

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360189  
 研究課題名(和文) 強誘電性液晶を用いた光ネットワーク用多チャンネル光スイッチシステムの研究  
 研究課題名(英文) Multi-channel optical switching system using ferro-electric liquid crystals for photonic networks  
 研究代表者  
 中神 隆清(NAKAGAMI TAKAKIYO)  
 神奈川工科大学・工学部・教授  
 研究者番号：20267636

## 研究成果の概要：

本研究では、強誘電性液晶の大きな屈折率変化と双安定性（自己保持特性）を利用した新規な位相可変光導波路を実現し、これを用いて光ネットワークのノードシステムに適用しうる超小型な多チャンネル光スイッチの試作研究を行い、基本原理を確認するとともに、システムへの適用性を明らかにした。具体的には、強誘電性液晶をクラッドとするSiおよびHfO<sub>2</sub>の導波路形成技術を確立し、これを用いた2×2単位スイッチおよび2×4多チャンネル光スイッチを試作して基本動作を確認し、またHfO<sub>2</sub>導波路を用いることでスイッチサイズを飛躍的に小さくできる見通しを得た。これにより本研究の基本概念の妥当性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2007年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：光ネットワーク、光スイッチ、導波路スイッチ、液晶スイッチ、光導波路、液晶クラッド、強誘電性液晶

## 1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信技術の発達により光ネットワークが世界的規模で整備され続けている。研究開発当初、光ネットワークのリンク系には既に10Gb/s伝送と光増幅器およびWDM技術が導入されて伝送量は飛躍的に増大し、更なる大容量化技術も研究段階にあった。さらに、情報サービスの急速な発展に対処するためにネットワークの柔軟性や拡張性の増大およびインテリジェント化が重要な課題となり、ネットワークのボトルネックになりかねないADMやルータ等のノード

系システムを飛躍的に高性能化、大規模化することが課題で、ノードシステムを光化して全光ネットワーク(Photonic Network)を実現することが目標とされてきた。

## 2. 研究の目的

本研究は、強誘電性液晶の光学異方性による大きな屈折率変化と双安定性（自己保持特性）を利用した新規な位相可変光導波路を実現し、これを用いて光ネットワークのノードシステムに適用しうる超小型な多チャンネル光スイッチを開発することを最

終目的とする。本研究は新規な材料を用いた光スイッチを対象とするので、前回の科研費研究での基本原理の確認結果をもとに、本申請研究ではより具体的な研究課題について研究を進めた。主な研究課題は以下の通りである。

- (1) 強誘電性液晶をクラッド層に用いた位相可変光導波路の最適構造・材料の探索
- (2) 強誘電性液晶光導波路による光スイッチ構成法の検討
- (3) 単位光スイッチをアレイ集積化した超小型多チャンネル光スイッチの試作
- (4) 多チャンネル光スイッチを用いた光ノードのシステム実証

### 3. 研究の方法

#### (1) FLCクラッド Si 導波路を用いた 2×2 単位光スイッチの研究

まず、①位相可変光導波路の最適構造・材料の探索、②光スイッチ構成法の検討、の課題について、図1のような Si 導波路の上に FLC クラッド層を設けた光導波路を用いた対称マッハ・ツェンダー干渉計形 (MZI: Mach-Zehnder Interferometer) 2×2 光スイッチの製作を行い、これを通して位相可変導波路の構成技術の確立し、基本特性を把握した。

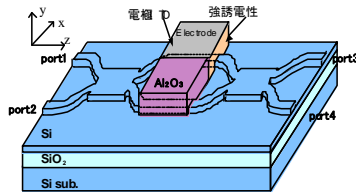


図1 FLCを用いた 2×2 対称 MZI 光スイッチ

この素子では、FLC の電圧を反転したとき MZI を伝搬する光波が  $\pi$  [rad] の位相差を得ることでスイッチ動作を行う。そこで、素子の設計においては、FLC/Si/SiO<sub>2</sub> の 3 層構造の位相変化量を等価屈折率法を用いて見積もり、最適な導波路長を算出した。図2に、試作した素子の導波路構造を示す。製作では、市販の SOI 基板を用いて、フォトリソグラフィとドライエッチングで上部 Si 層表面にリブ導波路を形成し、パターニング後にウェットエッチングを行うことで、位相波路を形成し、

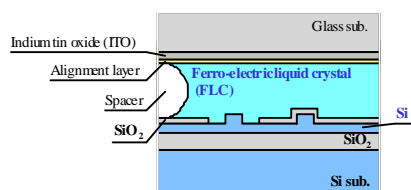
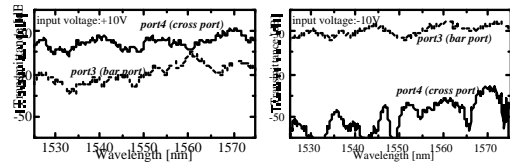


