

令和 4 年 10 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15470

研究課題名(和文) 広帯域プログラマブル光回路の開発

研究課題名(英文) Development of wideband programmable photonic integrated circuit

研究代表者

鴻池 遼太郎 (Konoike, Ryotaro)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究員

研究者番号：20807557

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)：光集積回路技術は、光情報通信や光量子情報処理などの応用を支える重要な技術であると考えられる。従来の光回路は石英やシリコン等に加工を施すことで作製されるため、加工後にその内容を書き換えることが難しかった。本研究では、2次元的に結合したリング共振器系の共振制御によって動的に書き換えることが可能なプログラマブル光回路の実現を目指し、理論検討・光回路設計および5×5規模の光回路の作製を行った。結果として広帯域性の実証および1×2光スイッチ動作の実証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光回路を動的に生成・消去するためには微小領域の屈折率を大きく変化させる必要があるため、従来の材料では実現が難しいといった課題がある。そこで、本研究では2次元的に結合したリング共振器系において、隣接するリング共振器を非共鳴とする際に生じるバンドギャップ状態を利用する。本バンドギャップ状態では光が系に入ることができない状態が形成されるが、その中にリング共振器が共鳴した領域を形成することで光導波路を形成可能と期待される。この原理に基づき広帯域かつ動的な書き換えが可能な光回路を実現することは、学術的に意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Photonic integrated circuits (PICs) are of great importance in optical communication systems and photonic quantum information processing. Conventional PICs are difficult to be modified after the fabrication as they are fabricated through wafer processes. In this work, we demonstrate a re-writable programmable optical circuit based on two-dimensional coupled ring resonators. We have numerically calculated the system and designed 5 × 5 circuit on silicon platform. As a result, we demonstrated wideband operation and 1 × 2 optical switching operation based on the programmable optical circuit.

研究分野：光集積回路

キーワード：シリコンフォトニクス 光集積回路 リング光共振器

### 1. 研究開始当初の背景

光集積回路技術は、光情報通信ネットワーク、光量子情報処理デバイス、光センシング、光を用いた深層学習等の多岐にわたる応用において重要な技術であると考えられる。従来の光集積回路は石英(SiO<sub>2</sub>)やシリコン(Si)に対して加工を施すことで作製されるため、作製後にその内容を書き換えることは難しかった。一方で、作製後に動的に内容を書き換えることのできるプログラマブルな光回路が実現できれば、低コストでの作製が可能な汎用光回路が実現できるほか、光ネットワークに組み込まれた光回路を遠隔的に書き換えることができる柔軟な光システムの実現、チップ上の故障箇所を回避した光回路の形成などが可能になる。また、ダイヤモンドナノ粒子やコアシェル型量子ドット等をチップ上に分散させ、それらの間を適応的につなぐ光導波路を形成することも可能と期待される。

以上のような動的な光回路を形成するためには、微小領域の屈折率を大きく変化させることが必要であるため、通常材料系では実現が難しい。そこで、本研究では図1(a)に示すようなリング共振器を図1(b)に示すように2次元的に結合させた結合リング共振器系を用いた動的な光回路を提案する。図1(b)に示すように、ある共振器の周回位相を $\phi = 0$ と設定したとき、隣接する共振器の周回位相が $\phi = 0$ であれば共鳴、 $\phi = \pi$ であれば非共鳴となり光の伝搬方向を制御できる。周回位相はヒータによる熱光学効果によって動的に制御できるため、これにより動的な光回路が形成できると期待される。一方で、リング共振器は有限のFSRをもつため、これにより透過帯域が制限されてしまうという課題がある。この課題を解決し、広帯域かつ動的に書き換えが可能な光回路を実現することは学術的に重要であると考えられる。

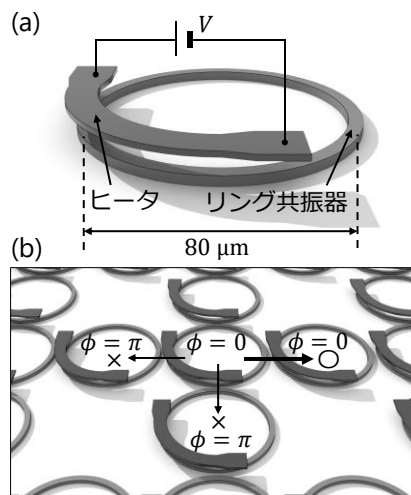


図1. 結合リング共振器系

### 2. 研究の目的

以上の背景のもと、本研究では、実用上重要な波長帯域であるCバンド(1530~1565 nm)を超える広い透過帯域をもつプログラマブル光回路を理論・実験の両面から実証し、応用例として光導波路を動的に書き換えることによる新たな光スイッチ方式を実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は次のような手順に従って実施した。

