

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 10日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560351

研究課題名（和文） 強誘電性液晶を用いた集積形波長可変フィルタアレイ回路の研究

研究課題名（英文） A study of integrated tunable wavelength filter array featuring ferroelectric liquid crystal

研究代表者

中津原 克己 (NAKATSUHARA KATSUMI)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：70339894

研究成果の概要（和文）：波長多重通信技術を用いた光通信ネットワークのさらなる発展のために状態維持電力が不要で低消費電力動作が期待できる強誘電性液晶と高密度集積化が可能なシリコン導波路を用いた波長可変フィルタの開発を行った。本研究では複数の共振器を組み合わせた複合共振器形波長可変フィルタを製作し、単一共振器形に比べて高い消光比を有する動作を実証した。また、本研究過程で着想に至ったグレーティング形波長可変フィルタの動作実証に成功し、それらを複数集積した集積形波長可変フィルタアレイを実現した。

研究成果の概要（英文）：We developed and fabricated tunable optical filters using Si-waveguide multiple-cavity Fabry-Perot resonators with ferroelectric liquid crystal cladding. We also propose and fabricated wavelength selective filters using Si-waveguide grating and demonstrated the selective switching operation, successfully. The proposed filters can be monolithically integrated with other Si photonics devices.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：光デバイス・光回路

### 1. 研究開始当初の背景

ブロードバンド通信の爆発的普及を支えるために、光ファイバ通信ネットワークではWDM(Wavelength Division Multiplexing)技術の導入により伝送容量を増大している。さらに今後、図1に示すようにWDM通信ネットワークに動的な波長選択機能を持たせ、フレキシブルに運用するには、莫大な数の光機能素子、特に波長可変フィルタが必要になる。このため、素子の小形・高密度集積化ならびに低消費電力化を目指す研究が盛んである。

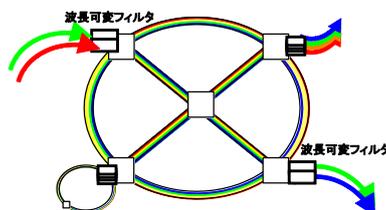


図1 動的な波長選択機能を有するWDM通信ネットワーク

### 2. 研究の目的

我々は大きな屈折率変化と自己保持特性を有する強誘電性液晶 (FLC: Ferro-electric liquid crystal) を用いた導波路形光機能素

子の研究を行い、これまでの研究過程でSi導波路共振器とFLCを組み合わせた波長可変フィルタを考案した。本研究では、図2に示す複合共振器形波長可変フィルタを考案し、製作技術の確立および実用レベルを踏まえた特性の実証を目指す。さらに、図3のように1チップ内に集積化した集積形波長可変フィルタアレイの実現を目的とした。

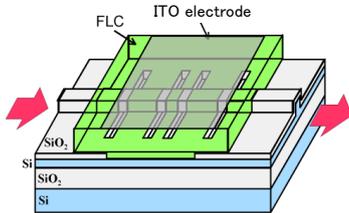


図2 FLC装荷複合共振器形波長可変フィルタ

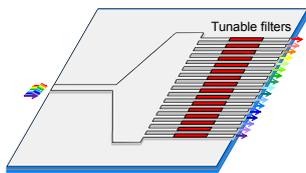


図3 集積形波長可変フィルタアレイ

### 3. 研究の方法

我々が独自に発展させてきた強誘電性液晶を用いた光導波路制御技術をさらに発展させ、将来の WDM 光通信ネットワークへの適用可能性を有した波長可変フィルタを実現するため、3カ年計画で本申請研究を実施した。

高密度集積化に対応し、状態維持電力が不要な自己保持特性を有する集積形波長可変フィルタアレイを実現するために、導波路形複合共振器製作のための微細加工技術とFLC配向技術の向上に重点を置き、次のような3段階の研究課題に分けて遂行した。

- ・複合共振器形波長可変フィルタの開発
- ・FLC装荷Siグレーティング導波路の開発
- ・集積形波長可変フィルタアレイの開発

### 4. 研究成果

#### (1) 複合共振器形波長可変フィルタ

##### ① 複合共振器形波長可変フィルタの製作技術の確立

複合共振器形波長可変フィルタの断面図を図4に示す。複合共振器形波長可変フィルタの実現には、共振器のミラー形成技術が重要であり、そのためのエッチング技術にはナノスケールの形状制御が求められる。本研究で行ったプロセス改良によって、複合共振器の実現に必須要素である多段接続に使用できるエッチングミラーの垂直性が得られ、形成技術の確立に成功した。図5に従来技術を用いて形成したエッチング溝と改良プロセスによるエッチング溝の電子顕微鏡写真を示す。

