
電気光学材料を用いたリング共振器光スイッチ
の SiLSI 上へのモノリシック集積

(課題番号 17360166)

平成 17 年度～平成 19 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B))

研究成果報告書

平成 20 年 5 月

研究代表者 横山 新

(広島大学ナノデバイス・システム研究センター教授)

目 次

はしがき	1
研究組織	1
交付決定額（配分額）	1
研究発表	2
I. 本研究に直接関係する発表論文	2
(1) 学術雑誌論文	2
(2) 国際会議プロシーディング	2
(3) 国内会議発表	3
II. 本研究に間接的に関係する発表論文	3
(1) 学術雑誌論文	3
(2) 国際会議プロシーディング	3
(3) 国内会議発表	3
研究成果による産業財産権の出願・取得状況	4
第1章 本研究の背景と目的	5
1-1 背景	5
1-2 目的	5
<参考文献>	5
第2章 研究成果概要	5
第3章 研究成果説明	6
3-1 電気光学効果リング共振器光スイッチの特性シミュレーション	6
3-2 電気光学材料を用いたマッハツェンダー光スイッチ	7
3-3 シリコンリング共振器光スイッチ	8
<参考文献>	8
第4章 まとめ	9
謝 辞	9
論文別刷	11
学術雑誌	11
国際会議プロシーディング	77
国内会議発表	101

基盤研究 (B)
電気光学材料を用いたリング共振器光スイッチの
SiLSI 上へのモノリシック集積

<はしがき>

本研究の大きな目標は、LSI チップ上に、現在の金属配線を凌駕する高性能（高速・低消費電力・大容量）な配線を光配線によって実現することである。このために、本科学研究費補助金の交付を受けた研究では、光を変調する光スイッチとして電気光学材料を用いたリング共振器型光スイッチを SiLSI 上に集積する研究を行う。本研究の成果として、(1) 電気光学材料である (Ba, Sr)TiO₃ (BST) を用いたマツエンダー干渉計型光スイッチを、SiLSI の金属配線層の上層に集積可能な 450℃ という低温でモノリシックに形成する技術を初めて開発した。光変調率は最大で 10%、動作電圧は 200V と実用化には遠いが、今後デバイス構造と BST 薄膜の結晶性改良により特性改善が期待される。(2) 歪みを印加すると電気光学効果が発現する Si 結晶を用いて、リング共振器型光スイッチを作製し、電流注入型ではない低消費電力な電界印加動作を初めて実現した。光変調率は、200V で 33% を得た。光変調のメカニズムは、電気光学効果ではなく、電界印加による Si 表面のキャリア濃度変化に基づく屈折率変調によるものであることが分かった。電気光学効果の発現しない理由が、歪みが不十分であることが分かった。構造改良、歪み増大の工夫により特性向上が今後期待される。

研 究 組 織

研究代表者 : 横山 新 (広島大学ナノデバイス・システム研究センター教授、
現在ナノデバイス・バイオ融合科学研究所教授)

研究協力者 : 徐 智謀 (Xu Zhimou)
(同上 研究員、現在中華人民共和国武漢大学助教授)

鈴木 昌人 (同上研究員、現在関西大学システム理工学部
助教)

田主 裕一郎 (同上研究員、現在東北大学大学院工学研究科
助教)

雨宮 嘉照 (同上研究員)

涌島 圭太 (広島大学大学院先端物質科学研究科半導体集積
科学専攻学生、現在エルピーダメモリ(株))

永田 和真 (同上学生、現在(株)デンソー)

徳永 智大 (同上学生、現在(株)中国放送)

西田 瑞恵 (広島大学工学部第二類学生、現在同上学生)

交付決定額 (配分額)

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 17 年度	6,500,000	0	6,500,000
平成 18 年度	3,200,000	0	3,200,000
平成 19 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	11,700,000	600,000	12,300,000

