

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360138

研究課題名(和文)大容量フォトニックノード用波長選択光スイッチの研究

研究課題名(英文) Research on optical wavelength selective switches for a large capacity photonic switching node

研究代表者

津田 裕之(TSUDA, HIROYUKI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90327677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：PLZT位相変調器アレイと石英導波路をハイブリッド接続したチャンネル数20、チャンネル間隔200GHzの高速波長選択光スイッチを構成した。応答時間20 ns以下の高速動作を確認した。石英多層導波路とLCOSによる大規模波長選択光スイッチモジュールを構成した。LCOSによるスイッチ内部波面補正機能を有し、良好な波長分波、スイッチング特性を示した。高速性を有する波長選択光スイッチを活用するフォトニックノード構成を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The high-speed optical wavelength selective switch was fabricated with a hybrid integration of silica waveguide chips and a PLZT optical switch. It had 20 wavelength channels with 200-GHz spacing. The switching speed was less than 20 ns. We also fabricated a large-scale optical wavelength selective switch using multi-layered silica waveguides and LCOS spatial light modulators. It had wavefront compensation function and showed good wavelength switching characteristics. The photonic switching node architecture using a high-speed wavelength selective switch was proposed.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：波長選択光スイッチ アレイ導波路回折格子 石英光導波路 誘電体光導波路 フォトニックノード  
光通信 光スイッチ

### 1. 研究開始当初の背景

超大容量伝送技術は順調に発展し、100Tbit/s 以上の超高速光信号を1コアのファイバで伝送する実験が行われている。一方、フォトニックノードにおける光信号のスイッチング、ルーティングに適用できる光スイッチ技術は、伝送技術に見合った進展を遂げていない。これに対して、本研究では、フォトニックノード用に、高速性と規模に優れた波長選択光スイッチを実現する。波長選択光スイッチとは、任意の波長の入力信号を任意の出力ポートにノンブロッキングに出力することが可能なスイッチである。

### 2. 研究の目的

波長分割多重技術を利用する大容量フォトニックノードでは、高速、大規模波長選択光スイッチの実現が必須である。本研究では、光スイッチに関する基礎的検討を行い、次世代フォトニックネットワークに適用するための基盤技術の確立を目指す。

第一に、PLZT (ランタノドープジルコン酸チタン酸鉛) 導波路による高速位相変調器アレイと石英導波路による光合分波回路をハイブリッド集積した、超高速波長選択光スイッチを実現する。

第二に、多層石英導波路による高密度波長合分波器と LCOS (Liquid Crystal on Silicon) 空間光変調器を用いた超大規模波長選択光スイッチを実現する。

第三に、高速及び大規模波長選択スイッチによるフォトニックノード構成法を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) PLZT 位相変調器アレイと石英導波路による高速波長選択光スイッチにおいては、帯域固定及び帯域可変導波路型波長選択光スイッチ設計法、PLZT 導波路の低損失、低電圧化のための埋め込み導波路構造最適化設計、及び、ハイブリッド波長選択光スイッチの設計、試作と評価を行う。

(2) 石英多層導波路と LCOS による大規模波長選択光スイッチにおいては、石英導波路の多層化のための石英薄膜成膜条件、研磨条件、アニール条件の確立、波長選択光スイッチ光学系の設計、LCOS によるスイッチ内部波面補正アルゴリズムの確立を行う。

(3) 高速型及び大規模型波長選択スイッチを組み合わせたフォトニックノード構成を検討する。

### 4. 研究成果

(1) PLZT 位相変調器アレイと石英導波路による高速波長選択光スイッチ

PLZT 導波路と PLC 導波路のコア径整合設計とテストピース導波路の接続プロセスを検討した。まず、PLC とほぼ同等の構造とモードフィールド径を有するファイバアレイを用いた検討により、低損失接続の見通しを得

