配置

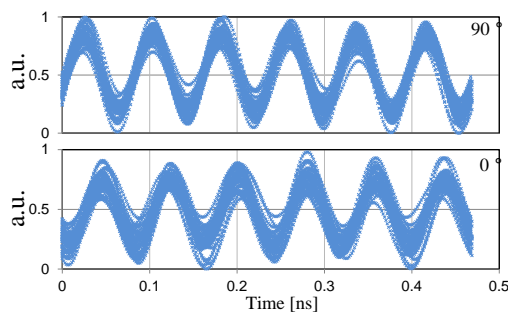


図 2: 発生した光パルス波形

(2) 光非線形相互相関計の構築: 図 3 に示す光非線形相互相関計を構築した。相互相関計は、マイケルソン干渉計、SHG 結晶(LiIO₃)、光電子増倍管(PMT)から構成されている。相互相関計に VCSEL 出力と超短パルス(参照パルス)を入射して相互相関測定を行い、VCSEL の偏光スイッチングの切り替わり速度を測定する。時間分解能 230 fs であり、参照パルスと相互相関が測定可能な VCSEL 出力は 30 mW 以上必要と見積もられた。VCSEL 出力は 1 mW 程度であるため、光ファイバーアンプ(EDFA)で VCSEL 出力を増

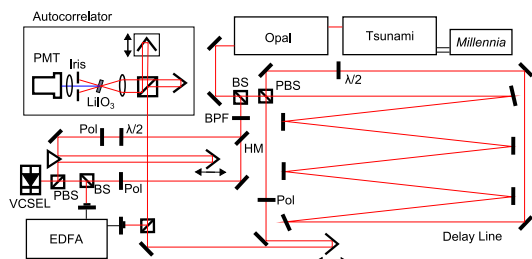


図 3: 偏光スイッチング速度測定系

幅させる必要がある。VCSEL の偏光スイッチングに用いる入力光パルスはバンドパスフィルタ(3 nm)を用いて、fs パルスをパルス幅 1.3 ps 程度に広げて VCSEL に入射する。

(3) 全光型パケットのヘッダ識別による光パケットスイッチングと AND ゲート動作の誤り率: 本研究で実現した図 4 に示す光パケットスイッチングシステムは、光パケットヘッダ中の任意の 1 ビットを識別するため、このビットにタイミングを合わせて光パルスを入力する。偏光双安定 VCSEL のもつ光 AND ゲート動作と双安定特性によりヘッダ信号が 1 の場合、偏光がスイッチし、リセット光パルスが入力されるまで保持される。VCSEL の出力光を光スイッチの制御信号として入力することにより、光パケット信号のペイロードが設定したポートに出力される。図 5 の通り、4 ビットの 500 Mb/s RZ ヘッダ中の 1 ビットを識別し、40 Gb/s NRZ 信号のペイロードのスイッチングを実現した。

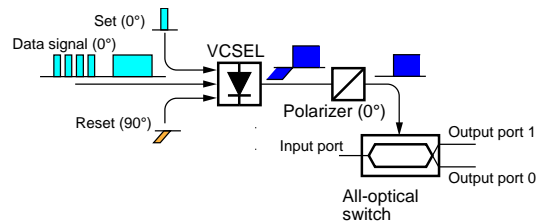


図 4: 偏光双安定 VCSEL を用いたヘッダ識別およびパケットスイッチング

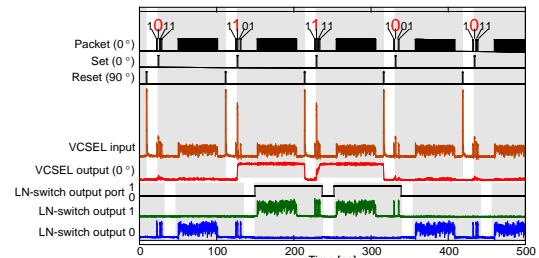


図 5: 500 Mb/s RZ ヘッダ信号、PRBS 40 Gb/s NRZ ペイロード信号のヘッダ識別とパケットスイッチング結果

また、こうしたシステム応用には偏光双安定フリップ・フロップ動作の安定性が重要となる。そこで、PRBS 符号化された Data 信号と周期的な Set 信号の光位相を合わせて同じタイミングで入力して全光型 AND ゲート動

