

令和元年5月10日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18098

研究課題名（和文）局所的ナノ構造配列を用いた液晶装荷シリコンフォトニクス技術の開拓

研究課題名（英文）Development of liquid crystal loaded silicon photonic devices incorporating initial alignment technique based on groove array

研究代表者

渥美 裕樹 (Atsumi, Yuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究員

研究者番号：30738068

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大規模化が進むデータセンターやスーパーコンピュータ内の短距離通信技術として導入が始まっているシリコンフォトニクス分野において、機能性材料である液晶を異種材料集積することで従来デバイスの小型、高性能、高機能化を図った。CMOS互換プロセスを用いてシリコン光回路層にナノ溝構造を一括形成することで局所的な液晶初期配向制御を可能とする技術を開発した。さらに本開発技術を様々な機能デバイスに応用することでその有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

液晶集積シリコンフォトニクスは、アント大学(ベルギー)、カールスルーエ工科大学(ドイツ)や神奈川工科大を筆頭に国内外で研究開発されている。その中で液晶の初期配向状態はデバイス性能・機能に多大な影響を与えるため、フレキシブルな制御技術が求められている。本研究で開発したナノ溝構造集積による初期配向制御技術は光回路の直近に配向機構を実現することが可能であることから動作安定性に優れている。またCMOS互換プロセスを利用して作製可能であることから高い電子光集積性を有し、様々な機能デバイスやシステムへの応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Wide-range phase control is an important function to realize high-performance silicon photonic devices and their integrated circuits in large-scale datacenters and high-performance supercomputers. Liquid crystal (LC) is a promising integration material to realize this function with low power consumption. In this work, we developed a technique to locally control the LC initial alignment by introducing a nano-meter-scale groove array to Si photonics using CMOS compatible fabrication process. Also, we succeeded in introduction of this technology to various optical functional devices and showed its effectiveness.

研究分野：シリコンフォトニクス

キーワード：シリコンフォトニクス 液晶 位相制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

年率 20%以上という爆発的な増加を続けるネットワーク通信量は、今後も遠隔医療、高精細動画といったより高品質なコンテンツの発展に伴い増大し続けると予想されている。それに対応すべく、持続発展性を有する大容量、低消費電力な光通信ネットワークが求められている。次世代の光通信ネットワークにおいては、CMOS 技術との融和性、高密度集積性に優れるという理由から、シリコンフォトニクスを用いた 1000 ポートを超える光経路を切り替える大規模光パススイッチや、自由自在に波長信号を分合波する波長選択スイッチの導入が有望視されている。現在、これら機能デバイスはマイクロヒーター集積による熱光学効果、キャリアプラズマ効果、MEMS を用いたものが主流であり、ポート数  $32 \times 32$  のマトリックス光パススイッチ、マイクロリング共振器アレイを用いた再構成可能光分波システム(ROADM)が報告されている。一方、異種材料集積シリコンフォトニクスと呼ばれる、シリコン導波路をベースとし機能性材料を適材適所に組み合わせることでシステムを高性能化させる技術が近年注目されている。その中で、液晶装荷シリコン光デバイスは、液晶材料有する大きな複屈折率性によるデバイス長の短縮化、電圧駆動による低消費電力化の点で優位性を有し、申請者らグループ、神奈川工科大、KIT(ドイツ)を中心に国内外で研究開発されている。

### 2. 研究の目的

液晶装荷シリコン光デバイスの高性能化に向けては、液晶材料の適切な配向制御が重要となる。従来、液晶の初期配向は、ラビング法と呼ばれる物理的に一方向摩擦された石英基板上ポリイミド配向膜を液晶層上にハイブリッド集積することにより与えられる。本手法は液晶ディスプレイ開発の過程で確立された技術であり、大面積チップに対して一方向に配向を与えたい場合には有用な技術である。しかしながら、平面内の不特定方向に導波路が走る光集積回路においては、位相シフトの向きを全て初期配向方向に統一する必要があり、回路の設計自由度が下がる。また、マイクロリング波長選択スイッチにおいては、光の伝搬方向が円周方向である。従って従来ラビング法を用いると、液晶分子が位相シフトに対して部分的に水平配向となり、変調効率が下がってしまう。そこでこの課題を解決すべく、本研究ではシリコン光回路と同一平面内に CMOS 互換な半導体微細加工プロセスを用いて nm オーダーの凹凸形状ナノ構造配列を形成し、この構造誘因により液晶を局所配向させる新しい配向制御技術を開発する。この技術は、位相シフト導波路と光伝搬干渉しない程度離れた位置にナノ構造配列を形成することで、位相シフト導波路を取り巻く液晶分子の初期配向を制御できるようになる。従って、本技術を用いて位相シフト導波路周りの液晶分子を伝搬方向に初期配列させておくことで、電界印加時の屈折率変化量を最大化することができる。さらにこの手法は、モノリシック集積を可能とするのでアライメント精度よく形成することができ、従来のポリイミド配向膜をハイブリッド集積する手法と比べて、デバイス特性の再現性、安定性の向上が期待される。本研究では、「局所的なナノ構造配列を用いた液晶分子配向制御技術の確立」を図り、さらに開発した技術を光パススイッチ、波長選択フィルタといった光通信システムで必要とされる様々な機能デバイスに導入する。

