

# 超低消費電力シリコン細線MEMS可変光回路の研究開発 (111502003)

## Ultra-low power MEMS-variable silicon-wire optical waveguide circuits

### 研究代表者

羽根 一博 東北大学

Kazuhiro Hane, Tohoku University

### 研究分担者

金森 義明<sup>†</sup> 佐々木 敬<sup>†</sup> 胡芳 仁<sup>†</sup> 宗正 康<sup>†</sup> チュ マンホアン<sup>†</sup>

Yoshiaki Kanamori<sup>†</sup>, Takashi Sasaki<sup>†</sup>, Fang-ren Hu<sup>†</sup>, Yasushi Munemasa<sup>†</sup>, Manh Hoang Chu<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東北大学

<sup>†</sup>Tohoku University

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

### 概要

2×2 の間隙可変のシリコン細線導波路カップラースイッチを開発し、-1dB 以下の挿入損失を実現できた。2×2 のスイッチを並直列に接続し、2×6 の多段スイッチを製作し、動作を確認した。スイッチ時間は 18μsec で、消費エネルギーは 1 切替あたり 0.041pJ、消費電力は 100k 回切替換算で 0.41nW と評価できた。可変マイクロリングでは、20nm の波長可変範囲を実現でき、ヒットレスの波長選択スイッチ方式を実現できた。

### 1. まえがき

光通信の光路切替スイッチは通信網の基本要素であり、シリコン細線光回路においても不可欠である。これまでシリコンの熱光学効果を用いたスイッチが開発されているが、消費電力は一般に数十 mW である。本研究では、消費電力が極めて少ない静電駆動 MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)方式を用いたシリコン導波路のカプラースイッチ、およびそれらを組み合わせた 2x6 の多段スイッチを開発している。また、周長が可変のシリコンマイクロリングとバスラインスイッチを組み合わせたヒットレスの波長選択スイッチも開発している。これらにより、超低消費電力(毎秒 100k 回スイッチで 1nW レベル)で数ミリ角に千個以上のスイッチを集積できるスイッチの基本技術を開発することを目的としている。

### 2. 研究開発内容及び成果

図 1 は提案する導波路カップラースイッチの原理と製作

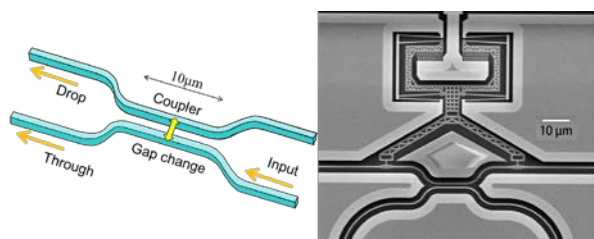


図 1 2×2 カプラースイッチの原理と製作結果

結果を示す。カップラースイッチは空气中に自立した 2 本のシリコン導波路から構成される。導波路を平行に保ちながら、導波路の間隙が変えられる。間隙が変わるとカップラの結合割合が変わり、入射光はドロップポートに移る。導波路の結合定数やスイッチの特性は、理論解析および数値計算により明らかにした。カップラースイッチの一方は、図 1 に示すように 2 つの支持アームにより、静電くしアクチュエータに接続されている。従って、アクチュエータにより導波路を平行移動できる。最初の設計では、2 つのアクチュエータで可動導波路を保持し、平行移動させる構造であったが、確実に平行移動するようにし、複雑さを避けるために、

改良型ではアクチュエータを 1 つに変更した。可動導波路は、カップラ部から離れた位置で楕円導波路ブリッジにより固定されている。ブリッジの損失は 0.1dB より小さいと報告されている。カップラのもう一方の導波路も空气中の自立導波路で、同じくブリッジにより基板に固定されている。アクチュエータに電圧を加えることで、可動導波路は間隙を小さくするように平行移動し、導波路間の結合を強くできる。製作したスイッチを用いて、スイッチ出力の間隙依存性、波長依存性などの特性を測定した。また、スイッチの状態を電力なしで保持できるラッチ機構及び 3 本の平行導波路より構成された 1×3 スイッチなども開発した。

