

|         |  |
|---------|--|
| 1. 氏名   | 佐藤 孝憲  |
| 2. 所属機関 | 北海道大学 大学院情報科学研究院                                   |
| 3. 研究題目 | 光演算回路のためのシリコンリング光共振器を用いた集積型可変フェーズシフタおよびパワーディバイダの開発 |

4. 研究の目的:

現在の電子デバイスの演算性能は既に限界に達しつつあり、並列計算に頼らない、ブレイクスルーとなる革新的なデバイス開発が望まれている。その突破口の1つとして、電気信号ではなく光信号を使った「光演算回路」が近年注目されている。光回路は電子回路に比べて演算量が多く(～THz クロック)、低電力かつ高速な演算が可能である。しかしながら、光回路素子(特にフェーズシフタとパワーディバイダ)のサイズが大きいために集積度を上げられず、演算ビット数が制限されてしまう問題があった。そこで本研究では、光回路素子の小型化を目的として、シリコンリング光共振器を用いた可変フェーズシフタおよび可変パワーディバイダの設計・開発を行う。従来用いられた動作原理にシリコンリング光共振器の特性を適用することで、これまでに報告されていたデバイスサイズを 1/10～1/100 まで削減可能であることが見込まれる。こうした光回路の小型化により、スケールビリティが飛躍的に向上し、電子デバイスの演算性能を超える光演算デバイス開発の加速化が期待される。

5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。):

アクセスポートを1つ有するリング共振器を可変フェーズシフタとして、また、アクセスポートを2つ有するリング共振器を可変パワーディバイダとして動作させることが可能である。本研究の開始前までに、予備検討として数値シミュレーションを行っており、モード結合理論で予想された通りのデバイス特性が得られることを確認している[1]。本研究では、予備検討結果を再現するための Si 導波路構造を設計(下図の導波路幅や導波路間隔、リング半径などのパラメータ設定)し、マルチプロジェクトウェハ(MPW)方式と呼ばれるシリコンウェハを相乗りするシャトルランサービスを利用して、シリコン光回路チップの作製依頼により試作する。この試作シリコンチップに対して、光ファイバをバットカップリングさせ、波長可変レーザおよび光パワーメータを用いて評価する。

可変パワーディバイダは、図1に示すような2個のリングをカスケード接続した構成であり、図中 Input ポートから入射した光は共振周波数成分だけ Drop ポートに出力し、それ以外の成分は Through ポートへ出力される。リング部の屈折率をキャリア効果や熱光学効果で変化させることで共振周波数を変化させられる。したがって、リング部に電圧を印加することで、パワー分配比を連続的に変化させることができ、固定波長の入射光が ON/OFF となるスイッチ動作も行うことができる。一方、可変フェーズシフタは、図2に示すような1個のリングにアクセス導波路を近接させた構成であるが、光の位相はパワーメータで評価できない。そこで、図3に示すような、前段部を後段部に光等分配器を配置したマツハ・ツェンダ干渉計(MZI)とすることで、可変フェーズシフタにおける位相シフト量をパワー分配比に変換して評価を行う。リング部の電圧に対する挙動は可変パワーディバイダと同様で、位相シフト量を連続的に変化させることができる。

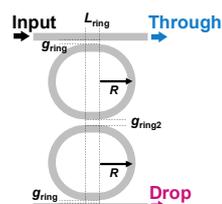


図1 可変パワーディバイダ

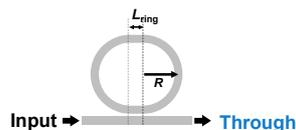


図2 可変フェーズシフタ

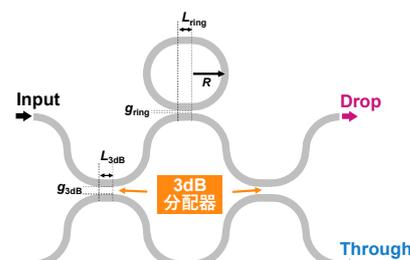


図3 図2の構造を用いた MZI

[1] T. Sato and A. Enokihara, Opt. Express, vol. 27, no. 23, pp. 33005–33010, 2019.