### 3. 研究の方法

本研究では、まずナノ配列構造による液晶配向制御技術の確立に向け、数値解析/プロセス/実測を通じて分子挙動とナノ配列構造の関係性を解明する。それを軸とし、主要な光通信デバイスである光パススイッチ、波長選択スイッチの開発に取り組む。数値解析では、各種電界解析シミュレータ(有限差分法、及び有限要素法)を用いて、位相シフト部の構造設計を行う。具体的には、液晶配向の変化(屈折率変化)に応じ、位相反転に必要な位相シフト長の計算を行う。

さらに設計に基づきデバイスの作製を行う。局所配向制御機構であるナノ溝構造は、ドライエッチングプロセスによるシリコン光回路の形成後、位置合わせ露光とドライエッチングを行うことにより光回路脇の熱酸化膜上に形成可能であり、導波路の方向に対するナノ溝配列の方向を変えることで、初期配向状態を制御可能かどうか検証する。位相シフト部以外の領域での位相変調を防止するため、位相シフト部のみ液晶クラッドとし、それ以外の導波路はポリマー樹脂で埋め込む。また、液晶は流体材料であることから、液晶の封止技術の開発が必要である。シリコン光集積チップを作製後、スペーサーを介して封止用ガラス基板を貼り合わせ実装する。液晶材料は、毛細管現象により光集積チップと封止用ガラス基板の間に染み込み、チップ上の位相シフト部に流れ込むことで液晶クラッド化させることが可能である。

作製した液晶装荷シリコンチップの液晶配向状態は偏光顕微鏡にて観測する。液晶サンプルの前後にクロスニコルの偏光板を挟み、ナノ溝配列パターン領域内外での透過光量比較を行うことで液晶配向解析を行う。これらは nm ~  $\mu\text{m}$  寸法領域での測定が必要であることから、高倍率の対物レンズ( $\sim \times 100$ )および、対物絞りをを用いて観測する必要がある。また、シリコンは可視波長領域に吸収帯を有する事から、近赤外波長で透過光観察をする。また、作製した機能デバイスの応答速度、駆動電圧の評価に関しては、位相シフト部にパルス電圧信号を印加し、オシロスコープ及びスペクトラルアナライザーを用いてデバイス出力ポートの透過光を測定することで測定することが可能である。

#### 4. 研究成果

図1に液晶装荷シリコン位相シフタの模式図を示す。シリコン導波路のクラッド材料として液晶が用いられており、シリコン導波路のエバネッセント光を介して液晶の物性を伝搬特性に付与する。液晶は通常配向ドメインを形成しており外部電界がかかっていない時、液晶は周辺の構造体の影響を受けた初期配向状態にある。そして電界等による外力を与えることで配向状態を変化させることができる。このため、機能デバイスを開発するに当たり初期配向の制御は非常に重要である。

