

光配線集積回路の開発

—マイクロリング共振器型光スイッチのチップ内集積—

横山 新 (ナノデバイス・システム研究センター教授, 先端研半導体集積科学専攻),
 田主 裕一郎 (COE研究員), 和気 勝 (先端研量子物質科学専攻 M2),
 涌島 圭太 (工学部第2類 B4)

1. 研究目的

トランジスタの超微細化・高速化に伴い、LSIの性能は配線の信号伝達スピードが支配ようになってきた。そのため、金属配線に代わって無線や光配線を用いるLSIが注目されている。本21世紀COEプログラムでは光・無線複合インターコネクション技術の研究を行う。本研究では、光配線集積回路を開発することを目的とする。

2. これまでの研究成果概要

筆者は、これまで光配線集積回路の研究を行ってきた。これまでに、3次元光結合共有メモリの基本動作の確認、¹⁾ 光導波路を有する画像認識チップの試作と基本動作の確認、²⁾ 発光素子の高速剥離とLSIチップ上へのボンディング法の開発³⁾などの業績を挙げてきた。21世紀COEプログラム採択以降の研究成果は、1)高精度で光を分岐できる積層型分岐光導波路の設計・製作法の開発、⁴⁾ および2)屈折率が電界によって変化する電気光学材料を用いたリング共振器型光スイッチの提案⁵⁾である。本稿では、上記2)について述べる。

2-1 電気光学材料を用いたリング共振器型光スイッチの提案

筆者は、これまで化合物半導体発光素子をLSI上に多数貼りあわせ集積する方法を想定して技術開発を行ってきた。³⁾しかし、この方法は技術的に

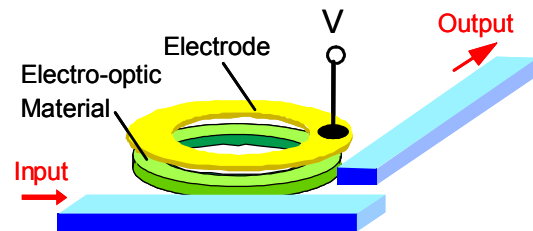


Fig. 2 Ring resonator switch using electro-optic material.

難しく生産性も低いと考えられる。そこで貼り合わせる発光素子は最小限に抑え、チップ上にモノシクに多数集積した光スイッチによって、分岐した光をON、OFFする方法を新しく提案する。その光配線LSIの概要をFig. 1に示す。LSI上に集積可能な超小型高速光スイッチの候補として、最近注目されているマイクロリング共振器⁶⁾を用いた光スイッチを研究中である。電界によって屈折率が変化するLiNbO₃や(Ba,Sr)TiO₃などの電気光学材料を用いてマイクロリング共振器をチューナブル化し、印加電圧によって共振周波数を変化させれば、数十ミクロン以下の大きさの光スイッチが実現できる(Fig. 2参照)。チューナブルリング共振器は現時点では横浜国大グループの開発した温度制御によるものしかない。⁷⁾しかし、温度制御方式で高速応答は望めない。これに対して本研究で用いる電気光学現象は、物質のイオン分極に基づいているので、原理的にテラヘルツの応答が期待できる。実際には、印加電極における浮遊容量と直列抵抗による時定数が応答速度を決めると考えられる。

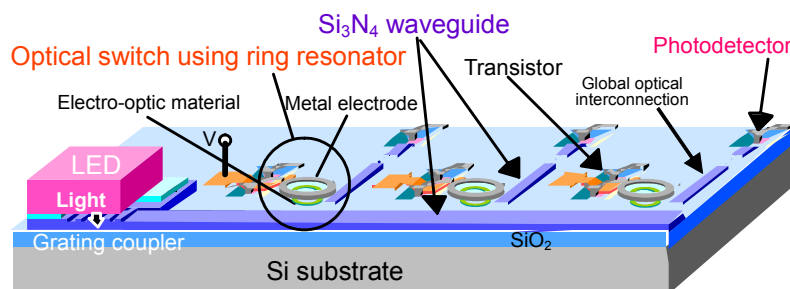


Fig. 1 Schematic of optically interconnected LSI proposed in this research program.