#### (1) 広帯域プログラマブル光回路の理論の構築および光回路の設計

令和1年度においては、結合リング共振器系を用いたプログラマブル光回路およびその広帯域化に関する理論を構築した。理論計算では、有限要素法およびモード結合理論を組み合わせた手法を用いた。また、リング共振器のFree Spectral Range (FSR)を実験的に測定し、設計にフィードバックするために、1次元の結合リング共振器系(CROW)を作製・測定した。

#### (2) 広帯域プログラマブル光回路の作製および光スイッチ操作の実証

令和2年度においては、設計したプログラマブル光回路を産総研の有する300mm ウェハ CMOS プロセスラインであるスーパークリーンルーム(SCR)を用いて試作した。結果として5×5規模の結合リング共振器系を作製・実装することに成功した。次に、作製した5×5光回路についてヒータの熱クロストークを測定し、各リング共振器の波長制御を行う手法を開発した。最終的に、本デバイスをFSR全域にわたり波長可変させ、Cバンドを超える広帯域性を有することを実証したほか、光導波路を動的に書き換えることにより1×2光スイッチ動作を実証した。

### 4. 研究成果

#### (1) 広帯域プログラマブル光回路の理論の構築および光回路の設計

本研究ではまず、図2(a)に示した2次元結合リング共振器系に対するモード結合方程式を導出した。結果として、図2(b)に示すように、隣接するリング共振器を非共鳴とした状態から、1列のリング共振器のみを共鳴状態とすることで光導波路が形成できることがわかった。さらに、図2(c)に示すように2分岐を形成することで光スプリッタが形成できるほか、図2(d), (e)に示すように光導波路の接続先を動的に変化させることで、光スイッチが形成できることが分かった。

次に、設計に向けた準備として1次元結合リング共振器系(CROW)を作製し、結合リング共振器系のFSRを測定した。光導波路としてはシリコン細線導波路を用いた。測定の結果、Cバンド全域においてFSRはほぼ一定であり、半径40 μmのリング共振器に対してFSRは2.68 nmであることがわかった。