図2 導波路の断面図

可変部を形成する。次いで基板表面にスペーサーを散布し、配向処理を施した ITO 電極付きガラス基板を貼り合わせ、FLC を注入後に電極を取り付ける。このプロセスで多数の試作を繰り返して最適条件を探索し、導波路構成技術を開発した。

試作した光スイッチは、スイッチ特性、波長特性、応答速度等の基本性能を測定して、設計の最適化とスイッチ製作技術の改良を行った。試作した 2×2 単位スイッチで光路を切替えたときの波長特性例を図3に示す。



a) +10V 印加(クロス状態) b) -10V 印加時(バー状態)

図3 ±10V 印加時の出射光の波長特性

#### (2) 多チャンネルスイッチの試作評価

次に、上記で開発した単位スイッチをもとにして、③単位光スイッチをアレイ集積化した超小型多チャンネル光スイッチ実現、の課題に取り組んだ。

2×2 単位スイッチを 3 個接続した図4に示すような構成の 2×4 スイッチスイッチを対象として研究を進め、試作および特性評価を繰り返しながら、パターニング、素子間接続、電極配置など多段階のための課題をクリアして行き、最終的に特性評価可能なスイッチ素子を実現した。

図5に、波長 1.55  $\mu\text{m}$  で試作したスイッチの光切替特性例を示す。この図は、片側の入

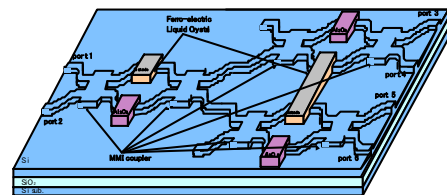


図4 2×4ch 対称 MZI 多チャンネル光スイッチ

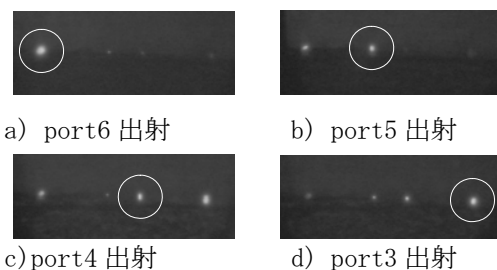


図5 各ポート出射光の近視野像

力端子に入射光を入れ、各電極の印加電圧を順次切替えたときの出射光の近視野像の写真であり、漏れ光（クロストーク）はあるものの、スイッチの基本機能を確認できた。

### (3) HfO<sub>2</sub>材料による素子の小型化

Si 導波路により基本原理の確認と多チャンネル化の見通しを得たことを踏まえ、更なる多チャンネル化のために重要な単位スイッチの小型化を目標とした。このためには、導波路材料の選択が重要であり、理論計算と実際の導波路試作を繰り返して最適な材料の探索を進めた。検討した材料の一覧を表1に示す。検討の結果、筆者達の研究環境ではHfO<sub>2</sub>（酸化ハフニウム）が最適と判断し、本材料により光スイッチの実現を図った。

表1 導波路材料の比較

コア材料	屈折率 @633[nm]	線膨張係数 /°C	屈折率変化による影響	素子サイズ
HfO <sub>2</sub>	2.1	$6.9 \times 10^{-6}$ @ HF	◎	◎
Si	3.48	$2.6 \times 10^{-6}$	○	○
SiO <sub>2</sub>	1.46	$0.4-0.55 \times 10^{-6}$	—	△
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.61-1.63	$7.0-8.1 \times 10^{-6}$	—	—
TiO <sub>2</sub>	2.6	$9.0 \times 10^{-6}$	◎	◎
TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> 混合	1.9	—	◎	◎

この材料による液晶クラッド導波路の位相変化量をシミュレーションで推定した。スイッチ動作のために必要となる位相可変導波路長の計算例を図6に示す。この結果、Siに比べて大幅な動作長の短縮が可能なが分かり、現在実用になっている導波路スイッチにくらべて桁違い（1/10以下）の小型化が可能との見通しを得た。