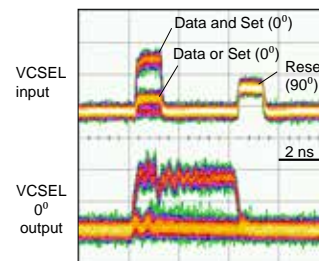


図 6: AND ゲート動作のアイダイアグラム (RZ, 500 Mb/s, BER 6.13×10^{-7})

作の誤り率を測定した。図 6 に示すアイダイヤグラムが得られ、誤り率は 6.13×10^{-7} であった。

(4) 偏光双安定 VCSEL の低消費電力化: 酸化狭帯構造は VCSEL の低しきい値化に有効な手法である。しきい値電流を低下することで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。そこで、偏光双安定 VCSEL の $50 \mu\text{m}$ 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ところ、発振しきい値は 0.22 mA で、 $0.71 \sim 1.64 \text{ mA}$ において単一モードの直線偏光間で双安定性が得られた。図 7 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 90° 偏光パルスを入力したところ発振偏光が 90° にスイッチした。この時 VCSEL の光出力は $258 \mu\text{W}$ で、入力光パルスのパワーは $3.6 \mu\text{W}$ (パルスエネルギー: 0.72 fJ) であり、このような低バイアス動作でも光利得を持ったフリップ・フロップ動作を得た。

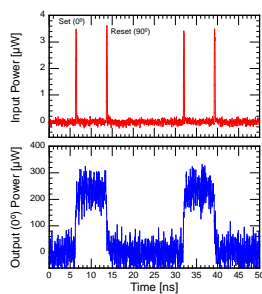


図 7: 低しきい値偏光双安定 VCSEL のフリップ・フロップ動作

(5) 高速動作を目指し低 Q 値 VCSEL の実現: 従来の VCSEL (TypeO) の構造は、p 側 DBR が 38 ペアの正方形のメサ型であり、 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$ の 3 つの量子井戸からなる活性層、n 側は 27 ペアの DBR で構成されている。今回、活性層を $\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ の歪補償層で挟んだ 3 つの $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子井戸を 3 箇所に配置した高い光利得をもつ活性層に変更し、酸化狭帯構造を導入した。また、n 側 DBR として 27 ペア (TypeA) と、低 Q 値化のために DBR ペア数を 22 ペア (TypeB) に減らした 2 種類の VCSEL を作製し、比較した。TypeA は 0.8 mA 、TypeB は 1.2 mA でレーザ発振し、偏光双安定特性、偏光スイッチング動作が得られた。パルス幅 100 ps の入力光パルスの波長を変化し、安定な偏光スイッチングが生じる最小スイッチングパワーの周波数離調特性を求めた (図 8)。この測定結果に対して 2 モードレート方程式を用いて TypeA と TypeB の Q 値を見積もると、TypeA の Q 値は 5299、TypeB の Q 値は 2164 であった。低 Q 値化により、離調が大きくなって小さな光パワーでスイッチングできたことから、これまで以上の高速光メモリ動

作の実現が期待できる。また、TypeB のしきい値は 1.2 mA と低いため、更に DBR ペア数を減らした VCSEL による光メモリ動作の高速化も可能であると考えられる。

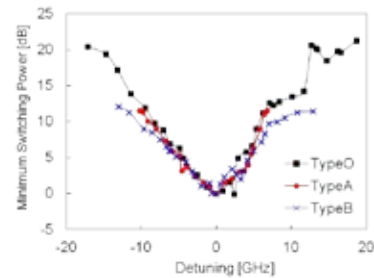


図 8: Q 値の異なった VCSEL の偏光スイッチングパワーの離調特性

(6) 偏光双安定 HCG-VCSEL の検討: 通常の HCG はストライプ形状をしているため反射率に大きな偏光依存性がある。そこで、SOI (Silicon-On-Insulator) 基板の Si 層に格子状の HCG を形成して偏光無依存化を実現した。この HCG を片側の反射鏡とした $1.55 \mu\text{m}$ 帯 HCG-VCSEL を作製し、光励起によるレーザ発振を実現した。