た。続いて、PLZT 導波路と PLC 導波路の接続チップを試作し、目標の接続損失 < 2 dB に対して 0.3 dB 程度が得られることを確認した。次に、PLZT-PLC ハイブリッド化に関し、PLZT 導波路と PLC 導波路の整合設計とテストピース導波路の接続プロセスの開発を行うため、PLZT 導波路の設計と試作を行った。ハイブリッド集積用の石英 PLC 回路には、数多くの分岐素子が含まれる。分岐素子には、方向性結合器や MMI (Multi Mode Interference) を用いるが、分岐特性の良否は狭隘部の仕上がりに左右される。このため、コア形成のためのドライエッチング工程のみならず、SiO<sub>2</sub> 堆積による埋込狭隘部が設計通り仕上がるように、プロセス条件の最適化を進めた。200GHz x 20ch, 1x2 波長選択光スイッチを構成することにした。図1に波長選択光スイッチの構成を示す。

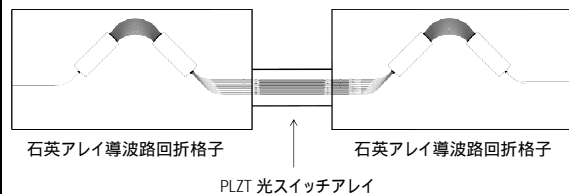


図1：波長選択光スイッチの構成

図2に Port A に全波長チャンネルを切り替えた場合、図3にチャンネルを交互に Port A と Port B に切り替えた場合のスペクトルを示す。

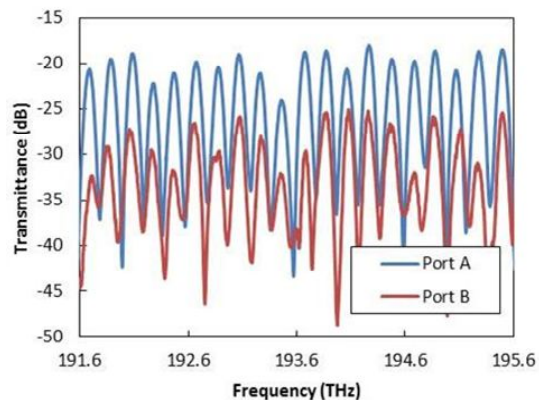


図2：波長選択光スイッチ動作スペクトル

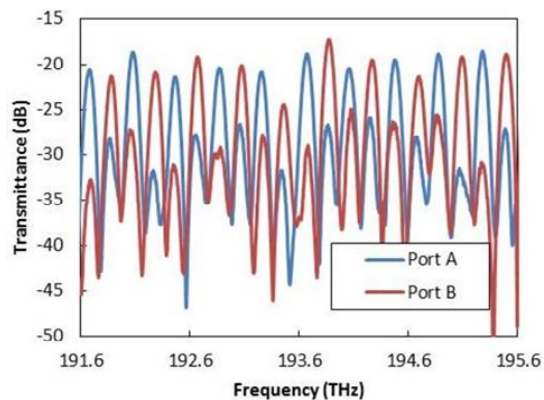


図3：波長選択光スイッチ動作スペクトル (交互に Port A と Port B に切り替え)

図4に切り替え時の動特性を示す。20ns以下の高速チャンネル切り替えに成功した。

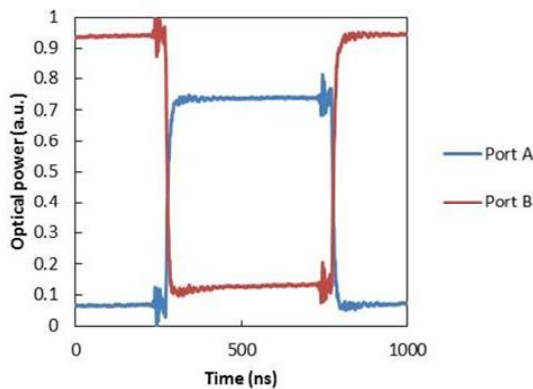


図4：波長選択光スイッチ動特性

(2) 石英多層導波路とLCOSによる大規模波長選択光スイッチ

LCOSによるスイッチ内部波面補正アルゴリズムについて検討し、図5に示した手法で収差補償のための最適な位相パターンを求めることを考案した。予備実験として、ファイバアレイ、レンズ、LCOSを用いて空間スイッチを組立て、入力ポートを光源に接続し無変調連続光を入射した。出力ファイバはパワーメータに接続されており、受光パワーが測定される。最適な補償位相パターンを得るためにZernike多項式で展開し、各モードの係数を最適化アルゴリズムに基づく試行錯誤型の繰り返し計算で得ることを試みた。