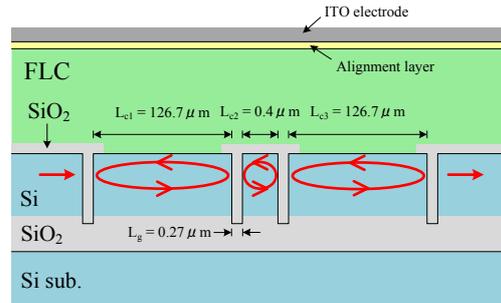


図4 複合共振器形波長可変フィルタの断面図

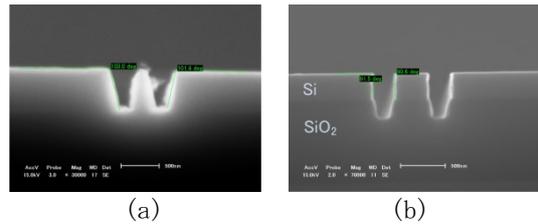
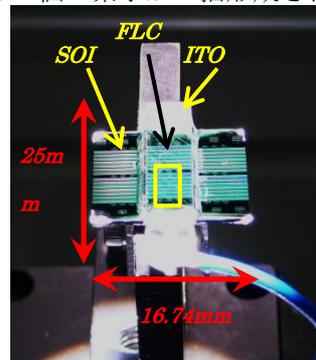


図5 共振器用ミラー溝形成結果  
(a)従来プロセス、(b)改良プロセス

##### ② 波長可変フィルタの動作実証

本研究で確立したプロセス技術を用いて複合共振器形波長可変フィルタを製作したチップの写真を図6に示す。個々の素子のサイズは $2\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$ であり、製作したチップには70個の素子が一括形成されている。



素子サイズ  
 $2\mu\text{m} \times 256\mu\text{m}$

図6 製作した複合共振器形波長可変フィルタ

製作した素子の波長特性を図7に示す。波長特性の測定にはAmplified spontaneous emission (ASE)光源の自然放出光雑音を用いて偏光子によってTE偏光のみを入射し、素子からの出射光は光スペクトラムアナライザを用いて測定した。上部ITO電極とSi導波路との間に $\pm 10\text{V}$ の電圧を印加した。印加電圧の極性を切り替えることにより、1nmの波長特性のシフトを得た。また、同一基板上に製作した単一共振器形の素子では消光比が5dBなのに対し、複合共振器形では14dBであり、9dBの改善が得られた。

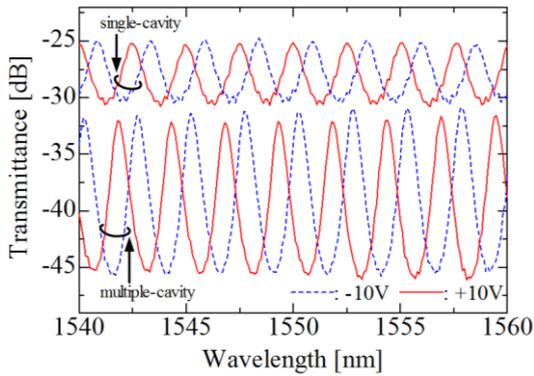


図7 FLC装荷導波路形複合共振器およびFLC装荷ファブリペロー形共振器の波長特性

次に光源を波長可変レーザに変更し、単一波長の光に対する ON-OFF 動作の観測を行った。測定波長 1549.3nm の出射光スペクトルを図 8 に、出射光の近視野像を図 9 に示す。印加電圧 +10V の場合では光が出射し、ON 状態となり、-10V の場合では出射光パワーが抑制され、OFF 状態であることが分かる。消光比は印加電圧の極性変化により、13.5dB が得られた。

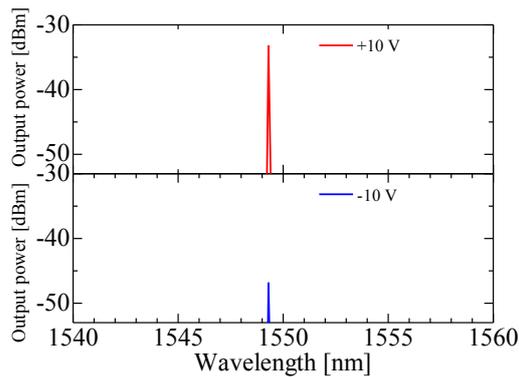
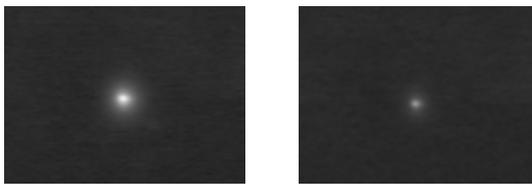


