

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360150

研究課題名(和文)高速フォトニックルータのための低消費電力全光ルーティング回路の研究

研究課題名(英文) Study of low-power-consuming all-optical routing circuits for high-speed photonic router

研究代表者

後藤 信夫 (Goto, Nobuo)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：60170461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：将来のフォトニックネットワークとして重要となる高速かつ低消費電力な光ラベルルーティングシステム用光信号処理回路について検討した。

光ラベル識別に関して、2相位相シフトキーイング(BPSK)および4相PSK、直交振幅変調(QAM)により符号化された光ラベルの光導波路型識別回路を提案し、理論的に検討した。ルーティング処理に不可欠な光スイッチ、光フリップフロップおよび光バッファを提案し基礎特性を理論的および実験的に明らかにした。スペクトルの効率的可能な柔軟なネットワーキングに不可欠となるBPSKとQPSK間の光パケット変調方式変換について検討し、新しい回路構成を提案し理論解析および実験的検証を行った。

研究成果の概要(英文)：Optical signal processing circuits for high-speed low-power-consuming label routing systems required in future photonic networks were studied.

Optical label recognition circuits for coded labels in binary phase-shift-keying (BPSK), quadrature PSK (QPSK), and quadrature amplitude modulation (QAM) formats were proposed and the recognition functions were theoretically clarified. Optical switches, optical flip-flop circuits, and optical buffer systems required for routing processing were proposed and the fundamental characteristics were theoretically and experimentally investigated.

Optical modulation-format conversion systems between BPSK and QPSK packets required for spectrally-efficient and flexible networking were proposed and theoretically and experimentally investigated.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光ルータ フォトニックネットワーク 光ラベル識別 光スイッチ 光フリップフロップ 光バッファ  
光変調方式変換

1. 研究開始当初の背景

将来のフォトニックネットワークとして高速かつ低消費電力な光ラベルルーティングシステムが期待されている。

光ラベル構成およびその識別に関しては、多くが、一部のラベルに対する識別であり、いかに複数ラベルを処理できるかなどの課題を有している。また、波長情報を活かしたラベルも簡易識別のため検討されている。

光スイッチの研究に関しては、波長選択型のスイッチが必要となる。これまでは波長毎に別々のデバイスでスイッチングがなされており、小型高効率化が期待されている。

光パケットルーティングにおいて不可欠な要素である光バッファに関しては、その制御は外部からの電氣的処理に拠っているものが多い。システム制御の簡易化の観点から外部からの制御を必要としない自律制御型のバッファ制御方式が期待される。

光フォーマット変換は異なる変調方式を用いているネットワーク間を接続するゲートウェイノードなどで必要となり、主としてOOKからPSKへの変換の研究が多く報告されている。また、伝送路の帯域と距離に応じて柔軟にフォーマット変換をおこなうことにより光スペクトル資源の効率的な運用が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、光波の波動としての伝搬特性を最大限に活かした低消費電力なフォトニックラベルルーティングの実現を目的の主眼とする。ルーティングにおける光ラベル処理の主要要素として、ラベル分離、ラベル識別、ラベル書換えなどが挙げられる。本研究では、すべてのラベルに対して識別処理あるいは分類処理を光学的に行うシステムの構築を目的としている。特に、光波の位相に依存したユニークな伝搬特性を利用したパッシブな光集積回路による実現をめざす。また、ゲートウェイノードに要求される光信号フォーマットの全光回路による変換等の信号処理回路、および、自律制御型光バッファの実現も目的とする。これらの基本構成要素を組み合わせることによりグリーン光ネットワークの実現に向け、大きく飛躍できるものと考えられる。

3. 研究の方法

(1) 受動光ラベル識別システムの拡張性検討

- ① 自己ルーティング型の BPSK、QPSK および QAM 光ラベル識別回路の高コントラスト化とラベル拡張への検討を行う。
- ② 既に提案している理論的に無限大の高コントラスト比が得られる識別回路において識別符号数の拡大の検討。