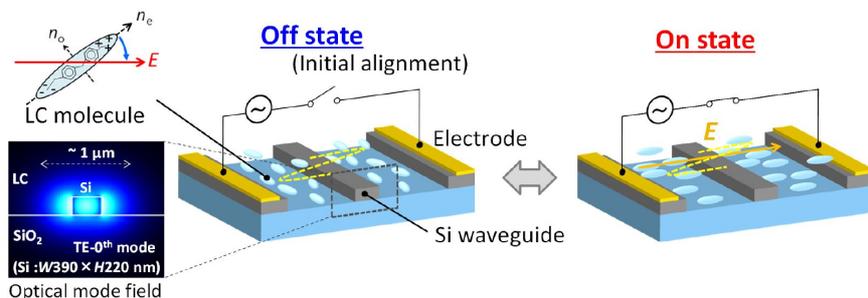


図1：液晶装荷シリコン位相シフタの模式図

図2(a)に本研究で開発したナノ溝配列による局所初期配向制御機構付きマッハツェンダ光スイッチを示す。入力信号は1段目の方向性結合器で2つの位相シフタに分岐される。各位相シフタではナノ溝配列は互いに直交した構成となっている。液晶はその溝に沿って配向されることから、初期配向も図2(b)のように直交配向した。このデバイスに対し、封止用ガラスに形成されたITO電極とSi基板の間で外部電圧を与えチップ垂直方向の電界をかけることで、位相シフタ上の液晶は両者ともにチップに対して立ち上がる。TEモード(平面電界)伝搬光において、ナノ溝構造が導波路と垂直方向である位相シフタ部のみ液晶の複屈折軸が変化するため、位相変化が生じる。両位相シフタに分配された光は後段の方向性結合器で干渉し、位相差に応じて出力ポートが切り替わる。本デバイスは両方の位相シフタに同時に電圧印加してもスイッチ駆動可能であることから、電極構成をシンプルにすることが可能である。

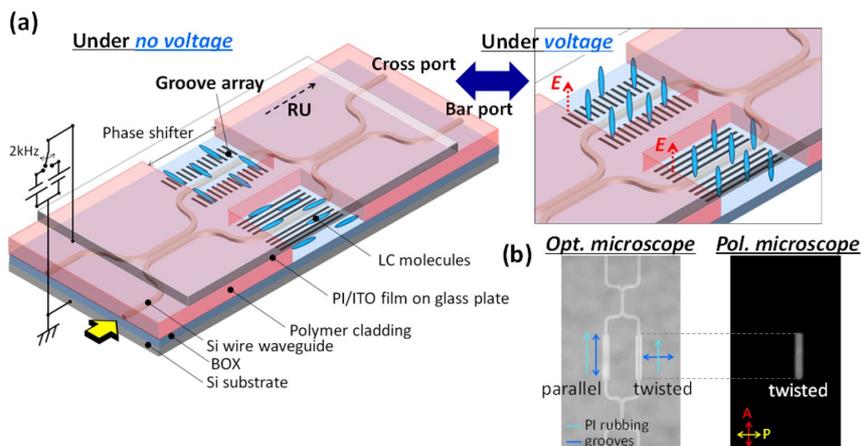


図2 ナノ溝配向誘引構造を導入したマッハツェンダ光スイッチの模式図と偏光顕微鏡写真

図3(a)に図2で作製したデバイスの透過スペクトルを示す。両方の出力ポートから滑らかなスペクトル特性を確認した。また、外部電圧を印加することで波長1567.5nmにおいて出力ポートがスイッチする結果が得られた。光ファイバとの間の結合損失、及びチップ上での導波路損失を除くとデバイスの過剰損失は無視できるほど小さく、またポート間クロストークは22dB, 19dBと良好な結果が得られた(図3(b))。これは液晶と熱酸化膜の屈折率が近いこと、導波路に溝構造を形成しても伝搬光の反射や散乱がほぼ生じていないことを意味する。

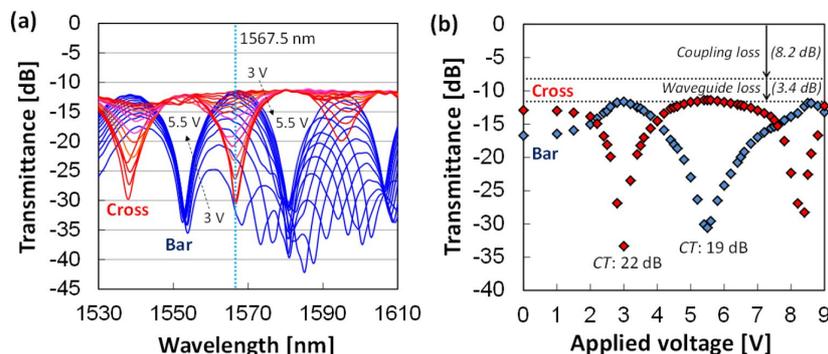


図3 開発したマッハツェンダ光スイッチのスペクトル特性、及び透過光量の電圧依存性

図4に、局所初期配向制御機構付き波長選択フィルタを示す。導波路脇に溝構造を集積していない時はリング導波路の側壁に沿って液晶が初期配向されるのに対し、リング導波路に対して放射状に溝形成した場合は導波路に対して垂直方向に初期配向される。その結果、後者構造にすることで液晶の複屈折を有効的に使うことができ、波長シフト効率が1.6倍向上にする結果が得られた。