図8 単一波長入射時のFLC装荷導波路形複合共振器の出射光スペクトル



(a) +10V印加時 (b) -10V印加時

図9 FLC装荷導波路形複合共振器の出射光近視野像

本研究で開発した複合共振器形波長可変フィルタはSi導波路に強誘電性液晶をクラッドとして装荷した構造で集積化に適しており、FLCへの印加電圧の極性を変化させることにより、通信波長帯の1530~1560nmの光に対して波長特性の変化を得ることに成功した。

### ③波長可変フィルタの特性向上の検討

強誘電性液晶の効果を増大させることで素子の小形化、波長特性の増大など特性の向上を図ることが出来る。そのため、強誘電性液晶の効果を増大させる導波路の検討を行った。図10にSi導波層の厚さに対する位相変化係数の計算値を示す。この結果から、Si導波層の厚さを300nmの厚さから220nmに薄くすることにより、位相変化係数が約2倍に増大することが分かる。実際にこの効果を確認するために、図11に示すMach-Zehnder干渉計形導波路光スイッチを製作し、短い位相シフト領域長による強誘電性液晶の効果増大の実証に成功した。図12にMach-Zehnder干渉計形導波路光スイッチのスイッチング特性を示す。

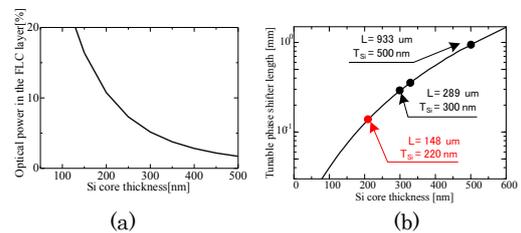


図10 Si導波層の厚さに対するFLCの効果 (a)位相変化係数(計算値), (b)位相シフト領域長

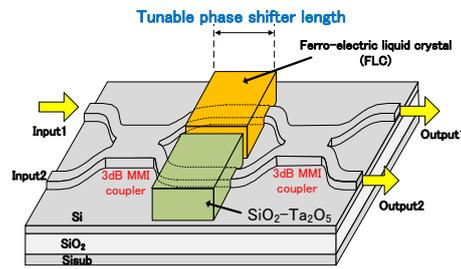
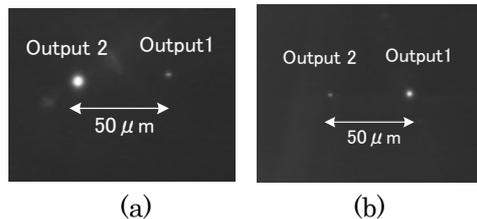


図11 Mach-Zehnder干渉計形導波路光スイッチ



(a) (b)

図12 Mach-Zehnder干渉計形導波路光スイッチの出射光近視野像 (a)+10V印加(クロス状態), (b)-10V印加(バー状態)

### (2) FLC装荷Siグレーティング導波路の開発

本研究過程において着想に至ったFLC装荷Siグレーティング導波路の製作と評価を行った。図13にFLC装荷Siグレーティング導波路の構造図を示す。

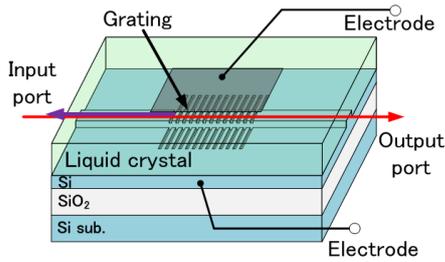


図13 FLC装荷Siグレーティング導波路

①理論特性解析

複合共振器形波長可変フィルタの特性解析の際に使用した透過屈折率法とF-matrixを用いた解析手法を活用し、さらに結合モード方程式の概念を組み込んでFLC装荷Siグレーティング導波路の理論特性を行った。解析に用いたFLC装荷Siグレーティング導波路の断面図とF-matrixの概念図を図14に、得られた理論特性の解析結果例を図15に示す。この結果、FLCへの印加電圧極性の変化によるStop Bandのシフトを理論的に見積もることが可能になり、本解析手法を用いて素子の設計を行った。