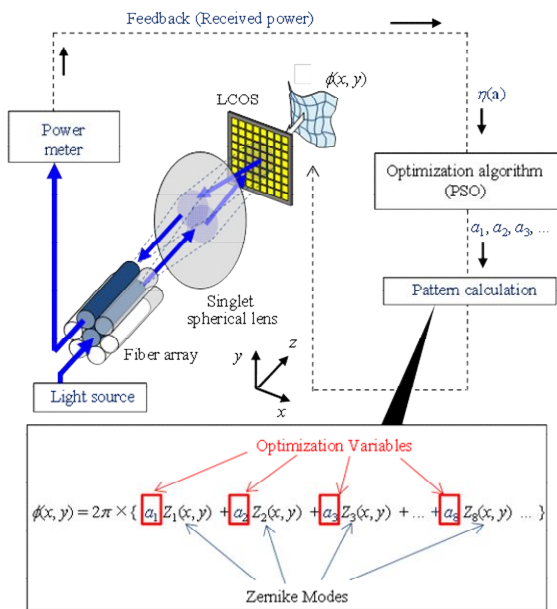


図5：LCOSによる波面補正方法

本研究では最適化アルゴリズムとして、粒子群最適化 (PSO: Particle Swarm Optimization) 法を収差補償のための最適なZernike係数列を得るためのアルゴリズムとして用い、最適化を行った。従来の突然変異オペレータではベクトル空間内においてランダムな方向に解探索を行っていたが、こ

れを改良し解探索の範囲を線形な領域に限定することが探索速度を速めるために有効であると考えた。すなわち、Zernike係数間の関係を利用し、8次までの係数を5個に減らして最適解の探索を行うことを考案した。図6にLCOSを用いた波面補正アルゴリズム検証光学系の写真を示す。

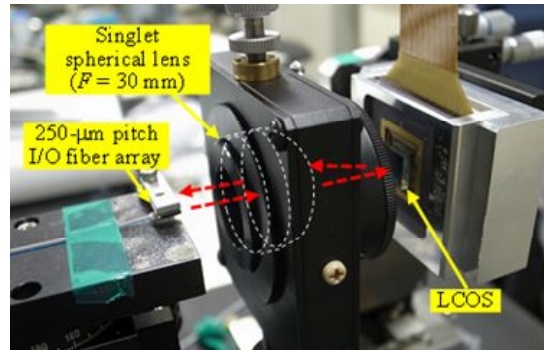


図6：波面補正アルゴリズム検証光学系

今回、焦点距離  $F = 30 \text{ mm}$ 、曲率  $15.5 \text{ mm}$ 、中心厚  $6 \text{ mm}$ 、硝材 N-BK7 (屈折率  $= 1.5003$ ) の平凸球面タイプの単レンズを用いた。LCOSは画素ピッチ  $15 \mu\text{m}$ 、画素数  $512 \times 512$  ピクセルのものを用いた。L 入力ファイバから1ポート隣のファイバを出力ファイバとし、スイッチングを行った。収差補償を行わない場合、ブレイズパターンを用いた場合の過剰損失は  $2.7 \text{ dB}$  であった。図7に改良 PSO アルゴリズム (青線) を用いて実験的に収差補償を行った際の出力光パワーの推移曲線の一例を示す。ここでは、同じ初期条件下で実行した従来型 PSO アルゴリズム (赤線) との結果を比較している。提案する改良型 PSO はわずか100回程程度の繰り返し計算により、大局解に収束している。理論値と比べた場合の収束時の過剰損失はわずか  $0.117 \text{ dB}$  であり、これは球面単レンズの収差がほぼ完璧に補償されたことを意味する。