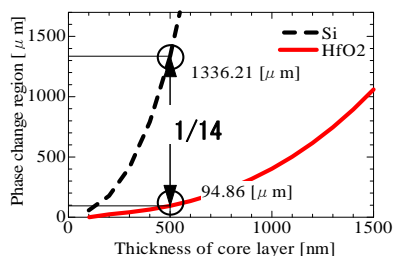


図6 位相可変導波路長の比較

次に、実際に2×2単位スイッチを本材料により試作して、妥当性を確認した。導波路の構造とスイッチ構成は基本的にはSi 導波路と同じであるが、材料が異なるために製作プロセスが異なる。このため導波路の製作から新たに技術を構築する必要があったが、試作を繰り返して最適プロセスを確立し、最終的にスイッチ動作可能な素子を実現できた。

### (4) スwitching動作の確認

上記のように試作した光スイッチを用いて信号を切替、最終的に本研究の妥当性を確認した。図7に出射光の切替特性例を示す。また、同じスイッチで印加電圧を反転したとき

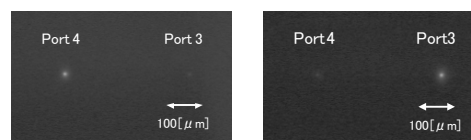


図7 出射光の近視野像

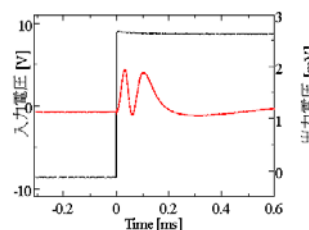


図8 出力光の時間応答特性

の出射光の時間応答特性を図8に示す。

これらの実験により、本材料による光スイッチの動作確認に成功し、スイッチの小型化の見通しを得た。

### (5) 伝送特性実験

以上の素子を用いて光スイッチのデジタル伝送特性を測定し、総合評価結果から本研究の妥当性を確認した。

## 4. 研究成果

以上の研究の結果得られた成果はつぎの通りである。

- (1) 強誘電性液晶をクラッドとする Si 導波路の作成技術の確立およびこれによる2×2単位スイッチ試作と動作確認により、本研究の基本原理を実証した。
- (2) Si 導波路による2×4光スイッチの試作と動作確認に成功し、本原理による多チャンネル光スイッチの実現の見通しを得た。
- (3) 強誘電性液晶をクラッドとする HfO<sub>2</sub> 光導波路の作成技術の確立、および単位光スイッチの試作と動作確認により、従来に比べて飛躍的に小さな光スイッチの可能性を明らかにした。
- (4) 以上の光スイッチのシステム特性を評価し、本研究の妥当性を実証した。

## 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 3件)

- (1) K. Nakatsuhara, T. Sasaki, H. Sato, and T. Nakagami, Si-waveguide with ferroelectric liquid crystal cladding for use in optical switching devices, 査読有, IEICE Transactions on Electronics, E90-C, 5, 1055- 1060, 2007

(2) 中神隆清, 中津原克己, 液晶を用いた WDM 通信用導波路形光スイッチの開発, 査読無, OHM, Vol. No.1, 6-7, 2008

(3) R. Hoshi, K.Nakatsuhara, and T.Nakagami, Optical switching characteristics in Si-waveguide asymmetric Mach-Zehnder interferometer having a ferro-electric liquid crystal cladding, 査読有, IEE Electronics Letters, 42, 11, 635-636, 2006

[学会発表] (計 2 2 件)

(1) T. Sawa, T. Sasaki, H. Sato, K. Nakatsuhara, T.Nakagami, "A 1x4 optical switch of machzehnder interferometers using si-waveguides with ferro-electric liquid crystal cladding," Digest of the 14th Micro Optics Conference, 査読有, P-62, 2008

(2) A. Kato, K.Nakatsuhara, T.Nakagami, "Characteristics of a tunable optical waveguide filter in multiple cavities with ferro-electric liquid crystal cladding," Digest of the 14th Micro Optics Conference, 査読有, P-63, 2008

(3) 佐藤宏樹, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷HfO<sub>2</sub>マッハ・ツェンダー干渉計形光スイッチのスイッチング動作の観測," 2008電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-70, 2008

(4) K.Nakatsuhara, T. Sasaki, H. Sato, and T.Nakagami, "Si-waveguide with ferro-electric liquid crystal cladding for use in optical switching devices," IEI CE Transactions on Electronics, 査読有, E90-C, 5, pp.1055-1060, 2007

(5) T. Sasaki, K.Nakatsuhara, and T.Nakagami, "Mach-Zehnder interferometer switch using Si waveguide with a ferro-electric liquid crystal cladding," Digest of the 7th Pacific Rim Conference of Lasers and Electro-Optics, 査読有, TuD3-4, 2007

(6) K.Nakatsuhara, Y. Sugimoto, and T.Nakagami, "Switching characteristics in a 4x4 Optical Switch using ferro-electric liquid crystal polarization control devices," Digest of the 13th Micro Optics Conference, 査読有, H50, 2007