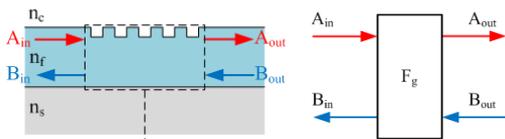


図14 FLC装荷Siグレーティング導波路 (a) 断面図、(b) F-matrix概念図

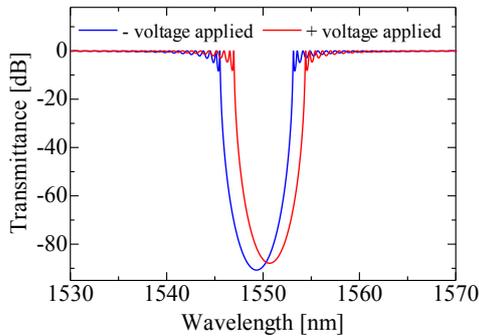


図15 FLC装荷Siグレーティング導波路の理論特性

②要素技術の確立と素子製作

Siグレーティング導波路の製作には、ナノメータスケールの周期構造の制御が必要であり、本研究では電子ビーム描画装置を用いた微細加工技術の確立を行った。図16に、製作したSiグレーティング構造の電子顕微鏡写真を示す。また、本研究ではマルチターゲットスパッタ装置を導入し、グレーティング導波路上の微小な領域に対して選択的に強

誘電性液晶の配向を精密かつ均一に制御する技術の確立も行った。本研究で確立したプロセス技術を用いて製作したFLC装荷Siグレーティング導波路の写真を図17に示す。個々の素子のサイズは $2\mu\text{m} \times 851\mu\text{m}$ であり、製作したチップには35個の素子が一括形成されている。

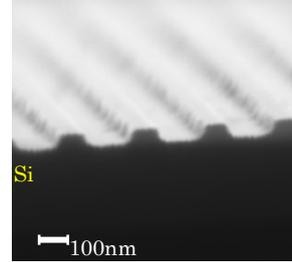
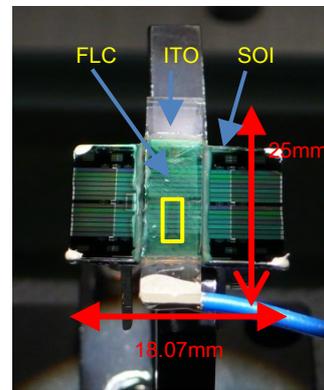


図16 製作したグレーティング構造の電子顕微鏡写真



素子サイズ  
 $2\mu\text{m} \times 851\mu\text{m}$

図17 製作したFLC装荷Siグレーティング導波路の写真

③FLC装荷Siグレーティング導波路の動作実証

製作した素子の波長特性を図18に示す。上部ITO電極とSi導波路との間に形成したFLC層に $\pm 10\text{V}$ の電圧を印加した。印加電圧の極性を切り替えることにより、 $0.8\text{nm}$ の波長特性のシフトを得た。

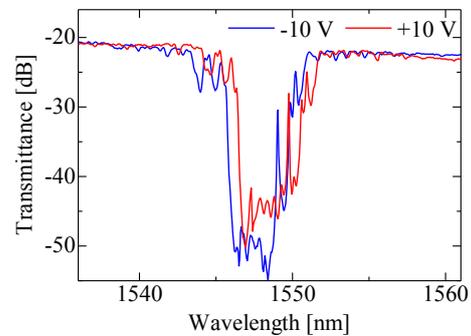


図18 FLC装荷Siグレーティング導波路の波長特性

次に2台の波長可変レーザを光源として素子に入射し、波長選択動作の実証を行った。

図19に出射光スペクトル、図20に波長1546.2nmの光を入射した場合の近視野像を示す。図19より、+10V印加時にstop-bandが長波長側にシフトし、波長チャンネル1546.2nmがONとなり、1550nmがOFF、逆に-10V印加時に、stop-bandが短波長側にシフトし、1546.2nmがOFF、1550nmがONになっていることが確認できる。これにより、FLCへの印加電圧の極性切替によって波長チャンネルを選択動作が実現できること実証した。