I. 本研究に直接関係する発表論文（論文別刷添付）

(1) 学術雑誌論文

1. Zhimou Xu, M. Suzuki, and S. Yokoyama, "Structure and Optical Band-Gap Energies of $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ Thin Films Fabricated by RF Magnetron Plasma Sputtering," *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, No. 12, pp.8507-8511 (2005).
2. Y. Tanushi and S. Yokoyama, "Design and Simulation of Ring Resonator Switches using Electro-Optic Materials," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, No. 4B, pp. 3493-3497 (2006).
3. M. Suzuki, Zhimou Xu, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Structural and Optical Properties of Electro-Optic Material: Sputtered (Ba,Sr)TiO₃," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, No. 4B, pp. 3488-3492 (2006).
4. Zhimou Xu, M. Suzuki, Y. Tanushi, K. Wakushima, and S. Yokoyama, "Groove-Buried Optical Waveguides Based on Metal Organic Solution-Derived $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ Thin Films," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, No. 4B, pp. 3482-3487 (2006).
5. T. Tabei, K. Maeda, S. Yokoyama, and H. Sunami, "Fabrication of Spin-Coated Optical Waveguides for Optically Interconnected LSI and Influence of Fabrication Process on Underlying Metal-Oxide-Semiconductor Capacitors," *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, No. 4B, pp. 3498-3503 (2006).
6. Zhimou Xu, M. Suzuki, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Monolithically integrated optical modulator based on polycrystalline $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ thin films," *Appl. Phys. Lett.* **88**, No. 16, 161107 (2006).
7. Zhimou Xu, Y. Tanushi, M. Suzuki, K. Wakushima, and S. Yokoyama, "Optical properties of amorphous $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ thin films obtained by metal organic decomposition technique," *Thin Solid Films* **515**, pp. 2326-2331 (2006).
8. M. Suzuki, K. Nagata, Y. Tanushi and S. Yokoyama, "Transient Response in Monolithic Mach-Zehnder Optical Modulator using (Ba,Sr)TiO₃ Film Sputtered at Low Temperature on Silicon," *Jpn. J. App. Phys.* **46**, No. 4B, pp. 2462-2466 (2007).
9. Y. Tanushi and S. Yokoyama, "Compact Multi-Mode Optical Ring Resonators for Interconnection on Si Chips," *Jpn. J. App. Phys.* **46**, No. 4B, pp. 2364-2368 (2007).
10. 横山新, "LSIにおける光配線技術," *応用物理* 第76巻, 第11号, pp. 1238-1245 (2007).
11. M. Suzuki, K. Nagata, and S. Yokoyama, "Imprint Property of Optical Mach-Zehnder Interferometer Using Sputter-Deposited (Ba,Sr)TiO₃ at 450°C," *Jpn. J. App. Phys.* **47**, No. 4, pp. 2897-2901 (2008).
12. Y. Amemiya, Y. Tanushi, T. Tokunaga, and S. Yokoyama, "Photoelastic Effect in Silicon Ring Resonator," *Jpn. J. App. Phys.* **47**, No. 4, pp. 2910-2914 (2008).