(7) H. Sato, K.Nakatsuhara, and T. Nakagami "Evaluation of phase change by a HfO<sub>2</sub>-Waveguide Mach-Zehnder interferometer with a ferro-electric liquid crystal cladding," Digest of the 16th Opto-Electronic Communication Conference, 査読有, 12E1-5, 2007

(8) 佐々木豊和, 佐藤宏樹, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷 Si 導波路マッハ・ツェン

ダー干渉計形光スイッチの自己保持動作," 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 査読無, 28a-ZS-4, 2007

(9) 佐藤宏樹, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷マッハ・ツェンダー干渉系 HfO<sub>2</sub> 導波路の強度変化の観測," 第 54 回応用物理学関係連合講演会, 査読無, 28a-ZS-3, 2007

(10) 佐々木豊和, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷 Si 導波路を用いた対称 MZI 光スイッチの位相可変長の短縮," 電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-5, 2007

(11) 杉本侑平, 中津原克己, 中神隆清, "強誘電性液晶偏光制御素子を用いた 4x4 チャンネル空間形光スイッチ," 電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-6, 2007

(12) 佐藤宏樹, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷マッハ・ツェンダー干渉計 HfO<sub>2</sub> 導波路の位相変化量の評価," 電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-100, 2007

(13) R. Hoshi, K.Nakatsuhara, and T. Nakagami, "Optical switching characteristics in Si-waveguide asymmetric Mach-Zehnder interferometer having a ferro-electric liquid crystal cladding," IEE Electronics Letters, 査読有, 42, 11, pp.635-636, 2006

(14) K.Nakatsuhara, H. Kubo, and T. Nakagami, "Bistable tuning operation of a Si-waveguide Fabry-Perot resonator having a ferro-electric liquid crystal cladding," The 32nd European Conference on Optical Communication, 査読有, OWI65, 2006

(15) K.Nakatsuhara and T.Nakagami, "A bistable wavelength tuning characteristics in a TiO<sub>2</sub> grating waveguide having a ferro-electric liquid crystal cladding," Digest of the 12th Microoptics Conference, 査読有, 2006

(16) R. Hoshi, K.Nakatsuhara, T. Nakagami, "A wavelength switching operation of a Si-waveguide asymmetric Mach-Zehnder interferometer having a ferro-electric liquid crystal cladding," Digest of the Optical Fiber Communication Conference 2006, 査読有, OWI65, 2006

(17) 佐々木豊和, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷 Si 導波路を用いた対称マッハ・ツェンダー干渉計型光スイッチのスイッチング動作," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 査読無, CS-11-2, 2006

(18) 佐藤宏樹, 中津原克己, 中神隆清, "小型導波路形光素子のための HfO<sub>2</sub> 導波路," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 査読無, C-3-15, 2006

(19) 佐々木豊和, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷 Si 導波路マッハ・ツェンダー干渉計

型光スイッチの出射光切り替えの観測,” 第67 回応用物理学会学術講演会, 査読無, 29a-ZX-7, 2006

(20) 中津原克己, 中神隆清, “TiO<sub>2</sub> をコアに用いた強誘電性液晶装荷グレーティング導波路の検討,” 電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-56, 2006

(21) 星隆太, 中津原克己, 中神隆清, “液晶装荷 Si 導波路による非対称マッハツェンダ干渉 計形光スイッチのスイッチング動作の観測,” 電子情報通信学会総合大会, 査読無, C-3-15, 2006

(22) 佐々木豊和, 中津原克己, 中神隆清, “導波路形光スイッチに用いる液晶装荷 Si 導波路の位相可変動作,” 電子情報通信学会集積光デバイス技術研究会, 査読無, IPD05-33, 2006

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

(1) 名称: 光スイッチ

発明者: 中津原克己、中神隆清、佐藤宏樹、佐々木豊和

権利者: 同上

種類: 特願

番号: 2007-80774.

出願年月日: 2007. 3. 27

国内外の別: 国内

(2) 名称: 光スイッチおよび光スイッチの製造方法

発明者: 中津原克己、中神隆清、佐々木豊和、佐藤宏樹

権利者: 同上

種類: 特願

番号: . 2007-054064.

出願年月日: 2007. 3. 5

国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中神 隆清 (NAKAGAMI TAKAKIYO)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号: 20267636

(2) 研究分担者

宇野 武彦 (UNO TAKEHIKO)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号: 50257408

中津原 克己 (NAKATSUHARA KATSUMI)

神奈川工科大学・工学部・准教授

研究者番号: 70339894

(3) 連携研究者