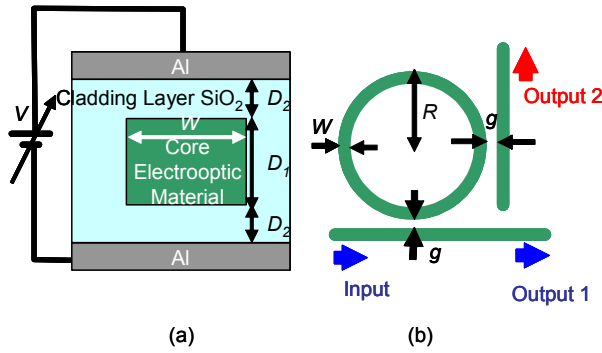


Fig. 3 (a) Cross section and (b) plan view of the ring resonator switch using electro-optic material.

Fig. 3 にリング共振器型光スイッチの断面および平面構造を示す。共振波長 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = n_{eff} \frac{2\pi R}{m} \quad (1)$$

ここに、 n_{eff} は等価屈折率、 R はリングの半径、 m は整数である。Fig. 4 は、Fig. 3 に示した断面構造を持つ、コア厚さ $0.5 \mu\text{m}$ の光導波路の伝播損失をシミュレートした結果である。シミュレーションには 2 次元 finite difference time-domain (FDTD) シミュレータ (Apollo Photonic Solutions Suite) を用いた。ここで、コアには屈折率 2.2 の、 LiNbO_3 膜を仮定した。導波路幅は $2 \mu\text{m}$ 、波長は 850nm である。この図より伝播損失 1dB/cm 以下の低損失を得ようとするならば、 SiO_2 クラッドの厚さは $0.25 \mu\text{m}$ 以上が必要である。このような厚い SiO_2 クラッドでは、動作電圧が大きくなる。動作電圧を下げるためには、クラッド膜厚を薄くしなければならないが、そのためにはコアを厚くすることが有効である。Fig. 5 は、 $0.1 \mu\text{m}$ のクラッドを用いた時の、伝播損失のコア膜厚依存性である。これより、 $3 \mu\text{m}$ 以上のコア膜厚を用いれば損失を 1dB/cm 以下に抑えられることが分かる。コアには屈折率、

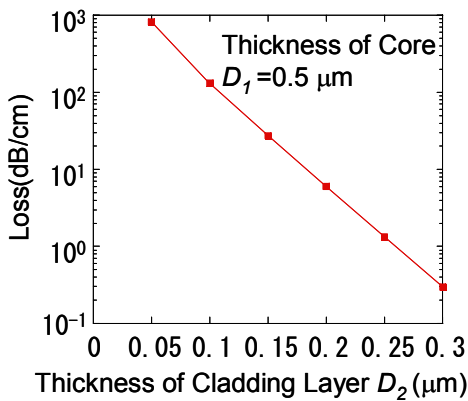


Fig. 4 Propagation loss versus thickness of cladding layer of the waveguide.

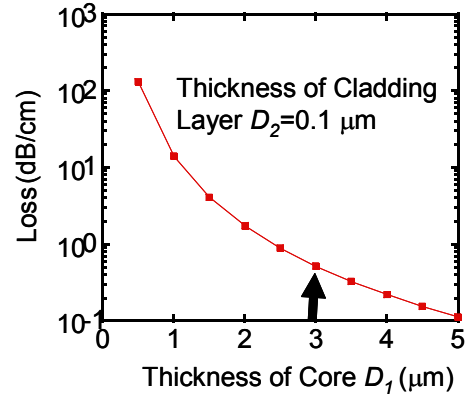


Fig. 5 Propagation loss versus thickness of core layer.

誘電率共に大きい材料が用いられるので、厚いコアは動作電圧の増大には、あまり寄与しない。Fig. 6 は、リング半径 $12 \mu\text{m}$ 、導波路幅 $2 \mu\text{m}$ 、コア厚さ $0.5 \mu\text{m}$ 、クラッド厚さ $0.1 \mu\text{m}$ のリング共振器の出力特性のシミュレーション結果である。共振器のギャップは $0.1 \mu\text{m}$ である。導波路コアには LiNbO_3 膜を仮定した。 $E=3.1 \times 10^4 \text{V/cm}$ の電界印加によって屈折率が 5×10^{-4} 変化すれば、波長 852.35nm において 5dB のスイッチングゲインが得られる。このときの Fig. 3 のリング共振器に印加する電圧は次式によって計算され、 13.5V となる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta n &= -\frac{1}{2} n^3 r E \\ V &= D_{core} E + 2D_{SiO_2} \frac{\epsilon_{core}}{\epsilon_{SiO_2}} E \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 n 、 Δn はコアの屈折率および屈折率変化、 r は電気光学係数、 D_{core} 、 D_{SiO_2} は、それぞれコアおよび SiO_2 クラッドの厚さ、 ϵ_{core} 、 ϵ_{SiO_2} はコアおよびクラ

