

## シングルモード動作全光論理ゲートの構造揺らぎ解析

伏見 亮大, 田邊 孝純

慶應義塾大学 理工学部 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

### All-Optical Logic Gate Operating with Single Input and Output Wavelength

Akihiro FUSHIMI and Takasumi TANABE

Faculty of Science and Technology, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-city, Kanagawa, 223-8522

(Received November 6, 2013)

We numerically demonstrated all-optical logic operation based on microring resonators. The designed systems have the same input and output wavelength, which make these logic gates much easier to implement for a practical use. Coupled mode theory is used to study the operation of this circuit.

**Key Words:** Silicon photonics, All-optical logic gates, Photonic LSI, Ring resonator, Coupled mode theory

#### 1. はじめに

全光信号処理研究の歴史は長いが、従来は光と非線形分極の相互作用が小さいため、必要とされる入力パワーが大きいという問題があった。しかし近年の高Q値微小光共振器技術の進展が、高集積で低パワー駆動が可能な全光信号処理回路<sup>1-3)</sup>を可能とした。これまでに全光論理ゲート<sup>4-7)</sup>や全光Kerrメモリ<sup>8,9)</sup>が報告されている。しかしながら、現在提案されている全光論理ゲートは動作上の制約条件が多い<sup>4-7)</sup>という問題点がある。特に、大規模な回路を設計する際に問題となるのが、多ポート入力の各波長が異なる点である。さらには、入力と出力で波長が一致していない。一方で、異なった共振周波数をもつ複数種類の共振器を必要とする設計も実現上の問題となる。実際に、大規模システムを構築する上で理想の論理ゲートの条件を列挙すると以下のようになる。

1. 全ての入出力信号の光波長が同一
2. 共振器は1種類のみで設計されている

本論文では、上に記した理想の論理ゲートの条件をすべて満たす、SiNマイクロリング共振器<sup>10-12)</sup>によるKerr論理ゲートを紹介する。論理ゲートは光Kerr双安定スイッチの組み合わせによって構成されている。入力/出力信号の波長は $\lambda_1$ とし、動作に必要なドライブ光源は $\lambda_1$ と $\lambda_2$ の2種類の波長の光源を用いる。本論理ゲートは2段階に構成が分かれており、1段階目は $\lambda_1$ の信号を処理して $\lambda_2$ の信号にするもので、2段階目は $\lambda_2$ の信号を再度 $\lambda_1$ に変換するものである。このようにして、入出力の波長を同一のものとしている。

本論文は以下のように構成されている。2章にて光論理回路の構成素子であるマイクロリング共振器の基礎特性を示す。3章にて、論理回路の解析に用いる結合モ-

ド理論の説明を行い、実際にAND/OR、NOR、そしてNAND回路について紹介する。4章では、提案するこれらの回路の変動耐性について詳細に調査した。これまでも、光論理回路の理論提案はあったが、入力の変動や構造揺らぎに対する詳細な解析がなされたことはなく、本解析は理論と実験を結び付けるうえで極めて重要である。最後に5章でまとめる。

#### 2. 構成要素

##### 2.1 マイクロリング共振器

論理ゲートの基本構成素子はSiNマイクロリング共振器である。SiN共振器は高Q値であり、かつバンドギャップが広いため、多光子吸収の影響を抑えて光Kerr効果を利用できる材料として期待されている。マイクロリングの半径は20 μmとし、導波路部の幅は900 nm、厚さは600 nmとした。クラッドは空気を想定している。線形屈折率は $n_0 = 1.98$ で、非線形屈折率は $n_2 = 2.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2 \text{W}^{-1}$ である。共振周波数は1550 nmと1580 nmにあるとし、どちらの共振周波数でもQ値は $1.0 \times 10^6$ とした。

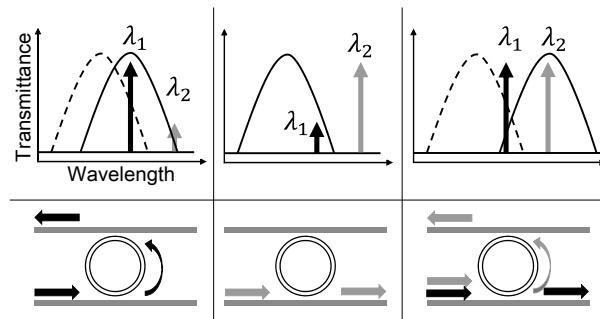


Fig. 1 Operation principle of a Kerr switch system.