(2) ルーティングのための光信号処理システムの検討

- ① 全光信号処理を可能とするための構成要素としての光フリップフロップの検討

- ② 学習機能を含むラベル処理システムの検討
- ③ ラベル情報とルーティング表に基づいて出力ポートを認識する光回路の検討

(3) WDM 光バッファの検討

- ① 光ルーティングに不可欠である自律的バッファの構成の検討を行う。
- ② 優先度等の QoS 制御を可能とする。

(4) 光スイッチの検討

- ① グラフェンの可飽和吸収特性を利用した全光型波長選択スイッチ素子の検討。
- ② 有機結晶導波路による誘導ラマン増幅実験を行い、高効率な全光スイッチをめざす。

(5) 変調フォーマット変換システムの検討

- ① 光パケットをBPSKからQPSKへの変換に関しては既に新しい方式を提案し実証実験を行っているが、逆方向に全光的に変換するシステムの検討を行う。

4. 研究成果

(1) 光符号化ラベル識別回路

① BPSK 光ラベル識別のコントラスト向上

BPSK 符号に対する光ラベル識別回路について検討を行った。全ての符号を識別する受動型光回路では出力コントラストの向上が課題であった。図1に示す光導波路回路は4ビットの4ラベルに対してのみ無限大のコントラストで識別を可能とするものである。識別ラベルの拡張に対するコントラストの低減について検討した。図2は4ビット16ラベルの識別を可能とする回路例である。ラベル数の拡大とともに出力コントラストは図3に示すように低減するが、必要なコントラストに合わせてラベル数を選択可能であること

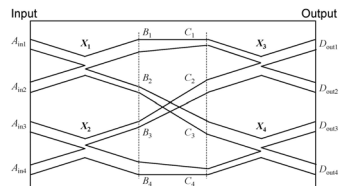


図1 4ビット BPSK 識別基本回路

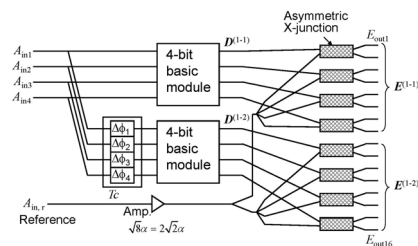


図2 4ビット 16ラベル識別回路

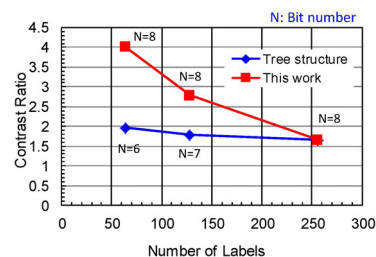


図3 ラベル数とコントラストの関係

とを示した。

### ② 複素ニューラルネットワークを用いた BPSK および QPSK 光ラベル処理

識別出力のコントラスト向上を目的として図4に示すBPSKおよびQPSK符号に対する複素ニューラルネットワークによるラベル識別およびクラス分けの検討を行ってきた。回路のパラメータを学習により決定するが、学習の深度と入力ラベル変動の関係性を明らかにした。図5に示すように学習深度が浅い場合、変動に対する耐性が強くできることを示した。

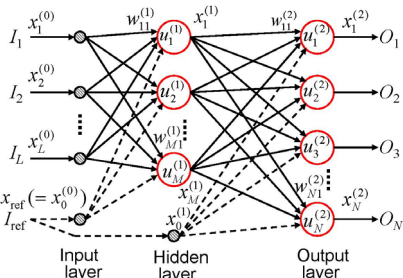


図4 ラベル処理ニューラルネットワーク光回路

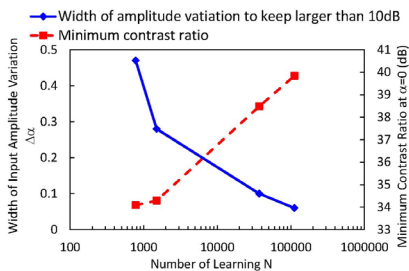


図5 学習回数に対する入力変動への耐性

### ③ QAM 光ラベル識別回路の検討

QPSKラベルに対する識別基本回路を図6に示す。この回路を応用して図7に示すように16QAMラベルに対する識別回路を構成できる。図8は識別における誤り率特性を数値シミュレーションにより評価した結果である。また、複数ラベルへの拡張についても検討した。