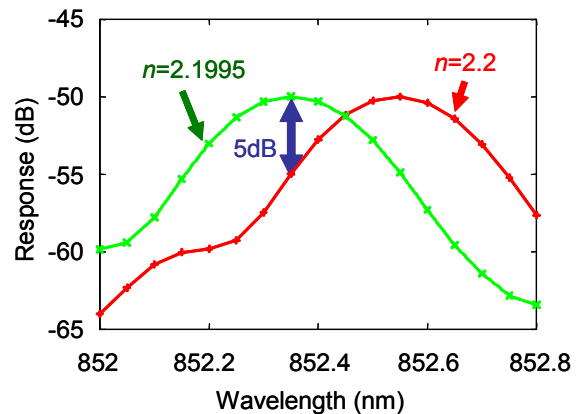


Fig. 6 Simulated response of output 2 in Fig. 3 for different refractive index of core layer.

Table 1 Operation voltage and frequency for ring resonator switches using various electro-optic materials.

	LiNbO ₃	(Ba,Sr)TiO ₃	K(Ta,Nb)O ₃
Electro-optic Coefficient (pm/V)	30.8	23	600
Refractive Index <i>n</i>	2.2	2.1	2.35
Electric Field <i>E</i> (10 ⁴ V/cm)	3.05	5	0.1284
Relative Dielectric Constant ϵ	28	300	28~300 (assumed)
Operation Voltage <i>V</i> (V)	13.5	91.9	0.57~2.36
Operation Frequency <i>f</i> (THz)	58	47	47~58

ットの誘電率である。Table 1 に種々の電気光学材料を用いた場合のスイッチング電圧および動作周波数の計算値を示す。動作周波数は、電圧印加電極の抵抗(Al: 0.8 μm 厚)と電極容量の積から計算される時定数の逆数として求めた。(Ba,Sr)TiO₃ はメモリ用高誘電体材料として LSI への集積実績のある材料であるが、誘電率が大きいので、動作電圧は約 92V と大きくなる。したがって共振器の急峻性(Q 値)を大きくする工夫が必要である。なお、(Ba,Sr)TiO₃ の電気光学定数は我々の実測値である。また、最近 NTT が開発した K(Ta, Nb)O₃⁸⁾を用いると数 V 以下の低動作電圧が期待できる。

2-2 リング共振器の試作・評価

リング共振器型光スイッチを作製するためには、まずリング光共振器の設計・製作技術および評価技術が必要である。そこで、プラズマ CVDSi 窒化膜をコアに持つリング光共振器を設計・試作しその特性測定技術を確立した。Fig. 7 に測定装置の概略を、Fig. 8 に測定した共振特性の例を示す。製作に

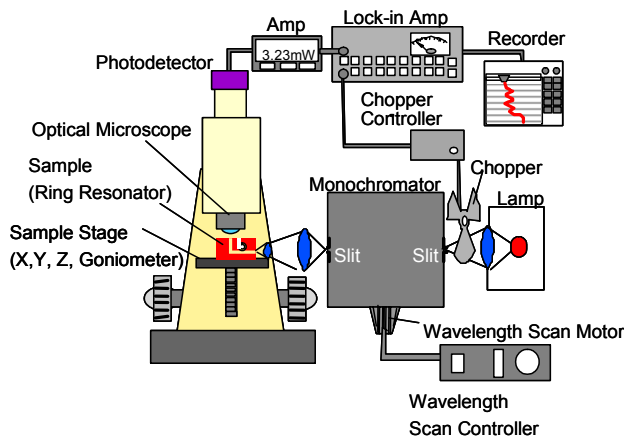


Fig. 7 Measurement system for optical ring resonators.