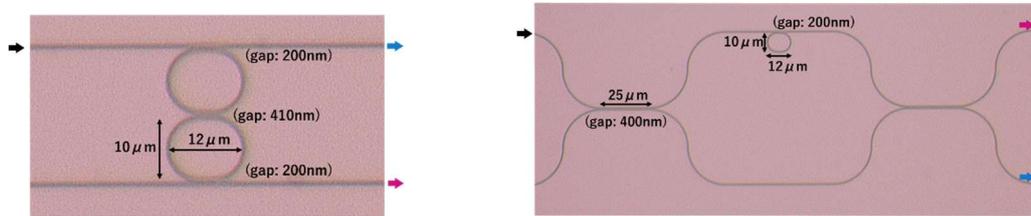
6. 研究の成果と結論、今後の課題[2]:

前頁図 1 および図 3 を試作し、測定を行った。図 4(a),(b)は、試作チップの上部から撮影した顕微鏡写真である。導波路部分はシリコンで、その周りは石英ガラスで覆われている。また、リング部の屈折率を変化させるためのマイクロヒータをリング上部に配置するが、図 4(a),(b)はそれらが取り除かれた状態の写真である。

図 5(a), (b)に、図 4(a), (b)の構造の透過スペクトルを示す。図中の青、赤色の実線は、それぞれ実験結果によって得られた Through、Drop ポートへの透過率である。また、これらの測定結果を再現する解析値を調べるため、モード結合理論と遺伝的アルゴリズムを用いて構造パラメータを求め、そのフィッティングカーブを描画したのが橙色の点線と黒破線である。また、図 5(a), (b)の測定結果は、参照用の直線導波路の透過率から差し引いたものをプロットしている。図 5(a)では、理想的な Box-like 型と呼ばれるフラットな共振スペクトルが確認された。Through、Drop ポートへの透過率は、1536~1538 nm の範囲で 0dB から -20dB まで変化させることが可能であることが確認できる。一方図 5(b)では、予想されるローレンツ型ではなく左右非対称なスペクトルが確認された。これは、共振状態におけるわずかな損失が影響していると考えられるが、損失はそこまで大きいものではなく、Drop ポートへの透過率が 1538~1540 nm の範囲で 0dB から -40dB まで大きく変化していること。すなわち、0 ~  $\pi$  rad までの十分な位相変化が起きているものと考えられる。

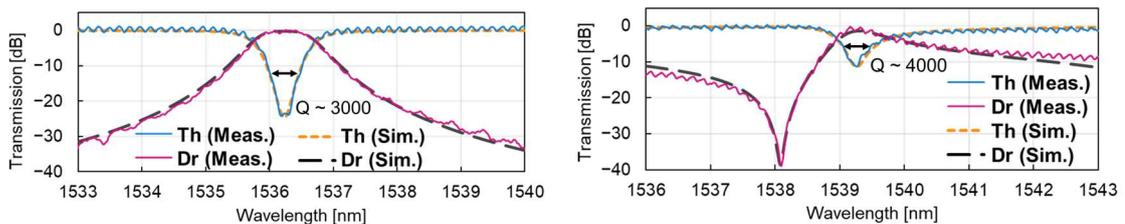
図 6(a), (b)に、図 4(a), (b)の構造における透過率の温度変化依存性を示す。直接温度を測定することができないため、ヒーターに流す直流電流を横軸にとってプロットしている。いずれも 4mA でスイッチング動作可能であることがわかり、10dB 以上の消光比が得られ、挿入損失も十分小さいことが確認された。