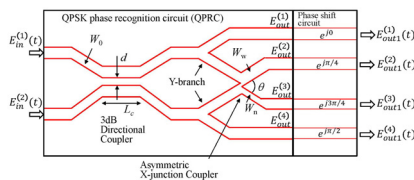


図6 QPSK 光位相回路 (QPRC)

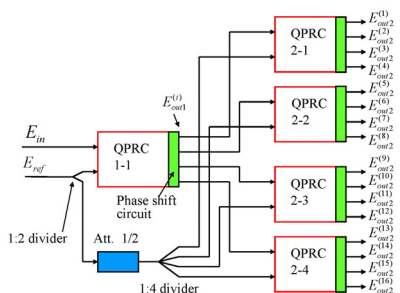


図7 16QAM 符号識別回路

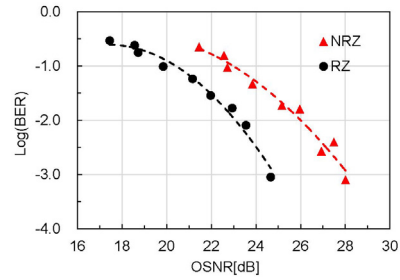


図8 16QAM 符号識別の誤り率特性

### (2) 光フリップフロップ回路

#### ① 2つの偏光状態を用いたフリップフロップ回路

図9に示す2つの直交偏光状態間のフリップフロップ動作を単一半導体増幅器 (SOA) と2つのフィードバックループで実現できることを示した。図10にセット/リセットパルスと出力のシミュレーション結果を示す。また、実験的にも検証を行った。

#### ② 位相状態を用いたフリップフロップ回路

フリップフロップ動作を光の2つの位相状態間で行う回路を提案し、シミュレーションにより検証を行った。位相状態を用いることにより多値の位相間でのフリップフロップ動作も可能となる。

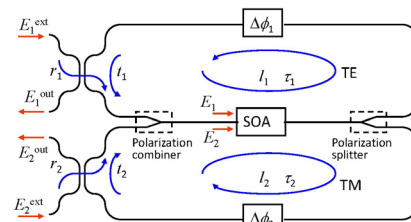


図9 直交偏光間のフリップフロップ回路

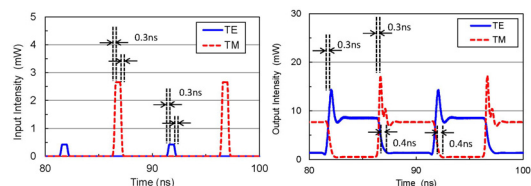


図10 フリップフロップ解析結果

### (3) 自律制御型光バッファシステム

#### ① 同期型パケットに対する光バッファシステム

自律制御型光バッファシステムとして、拡張性に優れたモジュール構成のシステムを提案し、パケット棄却率、平均遅延量および拡張性について検討を行った。

#### ② 優先度制御を考慮した光バッファシステム

図11には優先度制御を加えた自律制御型バッファシステムを示す。優先パケットとその他のパケットに対する4:1バッファシステムにおける棄却率のシミュレーション結果を図12に示す。