(2) 国際会議プロシーディング

13. Y. Tanushi and S. Yokoyama, "Design and Simulation of Ring Resonator Switches using Electro-Optic Materials," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2005)* (2005) pp. 318-319.
14. M. Suzuki, Zhimou Xu, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Structural and Optical Properties of Electro-Optic Material: Sputtered (Ba,Sr)TiO₃," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2005)* (2005) pp. 732-733.
15. Zhimou Xu, M. Suzuki, Y. Tanushi, K. Wakushima, and S. Yokoyama, "Groove-Buried Optical Waveguides Based on Metal Organic Solution-Derived $Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO_3$ Thin Films," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2005)* (2005) pp. 738-739.
16. T. Tabei, K. Maeda, S. Yokoyama, and H. Sunami, "Fabrication of spin-coat optical waveguides for optically interconnected LSI and influence of fabrication process on lower layer MOS capacitors," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2005)* (2005) pp. 332-333.
17. S. Yokoyama and T. Kakite, "Novel Fabrication Technique of Optical Waveguides using Low Density Silicon Nitride Films Deposited by Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2005)* (2005) pp. 736-737.
18. Y. Tanushi and S. Yokoyama, "High-Speed and Low-Voltage Ring Resonator Optical Switches Using Electro- and Magneto-Optic Materials," presented at 2nd International Conference on Group IV Photonics (Antwerp, Belgium, Sept. 21-23, 2005) pp. 165 -167.
19. M. Suzuki, K. Nagata, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Low Temperature Fabrication of Monolithic Mach-Zehnder Optical Modulator on Silicon using Sputtered (Ba,Sr)TiO₃ and Mechanism of Transient Response," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2006)* (2006) pp. 48-49.
20. Y. Tanushi and S. Yokoyama, "Compact Multi-Mode Optical Ring Resonators for Interconnection on Si Chips," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2006)* (2006) pp. 44-45.
21. M. Suzuki, K. Nagata, and S. Yokoyama, "Imprint Property of Optical Mach-Zehnder Interferometer Using Sputter Deposited (Ba,Sr)TiO₃ at Low Temperature," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2007)* (2007) pp. 116-117.
22. Y. Amemiya, Y. Tanushi, M. Suzuki, K. Wakushima, and S. Yokoyama, "Photoelastic Effect in Silicon Ring Resonator," *Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2007)* (2007) pp. 282-283.
23. Y. Amemiya, Y. Tanushi, T. Tokunaga, and S. Yokoyama, "Electric Field Drive Silicon Optical Modulator by Carrier Concentration," submitted to International Conference on Photonics in Switching, July, 2008, Hokkaido, Japan (2008).

(3) 国内会議発表

24. 鈴木昌人, Xu Zhimou, 涌島圭太, 田主裕一朗, 横山新, “スパッタ (Ba, Sr)TiO₃ 電気光学材料を用いた光導波路の特性評価,” 2005 年秋期第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 徳島大学, 2005 年 9 月, 9a-T-31 (予稿集 p. 1050).
25. Zhimou Xu, M. Suzuki, Y. Tanushi, K. Wakushima, and S. Yokoyama, “A study of optical waveguides based on metal organic solution-derived Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃ thin films,” 2005 年秋期第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島, 徳島大学, 2005 年 9 月, 9a-T-32 (予稿集 p. 1051).
26. 涌島圭太, 田主裕一朗, 横山新, “積層リング共振器型シリコン光スイッチの製作と評価,” 2006 年春期第 53 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 武蔵工業大学, 2006 年 3 月, 25p-W-4 (予稿集 p. 1253).
27. 鈴木昌人, 永田和真, Xu Zhimou, 田主裕一朗, 横山新, “スパッタ (Ba, Sr)TiO₃ 電気光学材料を用いたマッハツェンダ型光スイッチ,” 2006 年春期第 53 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 武蔵工業大学, 2006 年 3 月, 25p-Y-9 (予稿集 p. 1264).
28. Zhimou Xu, M. Suzuki, Y. Tanushi, K. Wakushima, and S. Yokoyama, “Monolithically integrated optical modulator based on Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃ thin films,” 2006 年春期第 53 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 武蔵工業大学, 2006 年 3 月, 25p-Y-10 (予稿集 p. 1264).
29. 田主裕一朗, 横山新, “チップ内光インターコネクションのための小型マルチモードリング共振器,” 2006 年秋期第 67 回応用物理学会学術講演会, 滋賀, 立命館大学, 2006 年 8 月, 29p-ZX-9 (予稿集 p. 1073).
30. 鈴木昌人, 永田和真, 田主裕一朗, 横山新, “低温 (450°C) 堆積 (Ba, Sr)TiO₃ を用いた電気光学材料を用いたマッハツェンダ光スイッチのモノリシック集積,” 2006 年秋期第 67 回応用物理学会学術講演会, 滋賀, 立命館大学, 2006 年 8 月, 31a-ZX-2 (予稿集 p. 1086).
31. 永田和真, 鈴木昌人, 横山新, “電気光学材料 (Ba, Sr)TiO₃ 導波路の赤外光における伝搬損失,” 2007 年秋期第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道, 北海道工業大学, 2007 年 9 月, 5a-P5-1 (予稿集 p. 1200).
32. 鈴木昌人, 永田和真, 横山新, “低温 (450°C) スパッタ (Ba, Sr)TiO₃ を用いたマッハツェンダ型光スイッチのインプリント特性,” 2007 年秋期第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道, 北海道工業大学, 2007 年 9 月, 5a-P5-2 (予稿集 p. 1200).
33. 雨宮嘉照, 田主裕一朗, 徳永智大, 横山新, “シリコンリング共振器における光弾性効果,” 2007 年秋期第 68 回応用物理学会学術講演会, 北海道, 北海道工業大学, 2007 年 9 月, 4a-P1-14 (予稿集 p. 1183).
34. 徳永智大, 田主裕一朗, 雨宮嘉照, 横山新, “シリコンリング共振器を用いた電界駆動光変調素子,” 電子情報通信学会研究会, 東京, 機械振興会館, 2007 年 12 月, 信学技報 OPE2007-143, p. 41.
35. 永田和真, 西田瑞恵, 鈴木昌人, 横山新, “電気光学材料 (Ba, Sr)TiO₃ 薄膜の低温結晶化,” 2008 年春期第 55 回応用物理学関係連合講演会, 千葉, 日本大学, 2008 年 3 月, 28a-ZG-2 (予稿集 p. 1221).
36. 徳永智大, 雨宮嘉照, 田主裕一朗, 横山新, “シリコンリング共振器を用いた電界駆動光変調素子,” 2008 年春期第 55 回応用物理学関係連合講演会, 千葉, 日本大学, 2008 年 3 月, 29p-ZG-19 (予稿集 p. 1241).