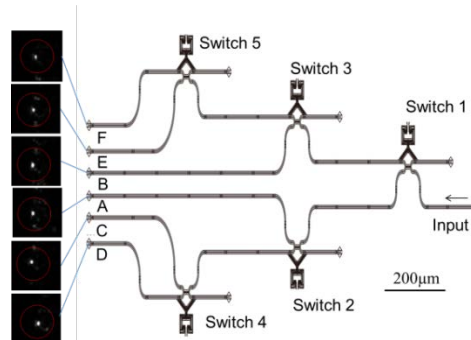


図 2 2×6 スイッチと出力スポット像

マトリクススイッチの例として図 2 に示す 2×6 の多段接続スイッチを設計、試作した。5 個の 2×2 スイッチが直並列に接続されている。図 2 にそれぞれの出力ポートがオン時の出力スポット像の写真を示す。それぞれのポートによる出力差は 2.3dB であった。ポートアイソレーションは-6.2dB から-27.3dB の範囲で、オン状態のポートから離れるほど高い値になった。クロストークは-6.9dB から-28.1dB の範囲であった。上に述べた実験から、2×2 のスイッチの挿入損失を求めると、-1dB 以下と評価された。

可変マイクロリングを用いた波長選択スイッチの基本構造と製作結果の例を図 3 に示す。物理的に切り離された

U字型の2つの自立したシリコン導波路を、カップラーで光学的に結合し、可変リング共振器を構成している。アクチュエータによりリングの周長を変えられる。また、リングが結合しているバスラインとの結合もアクチュエータにより変えられる。これらの可動構造により波長多重信号から特定の波長の信号を他の波長の信号を乱さずに取り出すヒットレス方式のマイクロリング波長選択スイッチが構成できる。