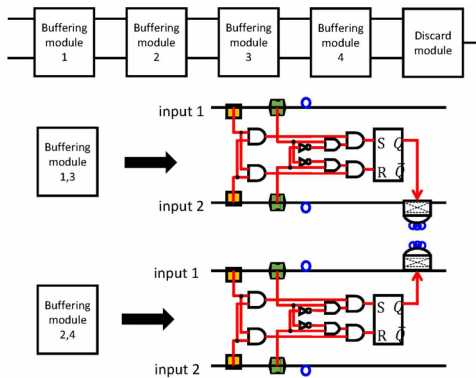


図 11 優先度制御自律制御型バッファ

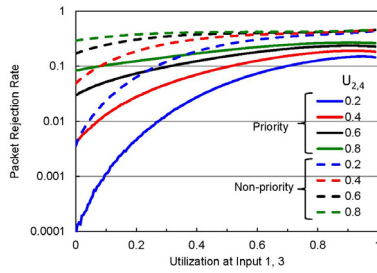


図 12 4:1 バッファにおけるパケット棄却

(4) グラフェンを用いた全光スイッチ

① 単層グラフェン装荷光導波路における可飽和吸収特性の実験的評価

単層グラフェン装荷導波路内の光可飽和吸収を測定した。光導波路は、図13に示すようにソーダライムガラス基板上にK<sup>+</sup>イオン交換法により作製した。グラフェンシートの高さは約7mmである。フェムト秒レーザーを用いた可飽和吸収による挿入損失を図14に示す。

② 位相変化を伴う可飽和吸収特性を用いた光スイッチの検討

グラフェンの可飽和吸収を用いて、図 15 に示す構成の光スイッチを構成できる。可飽和吸収に伴う屈折率変化が存在する場合のスイッチング条件を理論解析により明らかにすると共にビーム伝搬法によるシミュレーションにより動作検証を行った。

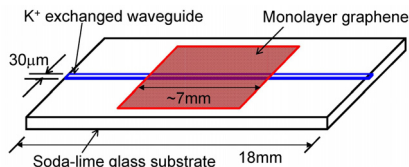


図 13 グラフェン装荷光導波路

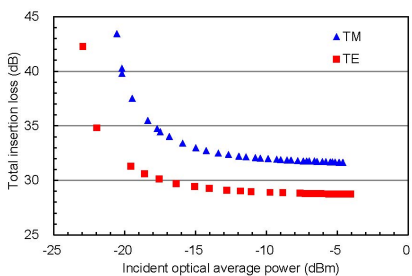


図 14 非線形挿入損失実測値

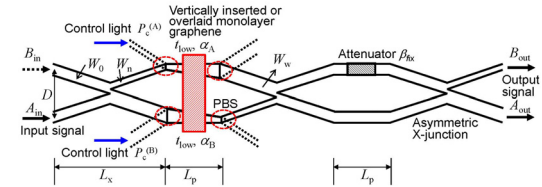


図 15 グラフェンによる可飽和吸収をもちいた光スイッチ構成

(5) 光変調フォーマット変換システム

① BPSK から QPSK へのフォーマット変換システム

BPSK から QPSK へ変換する受動的システムを提案し、シミュレーション解析と共に実験的検証を行った。変換によりシンボルレートは半分になる。

② QPSK から BPSK へのフォーマット変換システム

QPSK から 2 つの BPSK 系列への変換に関して図 16 に示す四光波混合による非線形性を用いたシステムを提案し、シミュレーションにより検証を行った。図 17 にポンピング光パワーをパラメータとする誤り率特性を示す。