光源は $\lambda_1 = 1550.01\text{ nm}$ と $\lambda_2 = 1580.02\text{ nm}$ の2種類を用いた。

1.1 Fig. 1のようなadd-drop系のマイクロリングを例に動作を確認する。 $\lambda_1$ のみがONのときは、入力光は共振波長と少しずれているがKerr効果により共振波長が $\lambda_1$ と一致するようになり、光はdrop側に出力されるようになる。 $\lambda_2$ のみがONのときは共振周波数と離れすぎているため共振器に光が結合しない。しかし、 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ とがともにONのときには、最初は共振波長が $\lambda_1$ までシフトするため、 $\lambda_2$ の光も共振器に結合できるようになる。その結果、共振波長がさらにずれて $\lambda_2$ と一致する。結果的には $\lambda_1$ は共振器に結合せず、 $\lambda_2$ の光がdropされる。ただし、この動作は共振器への光強度に依存するため、入力信号振幅の変動に対する許容度を調べる必要がある。それについて4.1節にて説明する。

## 2.2 導波路・ナノテーパ

導波路の材質、幅や高さといった大きさは共振器部と同じとした。また、導波路の端には不要な信号光を外部に放射させて反射光による干渉を抑えるために、ナノテーパ構造<sup>13)</sup>を付加した。テーパの長さは14 μmとし、線形に細くなるように設計した。3D-FDTD法により解析を行ったところ、我々の設計では反射率は4%であったので、反射は無視できるとして結合モード理論解析を行った。

## 3. 論理回路

論理ゲートを解析するのに結合モード理論(Coupled Mode Theory: CMT)<sup>14,15)</sup>を用いた。マイクロリングの半径を $R$ とし、線形屈折率を $n_0$ 、非線形屈折率を $n_2$ とおく。共振器中の振幅を $a$ とし、入力の振幅を $s_{in}$ 、透過側の出力の振幅を $s_{tr}$ 、drop側の出力の振幅を $s_{dr}$ とすると(Fig. 2)，

$$\frac{da}{dt} = \left[ j\omega_0 - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\tau_{loss}} + \frac{2}{\tau_{coup}} \right) \right] a + \sqrt{\frac{1}{\tau_{coup}}} \exp(j\theta) s_{in} \quad (1)$$

$$s_{tr} = \exp(-j\beta d) \times \left[ s_{in} - \sqrt{\frac{1}{\tau_{coup}}} \exp(-j\theta) a \right] \quad (2)$$

$$s_{dr} = \exp(-j\beta d) \times \sqrt{\frac{1}{\tau_{coup}}} a \quad (3)$$

ここで、 $\theta$ は共振器中のモードと導波路中のモードとの相対位相を表しており、以下の式で表される。

$$\theta = 4\pi^2 n_0 R \left( \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda} \right) \quad (4)$$

また、 $\tau_{loss}$ は共振器の光子寿命、 $\tau_{coup}$ は導波路との結合寿命、 $\beta$ は導波路の伝搬定数、 $\omega_0$ は光源の角周波数、 $\lambda_0$ は光源の波長、 $\lambda$ は共振周波数である。 $a$ の絶対値の2乗は

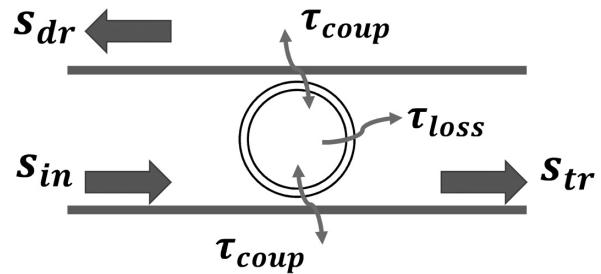


Fig. 2 CMT analysis model of an add-drop system.