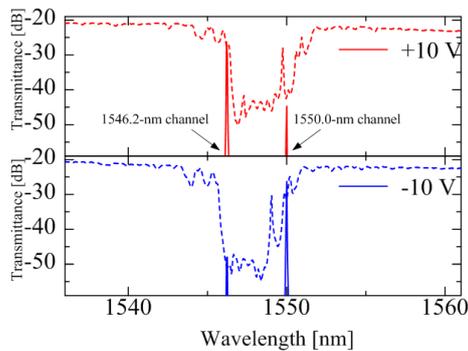
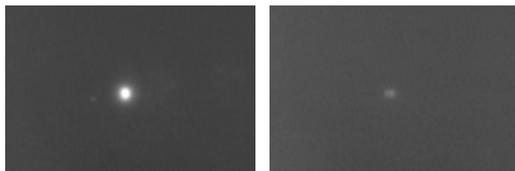


図19 FLC装荷Siグレーティング導波路の波長選択動作



(a) +10V印加時 (b) -10V印加時

図20 FLC装荷Siグレーティング導波路からの出射光の近視野像  $\lambda = 1546.2 \text{ nm}$

#### ④特性向上の検討

強誘電性液晶の配向条件およびSi導波路の構造パラメータを検討し、さらに波長特性のシフト量増大を可能にする見通しを得ている。また、本研究では、PWM(Pulse width modulation)制御によってFLC分子の傾きを制御し、これまで2値の変化しか得られなかった導波路の等価屈折率に対して中間値が得られる方法を実証した。図21にPWM波を用いた連続可変動作の実証例を示す。

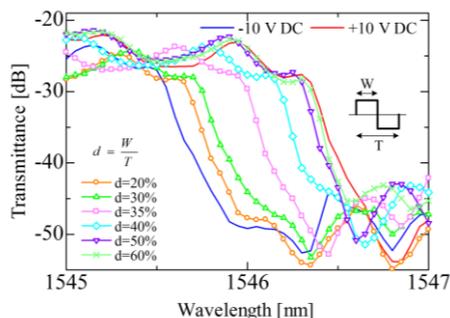


図21 PWM波を用いた連続可変動作

#### (3) 集積形波長可変フィルタアレイ

図22に示すように動作波長を変えたFLC装荷Siグレーティング導波路と1×6光スプリッタを集積化した波長可変フィルタアレイを試作し、動作実証を行った。動作結果をまとめ、学術論文誌に発表する予定である。



図22 FLC装荷Siグレーティング導波路と光スプリッタを集積化した波長可変フィルタアレイ

以上の成果は、集積形波長可変フィルタアレイ回路の実用化に向けた着実な進展を示しており、また、シリコンフォトニクス分野においても新たな動的機能を実現する手法として貢献できるものと考えられる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

① Akifumi Kato, Katsumi Nakatsuhara and Takakiyo Nakagami, “Wavelength Tunable Operation in Si Waveguide Grating That Has a Ferroelectric Liquid Crystal Cladding”, *J. of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 349–354, 2013.

DOI: 10.1109/JLT.2012.2228253

② Akifumi Kato, Katsumi Nakatsuhara, Takakiyo Nakagami, “Tunable Optical Filter With Cascaded Waveguide Fabry-Pérot Resonators Featuring Liquid Crystal Cladding”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 24, pp. 282–284, 2012.

DOI:10.1109/LPT.2011.2177452

[学会発表] (計19件)

○国際会議(査読有) (5件)

① Katsumi Nakatsuhara, Kazuki Tadokoro, Yukihiro Ban, Tomoki Nonaka, Akifumi Kato and Takakiyo Nakagami, “Switching Characteristics in Si Waveguide Mach-Zehnder Interferometer Switches with Ferroelectric Liquid Crystal”, *OECC 2012*, Busan, Korea, 2012.

② Tomoki Nonaka, Yukihiro Ban, Kazuki Tadokoro, Akifumi Kato, Katsumi Nakatsuhara, Takakiyo Nakagami, “Improvement of extinction ratio in cross state of Mach-Zehnder interferometer switch with ferroelectric liquid crystal cladding”, *MOC 11*, Sendai, Japan, 2011.

③ Akifumi Kato, Katsumi Nakatsuhara,

Takakiyo Nakagami, "Tunable wavelength selective operation in grating silicon waveguide having ferroelectric liquid crystal cladding," IEEE Photonics Conference, Arlington U.S.A., 2011.

④ Akifumi Kato, Katsumi Nakatsuhara, Takakiyo Nakagami, "A tunable filter operation in multiple-cavity waveguide Fabry-Perot resonators having liquid crystal cladding", OECC 2011, Kaohsiung, Taiwan, 2011.