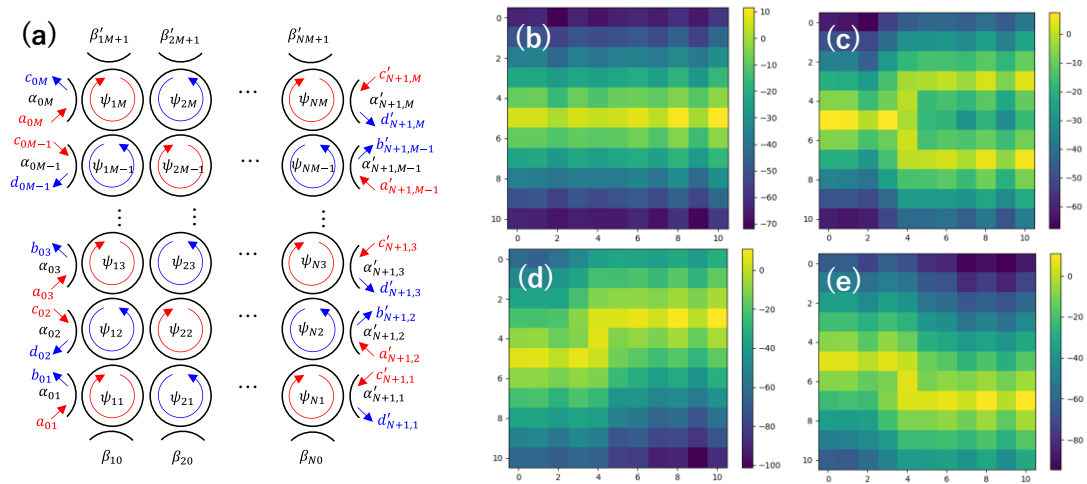


図 2. (a) 計算に用いた構造 (b) 直線状にリングを共鳴させた場合 (c) 分岐, (d), (e) 曲げ導波路を形成した際の各リングにおける光強度分布

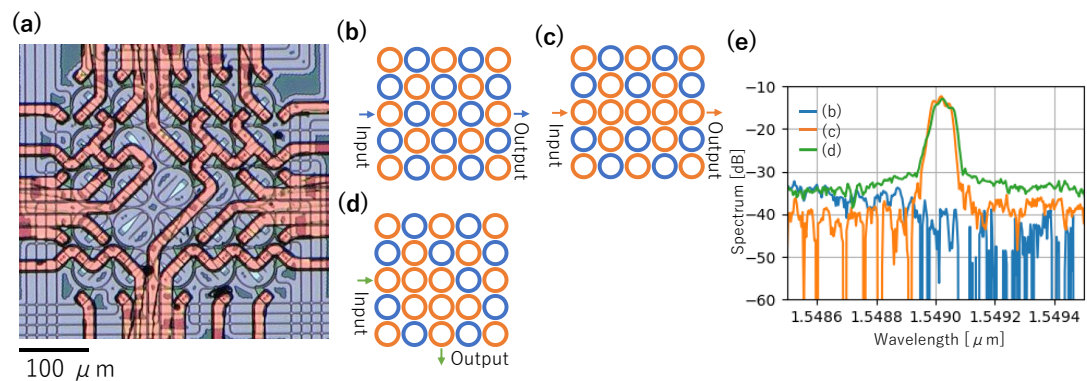


図 3. (a) 作製した 5×5 光回路 (b) Band-gap 状態 (c) 直線導波路 (d) 曲げ導波路 (e) スペクトルの測定結果

## (2) 広帯域プログラマブル光回路の作製および光スイッチ操作の実証

本研究では次に、実際に 5×5 規模のシリコンリング共振器系を作製した。各リング共振器には薄膜ヒータを集積し、共振波長を可変としている。作製にあたっては産総研の有する 300mm SOI ウエハ CMOS プロセスラインである SCR を利用した。作製後のチップ写真を図 3 (a) に示す。チップ上の 25 個のヒータ電極をワイヤボンディングにより実装し、ファイバレイを接続した。また、各リング共振器中にはタップ導波路および垂直方向に光を取り出すためのグレーティング構造を形成し、リング共振波長を測定できるようにした。各リング共振器の半径は 40 μm とし、リング共振器間の間隙は 0.35 μm とした。作製後の各リング共振器の中心波長は 1548.178 nm、標準偏差は 0.305 nm であり、良好な均一性を有していた。

作製した 5×5 光回路について、各リング共振器に集積したヒータを駆動することによって、図 3 (b) のように隣接する共振器の共振波長を非共鳴とする設定を行った。この設定のときのスペクトル測定結果を図 3 (e) の青線を示すが、チップの 1 辺から入力した光は対向する辺まで透過することができず、バンドギャップ状態が形成できることがわかった。次に、図 3 (c) のように直線状に 1 列の共振器を共鳴した状態としたとき、図 3 (e) の橙色線のように光が透過する導波路が形成できることがわかった。光導波路状態と、バンドギャップ状態の間の抑制比は約 30 dB であった。また、図 3 (d) のように曲げ導波路を形成しても、図 3 (e) の緑線のように直線導波路と同様の光透過スペクトルが得られることがわかった。以上の実験結果により、光導波路の動的生成・消去実験に成功し、1×2 の光スイッチ動作を実証した。

また本研究では測定された FSR に対応するインターリーバの設計・作製にも成功しており、デバイスの波長多重化によって、C バンドを超える波長帯域の実現が可能である。実際に、光導波路を形成した領域の中心波長を変化させることで、FSR 全域にわたってその透過帯域を調整することも可能であることも実験的に明らかにしている。以上により本研究ではプログラマブル光回路の基礎特性を実証することができた。一方で、本デバイスを実際にシステムとして実証するには、形成される光導波路の広帯域化が必要となる。今後は、光導波路の広帯域化デバイスの実証を進め、システムとしての実証を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 R. Konoike and K. Ikeda
2. 発表標題 Programmable Waveguides on 2D Coupled Silicon Ring Resonator Array
3. 学会等名 CLEO-PR 2022（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------