以上より、本提案のシリコンリング光共振器を用いた集積型可変フェーズシフタおよびパワーディバイダを用いることで、現実的な温度変化で十分な分配比変化および位相変化が得られることが示された。今後は、駆動方式をより高速なキャリア効果に変更し、これらを組み合わせた光回路による演算動作の実証を目指す。



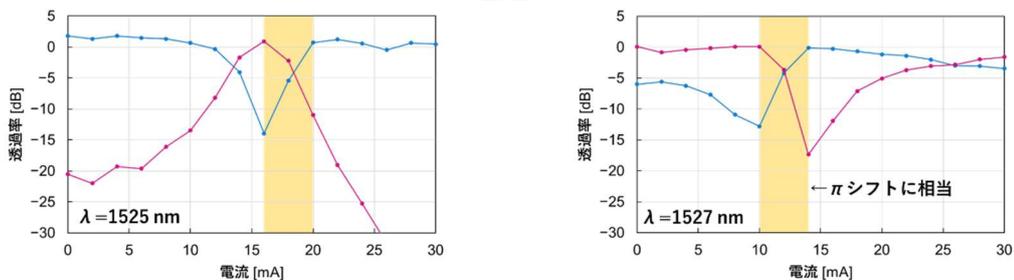
(a) 可変パワーディバイダ (b) 可変フェーズシフタを用いた MZI

図 4 試作チップの顕微鏡写真



(a) 可変パワーディバイダ (b) 可変フェーズシフタを用いた MZI

図 5 透過スペクトル



(a) 可変パワーディバイダ (b) 可変フェーズシフタを用いた MZI

図 6 TiN マイクロヒータによる透過率変化

[2] 佐藤 孝憲, 榎原 晃, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3/4-47, 2020.

## 7. 成果の価値

### 7.1\_学術的価値:

通常、光導波路のフェーズシフタは直線導波路に対して屈折率変化を生じさせるが、例えばシリコン導波路の場合は  $2\pi$  の位相変化を発生させるために少なくとも  $100\mu\text{m}$  程度の導波路長が必要であると考えられていた。本研究では、光共振器における急激な位相変化に着目し、 $10\mu\text{m}$  四方のリング共振器で大きな位相変化を得ることが可能であり、デバイスの小型化が達成された。一方、パワーディバイダについても、通常は 2 つの等分配器と 1 つのフェーズシフタによって構成されるが、本研究では 2 つのリングを結合させたリング共振器で構成可能であることを示しており、大幅な小型化が達成された。これらの小型化は、光演算回路の実現への第一歩であり、今後電子回路と光回路の融合領域の研究を推し進めていくことで、現在直面している電子デバイスの小型化と高速化のトレードオフの解消に繋がることが期待される。

### 7.2\_社会的価値:

近年のインターネット通信は指数関数的に増大しており、これに伴う光通信機器の消費電力も比例して増加し、10 年以内には国内の総発電量では追いつかなくなるといわれている。本研究の目指す光演算回路の実現により、電子デバイスで光信号を電気的に制御するための光電変換(光通信デバイスにおける低消費電力化のボトルネック部分)が最小限に抑えられ、現在の通信インフラのバックボーンで消費されている多大な消費電力を大幅に削減できると期待される。さらに、既存の電子機器の演算処理自体を光で担うことが可能となれば、スーパーコンピュータ等の高速かつ低消費電力化や、機械学習における演算コストを大幅に削減することも期待される。本研究成果は、このような発展を見据えた基礎研究の一成果として位置づけられる。

### 7.3\_研究成果:

#### 【論文誌】

T. Sato and A. Enokihara, "Electro-Optic Full Adder Designed with Coupled Si Microring Resonators for Highly Dense Integration". (査読付き論文投稿中)

#### 【特許】

2 件、特許出願手続中

#### 【学会誌】

西村寿彦, 佐藤孝憲, 小川恭孝, 大鐘武雄, 「光の領域と融合する無線通信」, 電子情報通信学会誌, vol. 104, no. 5, 2021 年 5 月.