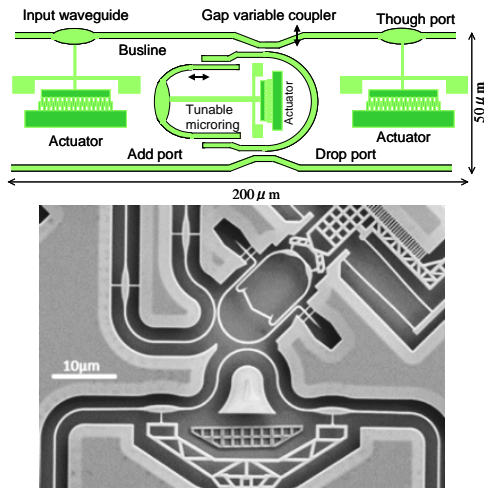


図3 可変マイクロリングを用いた波長選択光スイッチの構造と製作結果

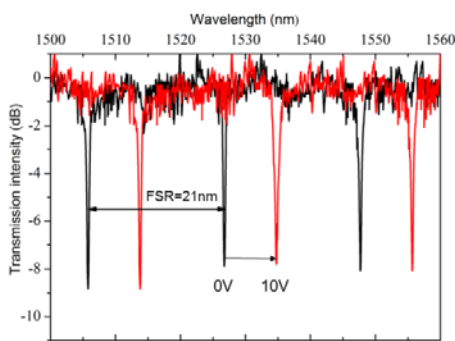


図4 マイクロリングの波長可変特性

設計と製作においては、可変リング機構とバスライン結合機構の特性をそれぞれ測定し、改良を行った。初期の可変リング機構では、波長可変範囲として10nmが得られたが、自由スペクトル領域(FSR)は3.3nmに制限された。リングの周長を短くし、大きな波長変化でも損失が生じ難い構造を提案し、FSRが21nmで、波長可変範囲が27nmの可変リング機構を実現した。図4はアクチュエータ電圧が0Vと10Vのときのスルーポートの出力強度である。周期的なディップが観測される。10Vの電圧印加で8nmの周波数シフトが発生している。ディップの波長幅は0.89nmであり、Q値は1700であった。ディップの深さは-8dBで、リングの1周損失は-0.58dBであった。27nmの共振波長シフトが25Vの電圧印加により得られ、波長シフトの割合は25V付近において1nm/Vであった。バスライン結合機構についても、15dB以上の切り離しから、臨界結合まで動作できることを示した。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発で得られたカップラースイッチおよび可変マイクロリングの成果においては、3件の特許を出願したので、できれば実用化へ展開したい。小型で消費電力も小さ

いので、集積度も上げられる。本研究によりMEMS方式によるスイッチや可変機構の有用性が示せたと考えられるので、他のシリコンフォトニックデバイスと相補的な融合を目指した研究を展開し、MEMS技術が光通信デバイスの開発に寄与できるよう、波及効果の創出に取り組みたい。

### 4. むすび

カップラースイッチの開発目標は、挿入損失-2dB以下、2×6スイッチの実現、クロストーク-15dB以下を目標としていた。開発結果は挿入損失-1dB以下を達成した。クロストークは平均値で-15dBで、ほぼ達成できた。また、マトリクススイッチでは目標の2×6スイッチを実現した。この他に評価で指摘のあった機械式ラッチも実現した。マイクロリングの開発目標は可変波長範囲で4nmを実現し10nmを目指す目標を立てた。またバスラインとの非結合時の除外率-15dBを目標とした。可変範囲は20nmを実現でき、目標を十分上回った。非結合時の除外率は間隔が1μmで-15dB以下であった。

消費電力と集積度については、カップラースイッチで毎秒100k回で1nW以下、集積度を5mm角チップで100×100程度を実現できる基礎技術を確立することであった。スイッチ時間応答波形から求めた1回のスイッチ消費エネルギーは0.041pJであった。100kHzの繰り返して消費電力は0.41nWと求められた。集積度については、カップラースイッチの面積は50μm×50μmであるので、5mm角のシリコンチップ上には100×100=10000のスイッチを搭載できるレベルである。また、マイクロリング波長選択スイッチの場合は80μm×150μmであるので、10mm角チップには125×67=8375のスイッチを搭載できるレベルである。以上の結果から、目標値の基本部分はほぼ達成されたと考えられる。

### 【誌上发表リスト】

- [1] Yuta Akihama, Yoshiaki Kanamori, and Kazuhiro Hane, "Ultra-small silicon waveguide coupler switch using gap-variable mechanism," *Optics Express*, Vol.19, No.24, pp. 23658-23663 (2011 November 21)
- [2] Yuta Akihama and Kazuhiro Hane, "Single and multiple optical switches that use freestanding silicon nanowire waveguide couplers," *Light: Science and Applications*, Vol. 1, No.1, e16 (8pp), (2012 June 22)
- [3] T. Ikeda and K. Hane, "A microelectromechanically tunable microring resonator composed of freestanding silicon photonic waveguide couplers," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 102, No. 22, pp. 221113-1-4 (2013 June 6) 引用 (他 42件)

### 【申請特許リスト】

- [1] 羽根一博, 金森義明, 秋浜祐太, 宗正康, 光カップラースイッチ, 日本, 平成24年2月28日
- [2] 羽根一博, 金森義明, 佐々木敬, 光リング共振器, 日本, 平成25年2月4日
- [3] 羽根一博, チュマンホアン, 波長選択スイッチ, 日本, 平成26年1月16日

### 【受賞リスト】

- [1] 宗正康, 秋浜祐太, 羽根一博, "電気学会論文誌E「センサ・マイクロマシン英文特集号」優秀論文賞"

### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.hane.mech.tohoku.ac.jp/home.html>