共振器中のあるモードでのエネルギー $U$ を表す。このとき、Kerr効果による屈折率変化は、共振器では2波長動作になっていることに注意して、 $\lambda_1$ のモードに対してのKerr効果による屈折率変化は以下の相互位相変調の式であらわされる。ただし、今回の導波路の場合、モードのパワーは81%程がコアに集中しており、モードのしみだしが非線形効果へ与える影響は小さいと考え、考慮していない。

$$\Delta n_{\text{Kerr}} = \frac{2n_2 c}{n_0} \frac{(U_{\lambda_1} + 2U_{\lambda_2})}{V} \quad (5)$$

ここで、 $c$ は光速を、 $V$ はモード体積をあらわしている。(5)式より、共振器波長変化は以下のようになる。

$$\delta\lambda = \frac{\Delta n_{\text{Kerr}}}{n_0} \lambda_0 \quad (6)$$

我々はCMTを用いて4種類の論理回路(AND, OR, NAND, NOR)を構築、解析した。各論理回路は1章で提示した理想の論理ゲートの条件を満たすために、add-drop系のマイクロリングを組み合わせて構築し、導波路との結合寿命 $\tau_{coup}$ 、すなわち導波路と共振器とのギャップだけを適切に設計して論理回路の動作を実現させた。

### 3.1 AND/OR

ORゲートの構成をFig. 3 (a)に示す。

光源のパワーは全て250 mWとした。C1, C2では、 $\lambda_1$ がないときは、 $\lambda_2$ は透過するが、 $\lambda_1$ があるときは $\lambda_2$ はdropされる。どちらも $\tau_{coup} = 2.0 \times 10^{-10}\text{ s}$ とした。C3は前段からの $\lambda_1$ を後段に入らないようにする波長フィルタの役割をし、 $\tau_{coup} = 3.0 \times 10^{-10}\text{ s}$ とした。C4はC3までの $\lambda_2$ の信号を $\lambda_1$ に変換するもので、 $\lambda_2$ がないときはDriveの $\lambda_1$ はdropされるが、 $\lambda_2$ があるときは $\lambda_1$ は透過される。 $\tau_{coup} = 1.5 \times 10^{-10}\text{ s}$ とした。最後のC5はC3とおなじようにFilterの役割をし、 $\lambda_1$ のみをOutputに出力させる。 $\tau_{coup} = 2.0 \times 10^{-10}\text{ s}$ とした。入力と出力を計算した結果をFig. 3 (b)に示す。ORゲートであるので、Input1とInput2が両方OFFの時の出力がLowとなっており、所望の動作が実現できていることが分かった。

ANDゲートは4つの共振器で構成されており、すべて $\tau_{coup} = 2.0 \times 10^{-10}\text{ s}$ である。すべての光源のパワーは250 mWとした。構成はFig. 4 (a)に示す。C1はInput1がONのときはDriveの $\lambda_2$ がdropされるが、Input1がOFFのときは $\lambda_2$ は透過する。C2は $\lambda_2$ をdropさせるフィルタであ

る。C3もC1と同じ動作をする。C4は $\lambda_1$ をdropさせるフィルタである。入力と出力の関係はFig. 4 (b)に示す。

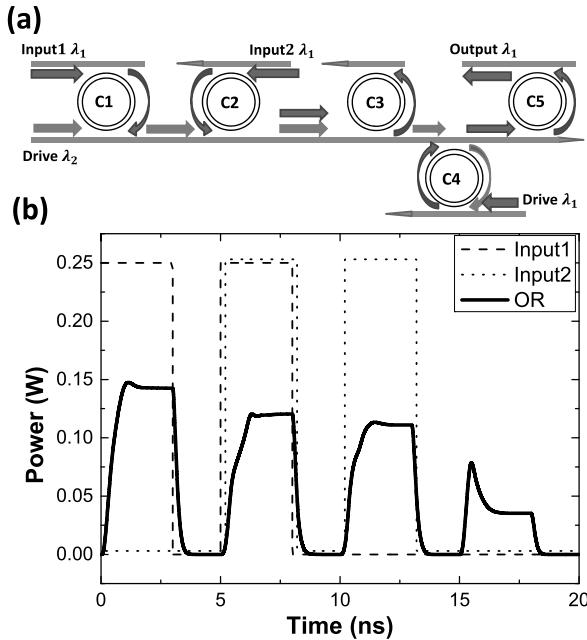


Fig. 3 (a) Design of an OR gate. (b) Input and output waveforms. The dashed, dotted, and continuous lines represent input1, input2, and output, respectively.