⑤ Takahiro Sawa, Katsumi Nakatsuhara, Takakiyo Nakagami, "Switching Operation of Si Waveguide Mach-Zehnder interferometer Switch with Ferroelectric Liquid Crystal Cladding", OECC2010, 8D1-5, Sapporo, Japan, 2010.

○研究会・全国大会 (14件)

① 會野元, 藤井康史, 中津原克己, 中神隆清, "FLC 装荷Si-AWGを用いた波長選択スイッチの特性解析", 電子情報通信学会総合大会, C-3-75, 岐阜大学, 岐阜, 2013.

② 張永亮, 野中友貴, 中津原克己, 中神隆清, "導波路形偏波無依存等分岐結合器の検討", 電子情報通信学会総合大会, C-3-42, 岐阜大学, 岐阜, 2013.

③ 野中友貴, 端山喜紀, 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "導波路形光スイッチ低漏話化のためのSi 導波路構成の検討", 電子情報通信学会総合大会, C-3-49, 岐阜大学, 岐阜, 2013.

④ 端山喜紀, 野中友貴, 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "導波路型光スイッチのためのFLCクラッド材料の検討", 電子情報通信学会総合大会, C-3-48, 岐阜大学, 岐阜, 2013.

⑤ 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "狭阻止帯域幅可変波長フィルタのためのSi sampled grating 導波路の検討", 電子情報通信学会総合大会, C-3-44, 岐阜大学, 岐阜, 2013.

⑥ 藤井康史, 會野元, 野中友貴, 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "Siアレイ導波路回折格子と強誘電性液晶を用いた光スイッチの出力ポート切替動作", 電子情報通信学会総合大会, C-3-56, 岐阜大学, 岐阜, 2013.

⑦ 會野元, 藤井康史, 中津原克己, 中神隆清, "Si-AWG とFLC クラッドを用いた波長選択スイッチの実験的検討", 第60 回応用物理学会春季学術講演会

⑧ 野中友貴, 端山喜紀, 加藤 亜紀文, 中津原克己, 中神隆清, "220nm 厚Si コア層を用いた液晶装荷導波路形光スイッチの製作", 第60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 神奈川, 2013年3月.

⑨ 張永亮, 野中友貴, 端山喜紀, 中津原克

己, 中神隆清, "光スイッチの偏波無依存化の基礎研究", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 熱海, 静岡, 2012年4月.

⑩ 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "強誘電性液晶装荷グレーティングSi導波路の波長シフト動作", 電子情報通信学会総合大会, 岡山大学, 岡山, 2012年3月.

⑪ 會野元, 野中友貴, 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "Si-AWGとFLCクラッドを用いた波長可変フィルターの実験的検討", 電子情報通信学会 集積光デバイスと応用技術研究会, 逗子, 神奈川, 2012年2月.

⑫ 野中友貴, 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "液晶装荷導波路型光スイッチのSi コア層厚の検討", 電子情報通信学会 集積光デバイスと応用技術研究会, 逗子, 神奈川, 2012年2月.

⑬ 加藤亜希文, 中津原克己, 中神隆清, "強誘電性液晶装荷グレーティングSi導波路の特性計算と基礎検討", 応用物理学会, 24a-KB-3, 神奈川工科大学, 神奈川, 2011年3月.

⑭ 小笠原渉, 中津原克己, 中神隆清, 廣瀬伸一, 安藤潔, 望月昭宏, "PSS液晶を用いた液晶偏光制御素子の波長特性", 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 機械振興会館, 東京, 2010年6月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中津原 克己 (NAKATSUHARA KATSUMI)  
神奈川工科大学・工学部・教授  
研究者番号：70339894

### (2) 研究分担者

中神 隆清 (NAKAGAMI TAKAKIYO)  
神奈川工科大学・工学部・講師  
研究者番号：20267636

### (3) 研究協力者

加藤 亜希文 (KATO AKIFUMI)  
神奈川工科大学・工学研究科・大学院生  
小笠 原渉 (OGASAWARA WATARU)  
神奈川工科大学・工学研究科・大学院生  
(2010年度)  
山口 智裕 (YAMAGUCHI CHIHIRO)  
神奈川工科大学・工学研究科・大学院生  
(2010年度)  
野中 友貴 (NONAKA TOMOKI)  
神奈川工科大学・工学研究科・大学院生  
(2011-2012年度)  
會野 元 (KAINO GEN)  
神奈川工科大学・工学研究科・大学院生  
(2011-2012年度)