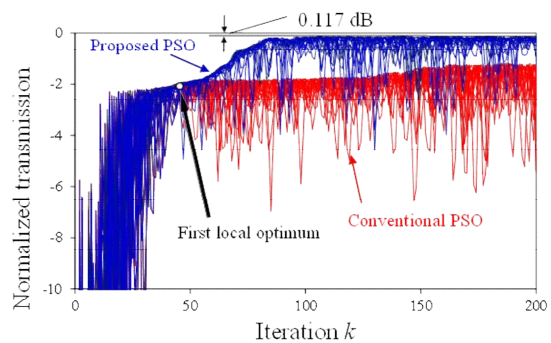


図7：収差補償を行った際の出力光パワーの推移曲線

本補償法を用いて波長選択光スイッチを構成し、アレイ導波路回折格子の位相誤差による波面の乱れを補償し、良好な特性を得た。図8に波長選択光スイッチモジュールの写真、図9と図10に波面補償を行わない場合

の透過チャネルスペクトルと波面補償を行った場合の透過チャネルスペクトルを示す。補償することによって透過スペクトルが改善していることが分かる。

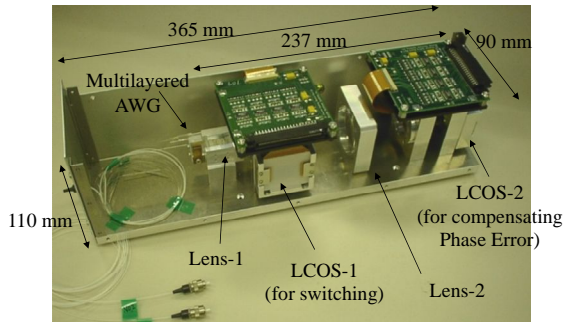


図 8 : 波長選択光スイッチモジュールの写真

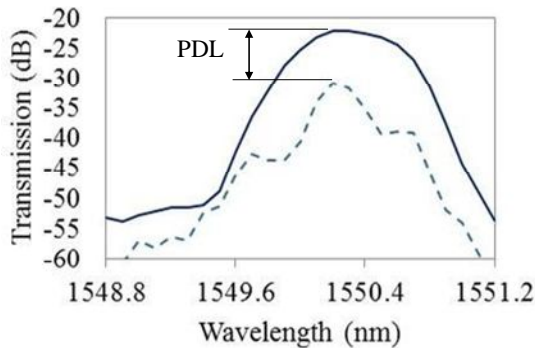


図 9 : 波面補償を行わない場合の透過チャネルスペクトル

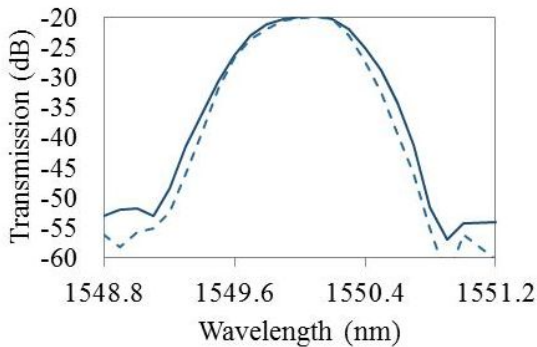


図 10 : 波面補償を行った場合の透過チャネルスペクトル

(3) 高速及び大規模波長選択スイッチによるフォトニックノード構成法

波長選択スイッチを利用するフォトニックノード構成について検討を行った。図 11 に従来の光ノード構成を示す。波長選択スイッチを M 入力とすることで高密度に集積化が可能になり、図 12 の構成となる。本研究の次の段階として複数入力の WSS の検討を行うこととした。