は電子ビームリソグラフィーと反応性イオンエッチングを用いた。リング半径は 10 μm、導波路幅は 3 μm、結合ギャップは 0.2 μm である。Output1 のディップと Output2 のピーク位置が良く対応しており、共振によって特定の波長の光が Output2 に導かれていることが分かる。また、Fig. 8 にはシミュレーションによる共振特性も図示したが、実験と共振位置が、良く一致している。

2-3 電気光学材料を用いた光導波路の試作

次に電気光学材料として(Ba,Sr)TiO₃ (BST) 膜をもちいた光導波路を試作し、その光伝播特性を測定した。BST 膜は、塗布法によって作製した。塗布液を所定の回転速度でスピンコートした後、550℃、5分のベーキングという工程を数回繰り返して所望の膜厚を得た。Fig. 9(a)に示すように Si 熱酸化膜に電子ビームリソグラフィーとプラズマエッチングにより

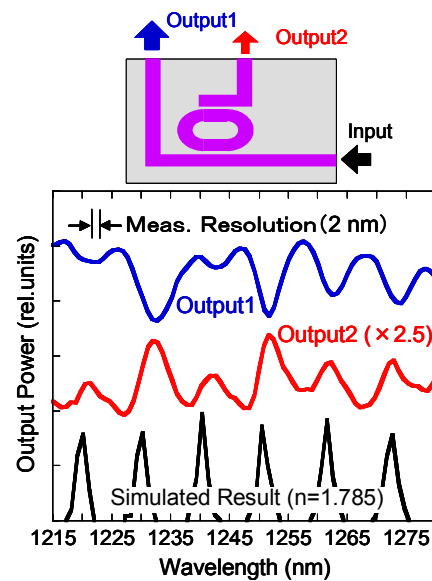


Fig. 8 Resonance characteristics of fabricated ring resonator with Si nitride core.

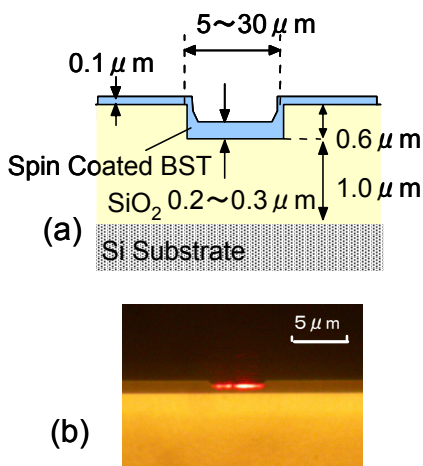


Fig. 9 (a) Cross section of fabricated trench type optical waveguide and (b) optical micrograph of the output light.

溝を形成した後、BST 膜を塗布法によって形成した。平坦化によって、溝の中では、溝の外に比べ膜が厚くなるので、光は溝内に閉じ込められる。出射光の様子 Fig. 9(b)に示す。He-Ne レーザの光(633nm)が溝内に閉じ込められていることが分かる。

Fig. 10は溝幅と伝播損失の関係を示す。溝幅が狭い場合には、塗布膜厚 d が厚い($d=0.3 \mu\text{m}$)方がロスが大きくなっている。この理由は、膜厚が厚い場合には、溝の外でも膜が厚いため導波モードが励起され、溝部分への光閉じ込めが弱くなるためと解釈される。

まとめ

電気光学材料を用いたリング共振器型光スイッチを提案し、その特性をシミュレーションした。その結果、種々の電気光学材料に対して動作電圧を推定した。また、Si 窒化膜をコアとする光リング共振器の設計・製作・測定技術を確立した。さらに、電気光学材料として、 $(\text{Ba,Sr})\text{TiO}_3$ 膜をコアとする光導波路を作製し、光伝播損失の測定を行った。

今後の計画

これまでの成果をもとに、電気光学材料を用いたリング共振器型光スイッチを試作、評価する。塗布膜のアニール温度を上げ、結晶性を向上させ、また、リングの構造を工夫して Q 値を上げ、動作電圧を低減させることが課題である。

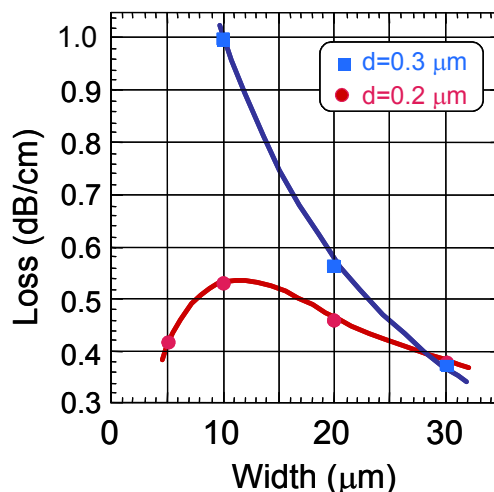


Fig. 10 Light propagation loss for the fabricated waveguide with electro-optic material core.