II. 本研究に間接的に関係する発表論文 (論文別刷非添付)

(光配線 LSI 全般に関する論文)

(1) 学術雑誌論文

1. H. Taura, Y. Shishido, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, “Magneto-Optic Effect in Amorphous Bi₃Fe₅O₁₂ Waveguide Sputtered at Room Temperature,” Jpn. J. App. Phys. **47**, No. 4, pp. 2915-2920 (2008).

(2) 国際会議プロシーディング

2. H. Taura, Y. Shishido, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, “Magneto-optic Effect in Amorphous Bi₃Fe₅O₁₂ Waveguide Sputtered at Room Temperature,” Abst. Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2007) (2007) pp. 284-285.
3. S. Yamatogi, Y. Amemiya, and S. Yokoyama, “Si Ring Optical Resonators for Integrated On-Chip Biosensing,” submitted to Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2008).
4. K. Kuriyama, K. Terao, and S. Yokoyama, “Characterization of Ge photodetectors fabricated on vicinal Si substrate,” submitted to Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2008) (2008).

(3) 国内会議発表

5. 北浦誠之, 池田弥央, 宮崎誠一, 横山新, “Si ドットフォトディテクタの作製と評価,” 2006 年春期第 53 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 武蔵工業大学, 2006 年 3 月, 26a-D-5 (予稿集 p. 1232).
6. 宍戸陽平, 田主裕一朗, 徳永智大, 横山新, “リング共振器型光スイッチのための磁気光学材料 (Bi₃Fe₅O₁₂) 光導波路の作製,” 2006 年春期第 53 回応用物理学関係連合講演会, 東京, 武蔵工業大学, 2006 年 3 月, 26a-Y-11 (予稿集 p. 1269).
7. 宍戸陽平, 田主裕一朗, 徳永智大, 横山新, “スパッタ磁気光学材料 (Bi₃Fe₅O₁₂) 光導波路における磁気光学効果,” 2007 年春期第 54 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川, 青山学院大学, 2007 年 3 月, 28a-ZS-1 (予稿集 p. 1249).