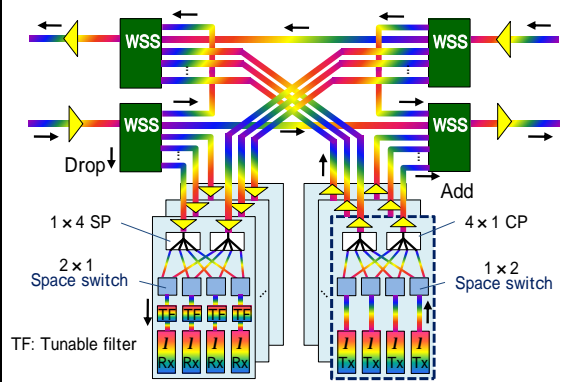


図 11 : 波長選択スイッチを用いた従来の光ノード構成

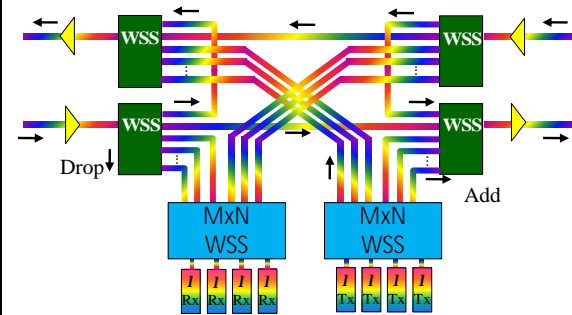


図 12 : MxN 波長選択スイッチを用いた高度集積光ノードの構成

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

Kyosuke Muramatsu, Hideaki Asakura, Keijiro Suzuki, Ken Tanizawa, Munehiro Toyama, Minoru Ohtsuka, Nobuyuki Yokoyama, Kazuyuki Matsumaro, Miyoshi Seki, Keiji Koshino, Kazuhiro Ikeda, Shu Namiki, Hitoshi Kawashima, and Hiroyuki Tsuda, "Evaluation of the phase error in Si-wire arrayed-waveguide gratings fabricated by ArF-immersion photolithography," IEICE Electron. Express, 査読有り、Vol. 12, No. 7, pp. 20150019(2015), DOI: 10.1587/elex.12.20150019.

Takemasa Yoshida, Hideaki Asakura, Takayuki Mizuno, Hiroshi Takahashi, and Hiroyuki Tsuda, "Switching characteristics of a 100-GHz-spacing Integrated 40- 1x4 Wavelength Selective Switch," IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有り、Vol. 26, No. 5, pp. 451-453 (2014).

Keisuke Sorimoto, Ken Tanizawa, Hisato Uetsuka, Hitoshi Kawashima, Masahiko Mori, Toshifumi Hasama, Hiroshi Ishikawa, and Hiroyuki Tsuda "Compact and Phase-Error-Robust Multilayered AWG-based Wavelength

Selective Switch Driven by a Single LCOS,” Optics Express, 査読有り、Vol. 21, Iss. 14, pp. 17131-17149 (2013).

Yuichiro. Ikuma, Takayuki. Mizuno, Hiroshi Takahashi, and Hiroyuki Tsuda, “Integrated 40- 1×2 Wavelength Selective Switch Without Waveguide Crossings,” IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有り、Vol. 25, No. 6, pp. 531-534 (2013).

Keisuke Sorimoto, Hitoshi Kawashima, Masahiko Mori, Toshifumi Hasama, Hiroshi Ishikawa, Hiroyuki Tsuda, and Hisato Uetsuka, “MEMS mirror with slot structures suitable for flexible-grid WSS,” IEICE Electron. Express, 査読有り、Vol. 10, No. 3, pp. 20120924 (2013), DOI: 10.1587/elex.10.20120924.

Nazirul Afham Idris, Keisuke Sorimoto, Hiroyuki Tsuda, “A novel silica waveguide lens for free-space optical cross connects,” IEICE Electron. Express, 査読有り、Vol. 9, No. 11, pp. 998-1004(2012).