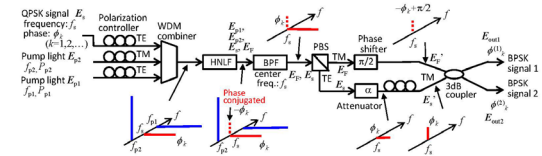


図 16 QPSK から BPSK への変調フォーマット変換システム

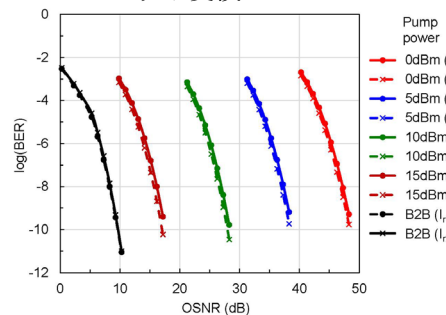


図 17 入力 OSNR に対する誤り率特性

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) M. Takahashi, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "All-Optical Switch with Cascaded Two-Stage Mach-Zehnder Interferometers Using Saturable Absorption Accompanied by Refractive-Index Change in Graphene," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 査読有, vol.32, no.21, pp.3624-3630 (2014). DOI:10.1109/JLT.2014.2352624

(2) N. Goto and Y. Miyazaki, "Noise Tolerance in Wavelength-Selective Switching of Optical Differential Quadrature-Phase-Shift-Keying Pulse Train by Collinear Acousto-optic Devices," Applied Optics, 査読有, vol.53, no.16, pp.3379-3387 (2014). DOI: 10.1364/AO.53.003379