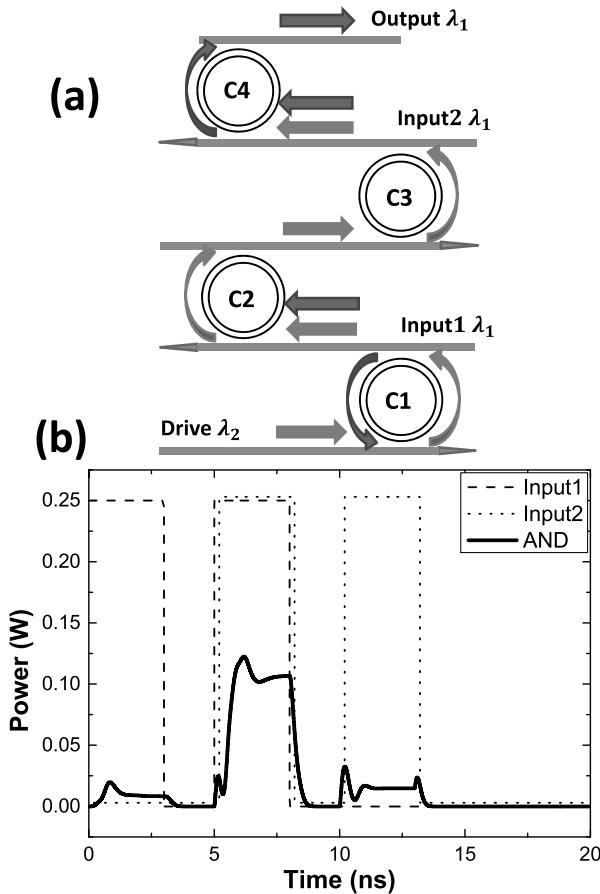


Fig. 4 (a) Design of an AND gate. (b) Input and output waveforms. The dashed, dotted, and continuous lines represent input1, input2, and output, respectively.

す。Input1とInput2が両方ONの時のみ出力がONとなる。

### 3.2 NOR

NORゲートはORゲートとC1～C3までは同じ構成だがC4からが異なる。構成はFig. 5 (a)に示す。すべての光源のパワーは250 mWとした。C1とC2はどちらも $\tau_{\text{coup}} = 2.5 \times 10^{-10}$  sとし、C3は $\tau_{\text{coup}} = 1.5 \times 10^{-10}$  sとした。C4は $\lambda_1$ がないときはDrive  $\lambda_1$ がC5のほうに行かずdropされるが、 $\lambda_2$ がC4にはいると $\lambda_1$ は透過する。 $\tau_{\text{coup}} = 2.5 \times 10^{-10}$  sとした。C5はFilterの役割をし、 $\tau_{\text{coup}} = 2.5 \times 10^{-10}$  sとした。入力と出力の関係はFig. 5 (b)のようになつた。Input1, 2はORゲートと同じ時間波形にしたので、出力は15 nsから20 nsがONとなる。

NORゲートは他のゲートとは異なり、立ち上がり時にリンクが生じているが、これはNORゲートのみが共振器の透過側を出力としていることに由来する。サイドカッピングの共振器に共振波長に一致した光源が入ったときに透過しないのは、共振器内の光と導波路からの光が干渉するためであり、共振器内に光がない信号の立ち上がり時では透過側にも光がもれてしまい、NORゲートのようなリンクが生じる。

### 3.3 NAND

NANDゲートはC1～C3まではANDゲートと共通である。構成はFig. 6 (a)に示す。それぞれ $\tau_{\text{coup}} = 1.5 \times 10^{-10}$  s,  $1.0 \times 10^{-10}$  s,  $2.5 \times 10^{-10}$  sとした。ただし、Input1, 2とDrive  $\lambda_1$ は250 mWであるが、Drive  $\lambda_2$ のみ360 mWとした。C4は後段までの $\lambda_2$ がC4までくるとDrive  $\lambda_1$ は透過するが、それ以外のときは $\lambda_1$ はdropする。 $\tau_{\text{coup}} = 2.5 \times 10^{-10}$ とした。C5はFilterとして機能し、 $\tau_{\text{coup}} = 1.0 \times 10^{-10}$ とした。入力と出力の関係はFig. 6 (b)のようになつた。出力は0 nsから5 nsと10 nsから20 nsがONとなる。