参考文献

- 1) K. Miyake *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **34**(1995)1246.
- 2) T. Doi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 1405.
- 3) Y. Sasaki *et al.*, J. Electrochem. Soc. **146**(1999)710.
- 4) Y. Hara *et al.*, Optical Review **10**(2003) 357.
- 5) Y. Tanushi *et al.*, Ext. Abst. (The 51st Spring Meeting 2004); The Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 29a-ZC-9 [in Japanese].
- 6) B. E. Little *et al.*, J. Lightwave Technol. **15** (1997) 998.
- 7) 國分泰雄: 応用物理 **72** (2003) 1364.
- 8) K. Fujiura *et al.*, NTT Tech. J. (2004)56.

これまでの研究発表、特許等

光配線関連
(ジャーナル論文)

- 1) Y. Hara, S. Yokoyama and K. Umeda, "Compact Branched Optical Waveguides Using High-Index-Contrast Stacked Structure," Optical Review **10**, No. 5, pp. 357-360 (2003).
(国際会議)
- 2) Y. Tanushi, M. Wake and S. Yokoyama, "Race-Track Optical Ring Resonators with Groove Coupling," submitted to Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2004).
- 3) Y. Tanushi, M. Wake, K. Wakushima, M. Suzuki and S. Yokoyama, "Technology for Ring Resonator Switches using Electro-Optic Materials," submitted to 1st Inter. Conf. On Group IV Photonics (2004).

微細化プロセス関連

(ジャーナル論文)

- 1) T. Yoshino *et al.*, "Influence of Organic Contaminant on Trap Generation in Thin SiO_2 of Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors": Jpn. J. Appl. Phys. **41**(2002)4750.
- 2) K. Kawamura *et al.*, "Coulomb blockade effects and conduction mechanism in extremely thin

- polycrystalline-silicon wires,” J. Appl. Phys. Lett. **91**(2002)5213.
- 3) 横山新 他"ウェハ保管環境の MOS デバイス特性への影響,"エアロゾル研究、**17**(2002)96.
 - 4) M. Kohno *et al.*, "Evaluation of Surface Contamination by Noncontact Capacitance Method under UV Irradiation," Jpn. J. Appl. Phys. **42**(2003)5837.
 - 5) M. Kohno *et al.*, "Investigation of Surface Contamination on Silicon Oxide after HF Etching by Noncontact Capacitance Method," Jpn. J. Appl. Phys. **42**(2003) 7601.
 - 6) Q.D.M. Khosru *et al.*, "Organic Contamination Dependence of Process Induced Interface Trap Generation in Ultrathin Oxide Metal Oxide Semiconductor Transistors," Jpn. J. Appl. Phys. **42**(2003)L1429.
 - 7) H. Setyawan *et al.*, "Particle Formation and Trapping Behavior in a TEOS/O₂ Plasma and Their Effects on Contamination of a Si Wafer," Aerosol Science and Technology **38**(2004)120.
 - 8) M. Ooka *et al.*, "Excellent Contact-Hole Etching with NH₃ Added C₅F₈ Pulse-Modulated Plasma," Jpn. J. Appl. Phys. **43**(2004) (in press).
- (国際会議)
- 9) M. Ooka *et al.*, "Ultrasml SiO₂ Hole Etching using PFC Alternative Gas with Small Global Greenhouse Effect," Digest of Pacific Rim Workshop on Transducers and Micro/Nano Technologies (MEMS2002) (2002) pp. 111-114.
 - 10) M. Kohno *et al.*, "Evaluation of Surface Contamination by Noncontact Capacitance Method under UV Irradiation," Extend. Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2002) (2002) pp. 724-725.
 - 11) M. Ooka *et al.*, "Excellent Contact-Hole Etching with NH₃ Added C₅F₈ Pulse-Modulated Plasma," Extend. Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2003) (2003) pp. 454-455.
 - 12) M. Suzuki and S. Yokoyama, "Anomalous Behavior of Interface Traps of Si MOS Capacitors Contaminated with Organic Molecules," submitted to Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2004).
 - 13) T. Kakite and S. Yokoyama, "Characterization of Porous Silicon Nitride Formed by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition," submitted to 206th Meeting of The Electrochemical Society (2004).