8. 栗山敬悟, 寺尾慶, 横山新, “Si 基板上に形成した Ge フォトディテクタの基板 OFF 方位依存性,” 2008 年春期第 55 会応用物理学関係連合講演会, 千葉, 日本大学, 2008 年 3 月, 28a-ZQ-4 (予稿集 p. 1200).
9. 田浦 寛, 鬼丸孝博, 横山 新, “スパッタアモルファス $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ 膜の磁化特性と磁気光学効果,” 2008 年春期第 55 会応用物理学関係連合講演会, 千葉, 日本大学, 2008 年 3 月, 28p-ZG-15 (予稿集 p. 1229).
10. 山磨伸哉, 雨宮嘉照, 徳永智大, 横山 新, “バイオセンシングへの応用を目指したシリコンリング光共振器,” 2008 年春期第 55 会応用物理学関係連合講演会, 千葉, 日本大学, 2008 年 3 月, 29a-R-10 (予稿集 p. 1368).
11. 雨宮嘉照, 重本広貴, 横山 新, “Si リッチ窒化膜/Si リッチ酸化膜多層 Si ドット構造による発光効率の改善,” 2008 年春期第 55 会応用物理学関係連合講演会, 千葉, 日本大学, 2008 年 3 月, 29p-ZD-14 (予稿集 p. 1519).

研究成果による産業財産権の出願・取得状況

1. 特許出願番号:2008-045785, 発明の名称:光集積回路装置, 発明人:横山 新, 出願人:広島大学長, 出願日:2008年2月27日.

第1章 本研究の背景と目的

1-1 背景

トランジスタの微細化・高速化に伴い、LSIの処理性能は金属配線の信号伝達スピードが支配するようになってきた。処理速度のさらなる向上のために、LSI内長距離配線に光配線を用いる方法が注目されている。光配線の方式として、化合物半導体発光素子をLSI上に貼り合わせる方法が従来より研究されているが、この方法は生産性が低く集積度の向上もあまり期待できない。代わりに外部から導入した光（またはチップに集積または貼り付けた単一光源）を、モノリシックに集積した光スイッチによってON、OFFする方法が実用的と考えられる。特に、発光・光変調素子等にシリコンを用いる「シリコンフォトニクス」の研究が活発化している[1]。Si光変調器、Siレーザ、Siフォトニック結晶、SiGeフォトディテクタなどの研究成果が続々とNature誌に発表されている[2-5]。

光配線は、光/電気変換遅延を考慮すると長距離配線ほど金属配線に比べ高速になることから、我々は、チップ内の長距離信号ラインに光配線を用いる研究を1992年に開始した。1995年に光配線コホーネンネットと呼ばれる超並列画像認識チップの基本動作に成功している[6]。

1-2 目的

しかし、これまで製作してきた光結合・光配線チップでは、発光素子を貼り合わせによって集積化しており[7]、大量生産には不向きである。そこで、より実用的な方法として図1に示すように、光スイッチをモノリシックに集積し、入力光には外部光または少数の搭載発光素子を用いる方法を提案した[8]。光スイッチとしては、(1)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、(2)屈折率が磁界によって変化する磁気光学効果リング共振器、および(3)Siリング共振器について研究してきた。本科研費による研究では、(1)電気光学材料である(Ba,Sr)TiO₃（略称BST）を用いた光変調器、及び歪みを印加する