Daiki Tanaka, Yuya Shoji, Masashi Kuwahara, Xiaomin Wang, Kenji Kintaka, Hitoshi Kawashima, Tatsuya Toyosaki, Yuichiro Ikuma, and Hiroyuki Tsuda, “Ultra-small, self-holding, optical gate switch using  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  with a multi-mode Si waveguide,” Optics Express, 査読有り、Vol. 20, Iss. 9, pp. 10283-10294 (2012).

〔学会発表〕(計 20 件)

Hisato Uetsuka, Masao Tachikura, Hitoshi Kawashima, Kazuhiro Ikeda, Keisuke Sorimoto, Hiroyuki Tsuda and Keiichi Sasaki, Yuto Yamashita, “Densely packed  $N \times N$  wavelength cross-connect switch module,” Photonics West 2015, OPTO, 9389-11, Feb. 7, San Francisco (U. S. A.), (2015).

Hisato Uetsuka, Masao Tachikura, Hitoshi Kawashima, Keisuke Sorimoto, Hiroyuki Tsuda, Keiichi Sasaki, Yuto Yamashita, “5×5 Wavelength Cross-connect Switch with Densely Integrated MEMS Mirrors,” Photonics in Switching 2014, PW2B.2, July 13, San Diego (U. S. A.), (2014).

津田裕之、梨本恵一、河島整、桑原正史、「波長多重通信用光機能回路」、第 52 回 光波センシング技術研究会講演会、25、東京理科大学(東京・千代田区) 2013 年 12 月 4 日。

H. Asakura, K. Nashimoto, D. Kudzuma, H. Kawashima, and H. Tsuda, “High-speed, hybrid integrated, 1x2 wavelength selective switch using PLZT optical switches and silica planar lightwave circuits,” 13th Microoptics Conference, F4, Tokyo Institute of Technology (Tokyo ·

Meguro-ku), Japan, Oct. 27, (2013).

K. Sorimoto, H. Uetsuka, M. Tachikura, H. Kawashima, M. Mori, T. Hasama, H. Ishikawa, N. A. Idris, and H. Tsuda, “Compact 5×5 wavelength-selective cross connect using integrated 2-D MEMS mirror arrays,” 13th Microoptics Conference, F3, Tokyo Institute of Technology (Tokyo · Meguro-ku), Japan, Oct. 27, (2013).

N. A. Idris, K. Sorimoto, H. Tsuda, and H. Uetsuka, “Silica planar lightwave circuit collimator with UV-cured resin as integrated multilayered lenses,” 13th Microoptics Conference, B6, Tokyo Institute of Technology (Tokyo · Meguro-ku), Japan, Oct. 27, (2013).

吉田健将、浅倉秀明、津田裕之、水野隆之、高橋浩、「100GHz 間隔集積型 40- 1×4 波長選択スイッチ」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会、LQE2013-65、門司港・海峡口マインホール(福岡・北九州) 2013 年 10 月 24 日。

Takemasa Yoshida, Hideaki Asakura, Takayuki Mizuno, Hiroshi Takahashi, and Hiroyuki Tsuda, “Proposal for an Integrated 40- 1×4 Wavelength Selective Switch,” The 18th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2013), ThL3-2, Kyoto International Conference Center (Kyoto · Kyoto), Japan, July 4, (2013).

Tatsuhiko Ikeda, Takayuki Mizuno, Hiroshi Takahashi, and Hiroyuki Tsuda, “Optical spectrum control circuit with flat pass band characteristics using a high-resolution arrayed-waveguide grating,” Photonics West, OPTO, 8627-2, San Francisco (U. S. A.), Feb. 2, (2013).

Hiroyuki Tsuda, Daiki Tanaka, Masashi Kuwahara, Xiaomin Wang, and Hitoshi Kawashima, “Self-holding optical switch using phase-change material for energy efficient photonic network,” The 24th Symposium on Phase Change Oriented Science (PCOS 2012), A13, Hotel Wellseason (Shizuoka · Hamamatsu), Japan, Nov. 30, (2012).