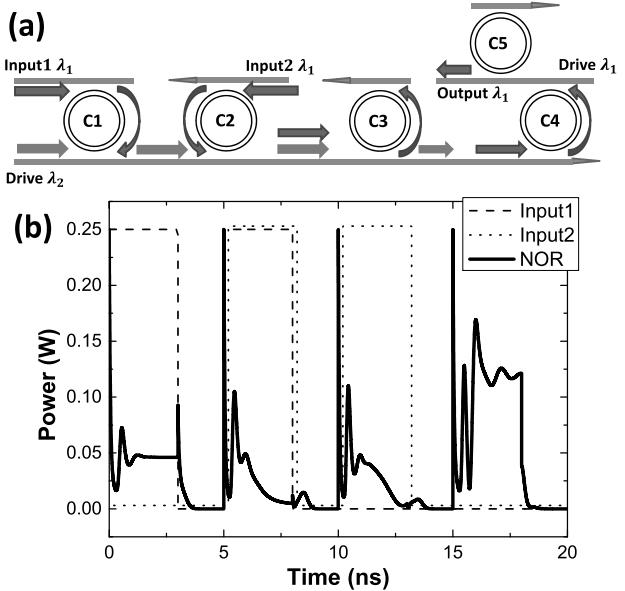


Fig. 5 (a) Design of a NOR gate. (b) Input and output waveforms. The dashed, dotted, and continuous lines represent input1, input2, and output, respectively.

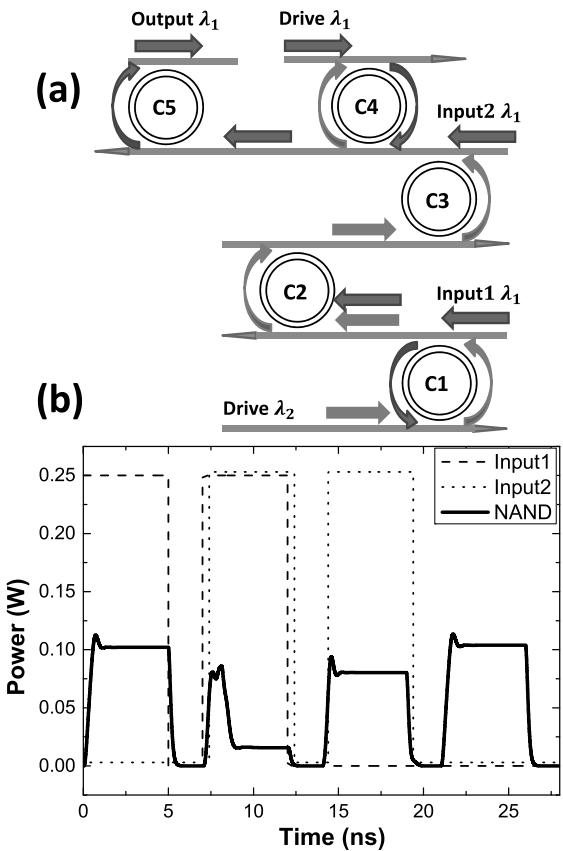


Fig. 6 (a) Design of a NAND gate. (b) Input and output waveforms. The dashed, dotted, and continuous lines represent input1, input2, and output, respectively.