- (3) K. Takase, R. Uehara, N. Goto, and S. Yanagiya, "Optical Flip-Flop Operation in Orthogonal Polarization States with a Single Semiconductor Optical Amplifier and Two Feedback Loops," *IEICE Trans. Electron.*, vol.E97-C, 査読有, no.7, pp.767-772 (2014).  
DOI: 10.1587/transele.E97.C.767
- (4) K. Inoshita, N. Goto, and S. Yanagiya, "Recognition of 16QAM Codes by Maximum Output with Optical Waveguide Circuits, Thresholders, and Post-Processing Logic Circuit," *IEICE Trans. Electron.*, 査読有, vol.E97-C, no.5, pp.448-454 (2014).  
DOI: 10.1587/transele.E97.C.448
- (5) M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, "Saturable Absorption by Vertically Inserted or Overlaid Monolayer Graphene in Optical Waveguide for All-Optical Switching Circuit," *IEEE Photonics Journal*, 査読有, vol.5, no.5, pp.6602109-1 --9 (2013).  
DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2284256
- (6) K. Inoshita, H. Kishikawa, Y. Makimoto, N. Goto, and S. Yanagiya, "Proposal of Optical Waveguide Circuits for Recognition of Optical QAM Codes", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 査読有, vol.31, no.13, pp.2271-2278 (2013).  
DOI: 10.1109/JLT.2013.2265096
- (7) K. Mizote, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Optical Label Routing Processing for BPSK Labels Using Complex-Valued Neural Network", *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 査読有, vol.31, no.12, pp.1867-1876 (2013).  
DOI: 10.1109/JLT.2013.2261051
- (8) K. Okubo, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Optical QPSK Label Recognition by Time-Space Conversion using Two-Dimensional Matched Filtering", *J. of Commun. and Computer* (David Publishing Company), 査読有, vol.10, no.2, pp.214-219 (2013).  
URL:[http://www.davidpublishing.com/journals\\_info.asp?jId=1632](http://www.davidpublishing.com/journals_info.asp?jId=1632)
- (9) M. Oya, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "All-optical switch consisting of two-stage interferometers controlled by using saturable absorption of monolayer graphene", *Opt. Express*, 査読有, vol.20, no.24, pp.27322-27330 (2012).  
DOI: 10.1364/OE.20.027322
- (10) 後藤信夫、宮崎保光：「音響光学素子による光パルス列ルーティング --高速光パケットルータにおける光信号処理への応用--」*超音波テクノ*, 査読無, Vol. 24, No. 5, pp. 87-90 (2012).  
URL:[http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product\\_id=2863](http://www.nikko-pb.co.jp/products/detail.php?product_id=2863)
- (11) N. Goto and Y. Miyazaki: "Theoretical Study of the Switching Characteristics of 40 and 100G bps Pulse Trains by Weighted Collinear Acoustooptic Switches", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, vol.51, 07GA06, pp.07GA06-1--6 (2012).  
DOI: 10.1143/JJAP.51.07GA06
- [学会発表] (計 63 件)
- (1) R. Ando, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Modulation Format Conversion from QPSK to BPSK Using Four-Wave-Mixing for Elastic Optical Networking", *International Forum on Advanced Technologies (IFAT2015)*, Tokushima University (Tokushima-shi, Tokushima) P12 (9 Mar. 2015).
- (2) M. Takahashi, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "All-Optical Switching with Cascaded Two-Stage MZIs Using Saturable Absorption Accompanied by Refractive-Index Change in Graphene", *IEEE Photonics Conference (IPC2014)*, Hyatt Regency La Jolla (San Diego, USA) ThB1.3(16 Oct. 2014).
- (3) M. Mihara, Y. Shinohara, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Modulation Format Conversion from BPSK to QPSK Using Delayed Interferometer and Pulse Shaping Filter", *IEEE Photonics Conference (IPC2014)*, Hyatt Regency La Jolla (San Diego, USA) MD2.5 (13 Oct. 2014).
- (4) R. Ando, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Format conversion from QPSK to BPSK using wavelength-shift-free FWM and interference", *Optoelectronics and Communication Conference (OECC2014)*, Melbourne Convention and Exhibition Centre (Melbourne, Australia) TUPS1-8(8 July 2014).
- (5) A. Takahashi, K. Inoshita, Y. Hama, N. Goto, and S. Yanagiya, "Bit-Error-Rate Performance in Optical 16QAM Recognition with Integrated-Optic Circuit", *17th European Conf. on Integrated Optics and Technical Exhibition / 19th Microoptics Conf.(ECIO-MOC 2014)*, University of Nice (Nice, France) P028 (26 Jun. 2014).
- (6) Y. Makimoto, N. Goto, and S. Yanagiya, "Noise Tolerance in QPSK Label Recognition with Optical Passive Waveguide Circuits", *18th Microoptics Conference (MOC'13)*, Tokyo Institute of Technology (Meguro-ku, Tokyo) H5 (29 Oct. 2013).
- (7) K. Inoshita, N. Goto, and S. Yanagiya, "Tolerance to Phase and Amplitude Deviations in Optical Waveguide Circuit for Recognition of 16QAM Codes", *18th Microoptics Conference (MOC'13)*, Tokyo Institute of Technology (Meguro-ku, Tokyo) H13 (29 Oct. 2013).
- (8) A. Ihara, N. Goto, and S. Yanagiya, "Scalability of Optical Passive Waveguide Circuits for Recognition of 8-bit BPSK Labels", *IEEE Photonics Conference (IPC2013)*, Hyatt Regency Bellevue (Seattle, USA) WG2.4 (11 Sept. 2013).
- (9) M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, "Saturable Absorption in Vertically Inserted and Overlaid Monolayer-Graphene in

Optical Waveguide for All-Optical Switching", IEEE Photonics Conference (IPC2013), Hyatt Regency Bellevue (Seattle, USA) WB2.4 (11 Sept. 2013).

(10) N. Goto and Y. Miyazaki, "Noise Tolerance in Wavelength-Selective Switching of Optical DQPSK Pulse Train by Collinear Acousto-optic Devices", 2013 IEEE Int. Ultrasonics Symp. (IUS), Prague Convention Center (Prague, Czech Republic) IUS3-C-6 (22 Jul. 2013).

(11) M. Takahashi, W. Ueda, N. Goto, and S. Yanagiya, "Saturable Absorption in Multiple Sheets of Monolayer Graphene for Optical Switching", 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), Kyoto International Conference Center (Kyoto-shi, Kyoto) ThB2-1 (4 July 2013).