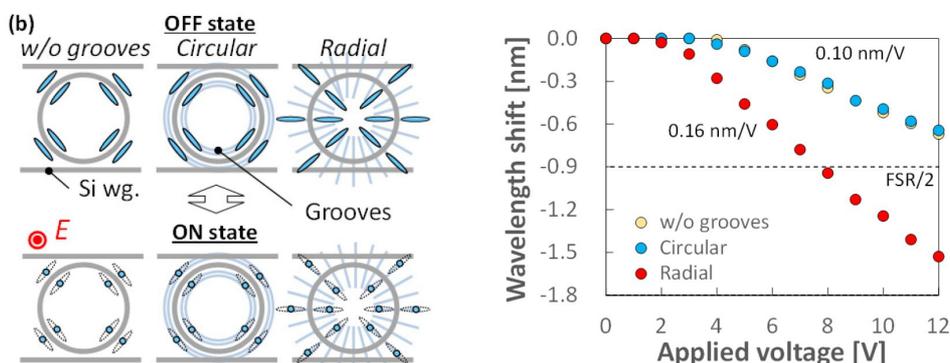


図4 ナノ溝配向誘引構造を導入した波長選択フィルタの模式図、及び波長シフト測定

このように、開発したナノ溝構造による局所初期配向制御機構を位相シフト部に導入することで、様々な機能デバイスにおいてデバイス構造のシンプル化、変調効率の向上が可能である事を明らかにした。液晶装荷シリコンフォトニクスにおいて、このような溝構造を初期配向制御法として利用した研究は申請者の知る限り国内外見ても報告例がなく、今後も様々な機能デバイス・集積システム応用が期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Y. Atsumi, T. Miyazaki, R. Takei, M. Okano, and N. Miura, M. Mori, and Y. Sakakibara, "In-plane switching mode-based liquid-crystal hybrid Si wired Mach-Zehnder optical switch," J. Jpn. Appl. Phys., Vol.55, No. 11, 2016, pp.118003\_1-3.  
DOI: 10.7567/JJAP.55.118003

Y. Atsumi, T. Miyazaki, R. Takei, M. Okano, and N. Miura, M. Mori, and Y. Sakakibara, "Compact and low-loss liquid crystal loaded Mach-Zehnder optical switch based on Si wire waveguide," IEICE Electronics Express, Vol.14, No. 6, 2017, pp. 20170110\_1-9.  
DOI: 10.1587/elex.14.20170110

Y. Atsumi, K. Watabe, N. Uda, N. Miura, and Y. Sakakibara, "Initial alignment control technique using on-chip groove arrays for liquid crystal hybrid silicon optical phase shifters," Opt. Express., Vol.27, No. 6, 2019, pp.8756-8767.  
DOI: 10.1364/OE.27.008756

〔学会発表〕(計8件)

渡部 和宏 他、電極に局所配向誘引構造を埋め込んだ液晶装荷シリコン細線方向性結合器型光スイッチの試作、第64回応用物理学会春季学術講演会、2017。

渥美 裕樹 他、オンチップ微細溝配列を用いた局所配向制御可能な液晶装荷シリコン光スイッチ、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017

Y. Atsumi et al.、Controlled initial orientation of liquid crystals in silicon optical switches with a groove array、CLEO-PR, OECC and PGC 2017、2017

宇田 成孝 他、液晶装荷シリコン細線光スイッチの時間応答特性の検討、電子情報通信学会 2018 年総合大会、2018

渡部 和宏 他、局所配向誘引構造を組み込んだ垂直駆動液晶装荷シリコン細線 MZI 型光スイッチの試作 ( )、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018

渡部 和宏 他、局所配向誘引構造を組み込んだ垂直駆動液晶装荷シリコン細線 MZI 型光スイッチの試作 ( )、第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018

Y. Atsumi et al.、Liquid crystal loaded silicon Mach-Zehnder optical switch incorporating groove array based initial alignment technique、IEEE International Conference on Group IV Photonics 2018、2018

宇田 成孝 他、局所配向誘引構造を組み込んだ面内電界駆動液晶装荷シリコン細線 MZ 型光スイッチの作製、第 66 回応用物理学会春季学術講演会、2019

## 6 . 研究組織

### (1)研究協力者

研究協力者氏名：渡部 和宏

ローマ字氏名：Watabe Kazuhiro

研究協力者氏名：宇田 成孝

ローマ字氏名：Uda Narutaka

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。