#### 4. 変動への耐性

##### 4.1 入力信号振幅の変動に対する許容度

各ゲートを実際に利用する際は、常に最適な入力信号

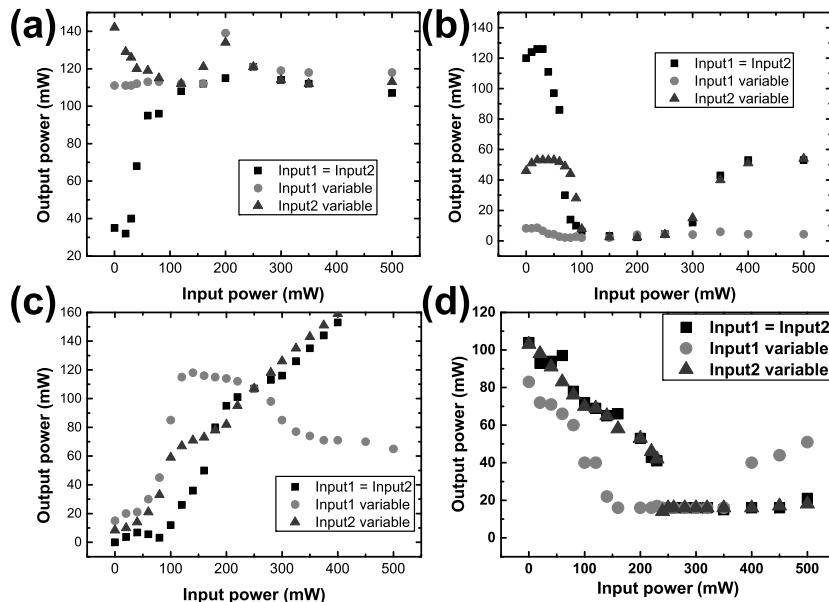


Fig. 7 Input powers versus output power for different logic gates. (a) OR gate. (b) NOR gate. (c) AND gate. (d) NAND gate. The square dots are the outputs when the power of input 1 and 2 are simultaneously changed. The circle dots are the outputs when only input1 is changed (the power of input2 is fixed at 250 mW). The triangular dots are when the power of input2 is changed (the power of input1 is fixed at 250 mW).

強度になっているわけではないので、その強度揺らぎに対する評価を行うことは重要である。Drive光のパワーは前章と同じとして、Input光のパワーを変化させる。Fig. 7は各ゲートの入力の変動に対する出力を表している。i. 四角はInput1とInput2をともに同値として変化させたときの出力を、ii. 丸はInput2を250 mWに固定してInput1のみを変化させたときの出力を、iii. 三角はInput1を250 μmWに固定してInput2を変化させたとき出力の出力である。

ORゲートではiでは入力パワーを上げるとOFFからONに変化し、iiとiiiはつねにON状態になるのが理想である。Fig. 7 (a)よりORゲート動作が実現できていることがわかる。出力がOFFからONに変化する入力信号光強度のしきい値は50 mW付近にあることがこの結果よりわかり、数十mWに渡って入力光パワーが揺らいだとしても、出力は安定してONまたはOFF状態が得られることがわかる。

NORゲートはiでは入力パワーを上げるとONからOFFに変化し、iiとiiiはつねにOFF状態になるのが理想である。Fig. 7 (b)によれば、OFF/ONの出力しきい値を60 mWとすればほぼ理想の出力特性が得られているといえる。ただし、iにおいて入力パワーが60 mWから100 mWの間は不安定な挙動を示すため、入力光強度は60 mW以下をOFF、100 mW以上をONとする必要があることが示された。

ANDゲートはi, ii, iiiともに入力パワーを上げるとOFFからONに変化するのが理想であり、Fig. 7 (c)をみるとiiにおいて入力パワーが250 mWを超えたところから出力が低下していくことがわかる。

NANDゲートはi, ii, iiiともに入力パワーを上げるとONからOFFに変化するのが理想であり、Fig. 7 (d)よりiiのパワーがi, iiiと比べて小さいことがわかる。また入

力パワーが60 mWから200 mWの間では出力が不安定になる。

以上まとめると、OFF/ONの出力しきい値を60 mW程度とするのであれば、OFFの入力信号の上限はORゲートによって制限され40 mW程度になる。一方で、ONの入力信号の下限はNANDゲートによって制限されて200 mW程度となる。

実際の光論理回路構成の提案において、このような入力光強度に対する揺らぎの解析が行われた例はないが、本回路においては入力光強度揺らぎに対しては極めて耐性が強いことが示された。

#### 4.2 共振波長の変動に対する許容度

共振器を用いたシステムにおいては、各共振器の共振波長のばらつきが動作に対して最も影響が大きいと言われている。そこで本節では共振波長の変動に対する本論理ゲートの許容度を確認していく。各論理ゲートは2つの共振モードを有する共振器を4、5個使用している。それら8個か10個の共振波長に対し、共振中心波長に正規分布に従う誤差を与えた。正規分布の幅を表す標準偏差 $\sigma$ を変化させたときに、20回中10回以上出力の論理値が間違えた標準偏差を限界値 $\sigma_{lim}$ とする。ただし、出力が定常状態に落ち着かない場合にも、動作不良としてカウントした。