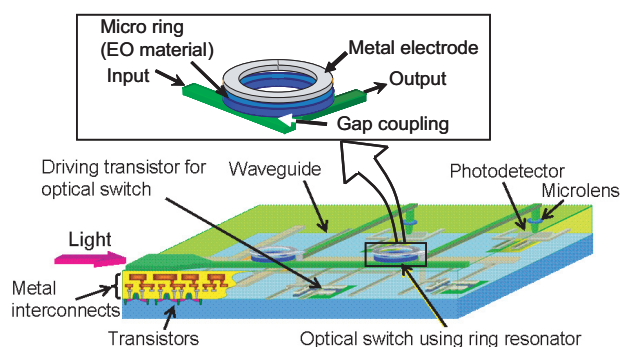


図1 本研究の目標とする光配線LSIの構造。

と電気光学材料になるSiを用いた(3)Siリング共振器光変調器の実現を目的とする。次章以降では、これらに関する主な研究成果を紹介する。

<参考文献>

- [1] L. Pavesi and D. J. Lockwood ed, Topics in Applied Physics, **94**: Silicon Photonics, Springer, 2003.
- [2] A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu and M. Paniccia, "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor," Nature, **427**, pp. 615-618, 2004.
- [3] H. Rong, R. Jones, A. Liu, O. Cohen, D. Hak, A. Fang and M. Paniccia, "A continuous-wave Raman silicon laser," Nature, **433**, pp. 725-728, 2005.
- [4] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," Nature, **435**, pp. 325-327, 2005.
- [5] R. S. Jacobsen, K. N. Andersen, P. I. Borel, J. F. Pedersen, L. H. Frandsen, O. Hansen, M. Kristensen, A. V. Lavrinenko, G. Moulin, H. Ou, C. Peucheret, B. Zsigri and A. Bjarklev, "Strained silicon as a new electro-optic material," Nature, **441**, pp. 199-202, 2006.
- [6] T. Doi, T. Namba, A. Uehara, M. Nagata, S. Miyazaki, K. Shibahara, S. Yokoyama, A. Iwata, T. Ae, and M. Hirose, "Optically Interconnected Kohonen Net for Pattern Recognition," Ext. Abst. of Int. Conf. Solid State Devices and Materials, pp. 1075-1076, 1995.
- [7] Y. Sasaki, J. Maeda, T. Koishi, K. Hashimoto, K. Shibahara, S. Yokoyama, S. Miyazaki and M. Hirose, "High-Speed GaAs Epitaxial Lift-Off and Bonding with High Alignment Accuracy Using a Sapphire Plate," J. Electrochem. Soc. **146**, pp.710-712, 1999.
- [8] M. Suzuki, Z. M. Xu, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Structural and Optical Properties of Electro-Optic Material: Sputtered (Ba,Sr)TiO₃," Jpn. J. Appl. Phys., **45**, pp. 3488-3492, 2006.

第2章 研究成果概要

本研究の主要成果概要を、以下に箇条書きで示す。引用文献は、本報告書1-2頁の、本研究に直接関係する発表論文番号である。

1. 電気光学材料を用いたリング共振器型光スイッチの、動作速度、動作電圧をシミュレーションした[2, 13, 18].
2. 電気光学材料である(Ba,Sr)TiO₃ (BST)を用いて、リング共振器型の前段階として、マッハツェンダー干渉計型光変調器を、SiLSIの金属配線層の上層に集積可能な450°Cという低温でモノリシックに形成する技術を初めて開発した[1, 3, 4, 6-8].
3. その光変調率は、最大で10%、動作電圧は200Vと実用化には遠いが、今後デバイス構造とBST薄膜の結晶性改良により特性改善が期待される[8, 19].
4. BSTマッハツェンダー光変調器において、その変調特性が電圧印加履歴に依存する履歴現

象（インプリント特性と呼ぶ）が観測された。その原因として、BST膜の強誘電性が指摘された [11, 19, 20]。

5. 歪みを印加すると電気光学効果が発現する Si 結晶を用いて、リング共振器型光スイッチを作製し、電流注入型ではなく、リング共振器で初めて電界印加動作を実現した [9, 12, 23, 34]。
6. 光変調率は、200V で 33% を得た。光変調のメカニズムは、電気光学効果ではなく、電界印加による Si 表面のキャリア濃度変化に基づく屈折率変調によるものであることが分かった。電気光学効果の発現しない理由は、歪みが不十分であることが分かった。構造改良、歪み増大により今後特性向上が期待される [23, 34]。