池田達彦、水野隆之、高橋浩、津田裕之、「光スペクトル制御回路の設計と位相誤差補償による波長特性平坦化」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会、LQE2012-120、大阪市立大学(大阪・大阪市) 2012 年 11 月 30 日。

P. Jain, D. Tanaka, H. Tsuda, M. Kuwahara, X. Wang, and H. Kawashima, “Mach Zehnder Interferometer Optical Switch Using Phase-Change Material,” The 24th Symposium on Phase Change Oriented Science (PCOS 2012), P6, Hotel Wellseason (Shizuoka · Hamamatsu), Nov. 29, (2012).

伊熊雄一郎、水野隆之、高橋浩、津田裕之、「石英光導波路を用いた波長選択光スイッチ」、光エレクトロニクス研究会、OPE2012-125、ホテルリメージュ（宮崎・宮崎市）2012年10月26日。

Hiroyuki Tsuda, "Optical Switches for Future Photonic Network System Using Phase-Change Material and Si Waveguides," International Symposium on Optical Memory 2012 (ISOM2012), Mo-E-01, Miraikan (Tokyo・Koto-ku), Japan, Sep. 30, (2012).

Yuichiro Ikuma, Takayuki Mizuno, Hiroshi Takahashi, Tatsuhiko Ikeda, Hiroyuki Tsuda, "Low-loss Integrated 1x2 Gridless Wavelength Selective Switch With a Small Number of Waveguide Crossings," European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012, Tu.3.E.5, Amsterdam (Netherlands), Sep. 16, (2012).

Paridhi Jain, Daiki Tanaka, and Hiroyuki Tsuda, "Mach Zehnder Interferometer Optical Switch Using Phase-Change Material," Photonics in Switching 2012, Th-S4-P09, Ajaccio (France), Sep. 11, (2012).

Daiki Tanaka, Yuichiro Ikuma, Hiroyuki Tsuda, Masashi Kuwahara, Hitoshi Kawashima, and Xiaomin Wang, "Ultracompact 2x2 Directional Coupling Optical Switch with Si Waveguides and Phase-Change Material," Photonics in Switching 2012, We-S22-003, Ajaccio (France), Sep. 11, (2012).

津田裕之、田中大輝、浅倉秀明、河島整、桑原正史、Xiaomin Wang、梨本恵一、「自己保持機能を持つ高速光スイッチと波長選択素子」、2012年電子情報通信学会ソサイエティ大会、C-3-1、富山大学（富山・富山市）2012年9月11日。

反本啓介、金高健二、河島整、森雅彦、挟間壽文、石川浩、津田裕之、上塚尚登、「液晶空間光変調器を用いた光スイッチ用高速収差補償アルゴリズム」、レーザ・量子エレクトロニクス研究会、LQE2012-50、東北大学（宮城・仙台市）2012年8月24日。

Junya Odori, Takemasa Yoshida, Keisuke Sorimoto, Hisao Iitsuka, Hitoshi Kawashima, and Hiroyuki Tsuda, "Low cross-talk silica arrayed-waveguide grating for visible light spectroscopy," Integrated Photonics Research, Silicon, and Nano-Photonics (IPR) 2012, ITu3B.5, June 17, Colorado Springs (U. S. A.), (2012).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2件)

名称：マッハツェンダ干渉計型波長選択スイッチ

発明者：吉田健将、伊熊雄一郎、津田裕之、高橋浩、水野隆之

権利者：日本電信電話（株）慶應義塾

種類：特許

番号：特願 2013-031543

出願年月日：2013年2月20日

国内外の別：国内

名称：アレイ導波路回折格子型波長選択スイッチ

発明者：吉田健将、伊熊雄一郎、津田裕之、高橋浩、水野隆之

権利者：日本電信電話（株）慶應義塾

種類：特許

番号：特願 2013-031544

出願年月日：2013年2月20日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tsud.elec.keio.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

津田裕之 (TSUDA, Hiroyuki)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：90327677

### (2) 研究分担者

神成文彦 (KANNARI, Fumihiko)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40204804

齋木敏治 (SAIKI, Toshiharu)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：70261196