各論理ゲートにおける共振スペクトル幅の上下限 $S_{max}$ ,  $S_{min}$ と限界値 $\sigma_{lim}$ はTable 1のようになった。ただし、ここでの共振スペクトル幅は半値半幅の値である。共振器が有する固有 $Q$ 値によって制限される共振スペクトル幅(FWHM)は1.6 pmであるが、導波路との結合によって共振スペクトル幅は広がっている。 $\sigma_{lim}$ の値はどの論理ゲートにおいても $S_{min}$ より小さくなっている( $\sigma_{lim}$ はHWHMに相当するため、Table 1においてはFWHMにて比較するため $\sigma_{lim}$ を2倍して掲載している点に注意)。全ての共振器の共振スペクトルが波長領域で重なり合っていないと動作しない本論理ゲートの限界である。

つまり、この結果は、論理回路設計においては、共振器と導波路の結合を強くすることで、共振スペクトルの揺らぎ耐性を向上させることができるということを示唆している。

#### 4.3 共振器と導波路との距離の変動に対する許容度

共振器との導波路との結合寿命 $\tau_{coup}$ は共振器と導波路

Table 1 Maximum and minimum spectrum width ( $S_{max}$  and  $S_{min}$ ) that are used in different logic gates. Maximum allowed error in standard deviation  $\sigma_{lim}$  are also shown.

	OR	NOR	AND	NAND
$S_{max}$ (FWHM)	17.0 pm	17.0 pm	13.0 pm	26 pm
$S_{min}$ (FWHM)	8.2 pm	10.0 pm	10.0 pm	10.0 pm
$\sigma_{lim} \times 2$	6.0 pm	4.0 pm	7.0 pm	3.0 pm

間のギャップ $s$ に依存する<sup>16-18)</sup>。共振器部と導波路の幅は同じとし $w$ とおく。また簡易化のため、屈折率 $n$ や伝搬定数等 $\beta$ も共振器部と導波路とで同じとする。導波路内の伝搬定数 $k_x$ とコア外への伝搬定数 $\alpha$ は以下のようにあらわされる。

$$k_x = \sqrt{n^2 k^2 - \beta^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{\beta^2 - n^2 k^2} \quad (8)$$

ただし、 $k$ は真空中での波数である。式(7), (8)よりモードのパワー $P$ は以下のようになる。

$$P = \frac{\beta}{2\omega\mu_0} \left( w + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (9)$$

$\omega$ は角周波数を、 $\mu_0$ は真空の透磁率を表している。結合強度 $\kappa$ は、導波路のモードと共振器のモードの重なりを伝搬方向に積分して求めることができ、

$$\kappa = \frac{\omega\epsilon_0 \cos\left(\frac{k_x w}{2}\right)}{2P(k_x^2 + \alpha^2)} (n^2 - n_0^2) \times \sqrt{\frac{\pi R}{\alpha}} \exp(as) \\ \times \left[ \alpha \cos\left(\frac{k_x w}{2}\right) \sinh\left(\frac{\alpha w}{2}\right) + k_x \sin\left(\frac{k_x w}{2}\right) \cosh\left(\frac{\alpha w}{2}\right) \right] \quad (10)$$

となる。 $\epsilon_0$ は真空の誘電率である。結合 $Q$ 値は次のように近似できる。

$$Q = \frac{2\pi^2 R n_e}{\lambda_0 \kappa^2} \quad (11)$$

$n_e$ は等価屈折率、 $\lambda_0$ は真空中での波長である。よって、結合寿命 $\tau_{coup}$ は $\kappa$ を用いて以下のようにあらわされる。

$$\tau_{coup} = \frac{Q}{\omega} = \frac{\pi R n_e}{c \kappa^2} \quad (12)$$

式(12)を用いると、我々の論理ゲートに用いられている結合寿命 $\tau_{coup} = 1.0 \times 10^{-10}$  s,  $1.5 \times 10^{-10}$  s,  $2.0 \times 10^{-10}$  s,  $2.5 \times 10^{-10}$  s,  $3.0 \times 10^{-10}$  sを得るために、ギャップ距離をそれぞれ $s = 238$  nm, 270 nm, 293 nm, 311 nm, 326 nmとすれば良いことがわかる。我々は前節で行ったのと同様に、ギャップに正規分布の広がり方をもつランダム性を与えた。正規分布の幅を表す標準偏差 $\sigma$ を変化させたときに、20回中10回以上出力の論理値が間違えた標準偏差を限界値 $\sigma_{lim}$ とする。

各論理ゲートにおける限界値 $\sigma_{lim}$ はTable 2のようになった。NANDゲートが最も小さく $\sigma_{lim} = 12$  nmとなったが、昨今の加工精度を考慮すると、十分実現可能な精度の要求であることがわかる。

Table 2 Maximum allowed fabrication error in standard deviation  $\sigma_{lim}$  for different logic gates.