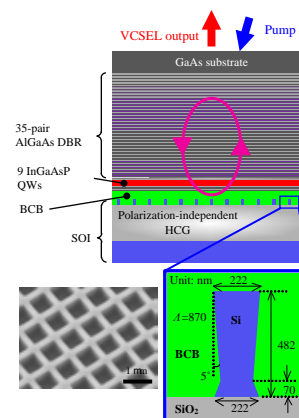


図 9: 偏光無依存 HCG-VCSEL の構造および格子状 HCG の SEM 画像

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 3 件)

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*, Vol. 21, pp. 28685-28692, 2013, DOI: 10.1364/OE.21.028685, 査読有。

T. Katayama, T. Okamoto, and H. Kawaguchi, "All-optical header recognition and packet switching using

polarization bistable VCSEL," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 25, pp. 802-805, 2013, DOI: 10.1109/LPT.2013.2252161, 査読有.

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, pp. 1811-1813, 2011, DOI: 10.1109/LPT.2011.2169778, 査読有.

[学会発表](計15件)

常深義博、横田信英、間嶋翔太、池田和浩、片山健夫、河川仁司、「HCG領域の形状による偏光無依存 HCG-VCSEL の発振偏光制御」, 2014 年電子情報通信学会総合大会、2014 年 3 月 20 日、新潟大学(新潟県新潟市)

高橋はるな、林大介、片山健夫、河川仁司、「偏光双安定 VCSEL の全光型 AND ゲート動作のビット誤り率測定」, 2014 年電子情報通信学会総合大会、2014 年 3 月 20 日、新潟大学(新潟県新潟市)

劉涛、片山健夫、河川仁司、「凹面鏡外部共振器 VCSEL の高速偏光自己変調」, 2014 年電子情報通信学会総合大会、2014 年 3 月 20 日、新潟大学(新潟県新潟市)

片山健夫、林大介、河川仁司、「偏光双安定 VCSEL による全光型フリップ・フロップ動作のビット誤り率測定」, 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2013 年 9 月 19 日、福岡工業大学(福岡県福岡市)

林大介、片山健夫、河川仁司、「同一波長セット光・リセット光による偏光双安定 VCSEL のフリップフロップ動作」, 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2013 年 9 月 19 日、福岡工業大学(福岡県福岡市)

常深義博、横田信英、間嶋翔太、池田和浩、片山健夫、河川仁司、「SOI 基板上 1.55 μm 帯 HCG-VCSEL の光励起レーザ発振」, 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会、2013 年 9 月 19 日、福岡工業大学(福岡県福岡市)

H. Kawaguchi and T. Katayama, "Recent Progress in Polarization Bistable VCSELs and Their Applications for All-Optical Signal Processing," (invited) 6th International Conference on

Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013) September 11, 2013, Tourist Health-Improving Complex "Sudak" (Crimea, Ukraine)

片山健夫、河川仁司、「偏光双安定 VCSEL を用いた全光型ヘッダ識別による光パケットスイッチング」, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会、2013 年 8 月 30 日、サンリフレ函館(北海道函館市)

K. Ikeda, K. Takayose, T. Katayama, and H. Kawaguchi, "Design and fabrication of a polarization-independent HCG," The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim and the 18th OptoElectronics and Communications Conference/ Photonics in Switching 2013 (CLEO-PR & OECC/PS 2013), July 2, 2013, 京都国際会議場(京都府京都市)

T. Katayama, T. Okamoto, and H. Kawaguchi, "Optical Packet Switching by All-Optical Header Recognition Using 1.55- μm Polarization Bistable VCSEL," The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-IQEC 2013), May 15, 2013, Messe München International, (Munich, Germany)

岡本拓也、片山健夫、河川仁司、「1.55- μm 帯偏光双安定 VCSEL を用いた全光型ヘッダ識別による光パケットスイッチング」, 2013 年電子情報通信学会総合大会、2013 年 3 月 20 日、岐阜大学(岐阜県岐阜市)

川畑将志、片山健夫、池田和浩、河川仁司、「低 Q 値共振器をもつ偏光双安定 VCSEL のスイッチングパワー離調特性」, 2012 年(平成 24 年)秋季、第 73 回応用物理学会学術講演会、2012 年 9 月 12 日、愛媛大学(愛媛県松山市)

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), October 12, 2011, Arlington, VA, USA

片山健夫、河川仁司、「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 年 9 月 13 日、北海道大学(北海道札幌市)

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、「酸化狭窄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年5月20日、金沢大学(石川県金沢市)

〔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