(12) K. Takase, R. Uehara, N. Goto, and S. Yanagiya, "Optical Flip-Flop Operation with a Single SOA in Orthogonal Polarization States", 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), Kyoto International Conference Center (Kyoto-shi, Kyoto) TuPO-7 (2 July 2013).

(13) K. Inoshita, N. Goto, and S. Yanagiya, "Recognition of 16QAM Codes by Maximum Output with Optical Waveguide Circuits", 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), Kyoto International Conference Center (Kyoto-shi, Kyoto) TuPO-5 (2 July 2013).

(14) N. Goto and Y. Miyazaki, "Routing Characteristics of 40-100Gbps Pulse Trains by Weighted Collinear Acousto-optic Devices", 2012 IEEE Int. Ultrasonics Symp. (IUS), International Congress Center (Dresden, Germany) P5H-4 (10 Oct. 2012).

(15) Y. Maruo, N. Uegaki, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Scalable Autonomous Optical FDL Buffer System for Synchronous Packets", Photonics in Switching (PS2012), Palais des Congres (Ajaccio, France) Th-S4-P12, (13 Sept. 2012).

(16) K. Inoshita, H. Kishikawa, Y. Makimoto, N. Goto, and S. Yanagiya, "Scalability of Optical Waveguide Circuit for Recognition of Optical 16QAM Codes", Photonics in Switching (PS2012), Palais des Congres (Ajaccio, France) We-S12-O05, (12 Sept. 2012).

(17) N. Goto, H. Hiura, Y. Makimoto, K. Inoshita, and S. Yanagiya, "Optical Waveguide Circuits for Recognition of PSK and QAM

Coded Labels" (invited), Int. Conf. on Optical Engineering 2012, Visvesvaraya Technological University (Belgaum, India) Track5.3, pp.97-102, (27 July 2012).

(18) K. Okubo, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Optical QPSK Label Recognition by Time-Space Conversion using Two-Dimensional Matched Filtering", The 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), BEXCO Convention Center (Busan, Korea) P1-3, (4 July 2012).

(19) T. Mizobuchi, K. Mizote, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "QPSK Label Processing Using Complex-valued Neural Network Learned with Back Propagation of Teacher Signals", The 17th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2012), BEXCO Convention Center (Busan, Korea) P1-1, (4 July 2012).

(20) K. Inoshita, H. Kishikawa, Y. Makimoto, N. Goto, and S. Yanagiya, "Proposal of Optical Waveguide Circuits for Recognition of Optical QAM Codes", 16th European Conference on Integrated Optics (ECIO2012), Melia Sitges Hotel (Barcelona, Spain) ID 10 (19 Apr. 2012).

(21) M. Oya, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "Waveguide-Type All Optical Switch Using Saturable Absorption of Graphene", 16th European Conference on Integrated Optics (ECIO2012), Melia Sitges Hotel (Barcelona, Spain) ID 9 (18 Apr. 2012).

[図書] (計 2 件)

(1) M. Takahashi, H. Kishikawa, N. Goto and S. Yanagiya: "All-Optical Waveguide-Type Switch Using Saturable Absorption in Graphene", a chapter in " Optoelectronics", edited by Sergei L. Pyshkin and John M. Ballato, (Intech), (2015) (印刷中) .

(2) H. Kishikawa, H. Umegae, Y. Shiramizu, J. Oda, N. Goto and S. Yanagiya: "All-Optical Autonomous First-in-First-out Buffer Managed with Carrier Sensing of Output Packets", chapter 15 in " Optoelectronics - Advanced Materials and Devices", ISBN 978-953-51-0922-8, edited by Sergei L. Pyshkin and John M. Ballato, (Intech, Croatia), Total 483pages, pp.365-388 (Jan. 2013).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

後藤 信夫 (GOTO, Nobuo)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・教授

研究者番号 : 60170461

### (2) 研究分担者

柳谷 伸一郎 (YANAGIYA, Shin-ichiro)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・助教

研究者番号 : 40314851