	OR	NOR	AND	NAND
$\sigma_{lim}$	22 nm	25 nm	40 nm	12 nm

このように、実際の理論計算に実際の加工精度の影響を取り入れて考慮した他には例はないが、大規模な光回路の実際の素子を作製する上では、このような手法は必要不可欠になると言える。

## 5. 結 論

我々は非線形効果のKerr効果を取り入れたCMTを用いて入出力波長が一致するなどの利点をもった4種類の論理ゲートの解析をおこなった。また入力変動に対する耐性を調べたところ、OFFの信号の上限は40 mW程度に、ONの信号の下限は200 mW程度となり、多少の入力変動にかかわらず正常に動作することがわかった。また共振器と導波路とのギャップの要求精度は12 nmであることが確認され、十分に実現可能であることわかった。その一方で、共振波長の変動に対しては最大でも $\sigma_{\text{lim}} = 3.5 \text{ pm}$ の許容誤差しかなく、実際の作製精度を考慮すると十分ではない。この値は共振器と導波路間の結合を強めたりすることで、緩和することができる予想される。

これまで、理論計算では実験誤差を考慮に入れるることはなかったので、理論研究と実験の乖離は大きかったが、本論文で示したように、設計段階においても、作製誤差や入力変動に対する耐性を考慮することで、そのギャップを埋めることができる。本手法は実験と理論を繋ぐ際の重要な知見を与える。

## 参考文献

- 1) V. R. Almeida, C. A. Barrios, R. R. Panepucci, and M. Lipson: *Nature* **431** (2004) 1081.
- 2) T. Tanabe, M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, and E. Kuramochi: *Opt. Lett.* **30** (2005) 2575.
- 3) A. Abbasi, M. Noshad, R. Ranjbar, and R. Kheradmand: *Opt. Comm.* **285** (2012) 5073.
- 4) M. Noshad, A. Abbasi, R. Ranjbar, and R. Kheradmand: *J. Phys.: Conf. Ser.* **350** (2012) 012007.
- 5) Y. Liu, F. Qin, Z.-M. Meng, F. Zhou, Q.-H. Mao, and Z. Y. Li: *Opt. Express* **19** (2011) 1945.
- 6) P. Andalib, and N. Granpayeh: *J. Opt. Soc. Amer. B* **26** (2009) 10.
- 7) P. Andalib, and N. Granpayeh: *J. Opt. A* **11** (2009) 8.
- 8) M. Pollinger, and A. Rauschenbeutel: *Opt. Express* **18** (2010) 17764.
- 9) I. Razdolskiy, S. Berneschi, G. N. Conti, S. Pelli, T. V. Murzina, G. C. Righini , and S. Soria: *Opt. Express*, **19** (2011) 9523.
- 10) J. S. Levy, A. Gondarenko, M. A. Foster, A. C. Turner-Foster, A. L. Gaeta, and M. Lipson: *Nature Photon.* **4** (2009) 37.
- 11) J. S. Levy, M. A. Foster, A. L. Gaeta, and M. Lipson: *Opt. Express* **19** (2011) 11415.
- 12) A. Gondarenko, J. S. Levy, and M. Lipson: *Opt. Express* **17** (2009) 11366.
- 13) V. R. Almeida, R. R. Panepucci, and M. Lipson: *Opt. Lett.* **28** (2003) 1302.
- 14) C. Manolatou, M. Khan, S. Fan, P. R. Villeneuve, H. Haus, and J. Joannopoulos: *IEEE J. Quantum Electron.* **35** (1999) 1322.
- 15) W. Yoshiki and T. Tanabe: *J. Opt. Soc. Amer. B* **29** (2012) 3335.
- 16) B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus, J. Foresi, and J.-P. Laine: *J. Lightwave Tech.* **15** (1997) 998.
- 17) Y. Liu, T. Chang, and A. E. Craig: *Opt. Engineer.* **44** (2005) 84601.
- 18) A. Yariv: *IEEE Photon. Tech. Lett.* **14** (2002) 483.