第 3 章 研究成果説明

本章では、主な成果について説明する。詳細については、添付の論文別刷りを参照されたい。

3-1 電気光学効果リング共振器光スイッチの特性シミュレーション

図 1 の拡大図にリング共振器光スイッチの構造を示す。リング周長が波長の整数倍の時、光はリング内で共振し出力は大きく、共振しない時は小さい。すなわち、共振条件は次式で与えられる。

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

ここで、 λ は共振波長、 R はリング半径、 n_{eff} はリングコア材料の実効屈折率、 m は共振の次数を表す整数である。ここで、リングに電気光学材料を用い、電界によってリングの屈折率を変化させれば共振波長が変化し、光スイッチ動作が得られる。

まず、この光スイッチの動作電圧について考察する [1]。動作電圧はデバイス構造に強く

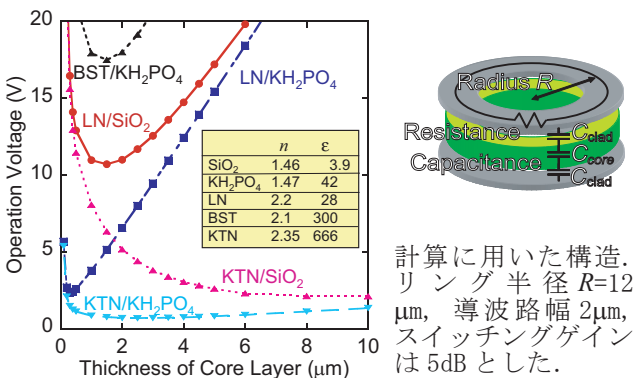


図 2 リング共振器光スイッチの動作電圧とコア膜厚の関係。各種コア/クラッド材料の組み合わせに対してプロットした。

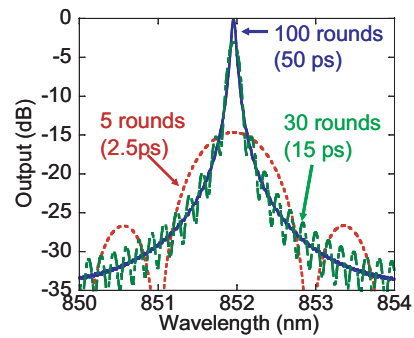


図 3 光周回数とリング共振器の共振特性の関係。入/出力導波路とリングとの結合係数は 0.2、光伝播損失は無視した。

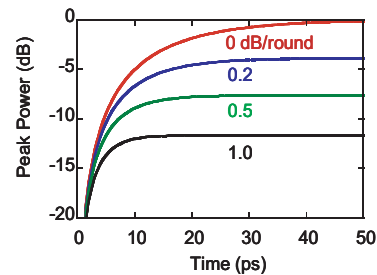


図 4 リング共振器の出力光強度の時間依存性。曲げ損失が大きいほど早く飽和するが、出力光強度は小さく、共振特性はブロードになる。

依存する。電気光学材料として LiNbO₃(LN)、(Ba, Sr)TiO₃(BST) および K(Ta, Nb)O₃(KTN) を用いた場合の動作電圧を計算した (図 2)。図 2 の右上に計算に用いたリング共振器の構造を示す。コアとクラッドの積層構造に垂直に電界を印加した場合の動作電圧は次式で与えられる。

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

ここで、 Δn は電界 E を印加することによってスイッチングするために必要な屈折率変化量、 r は電気光学材料の電気光学係数、 D_{core} 、 ϵ_{core} および D_{clad} 、 ϵ_{clad} はそれぞれコアおよびクラッドの膜厚および誘電率である。

クラッドの膜厚はリングの光伝播損失が 0.1 dB/

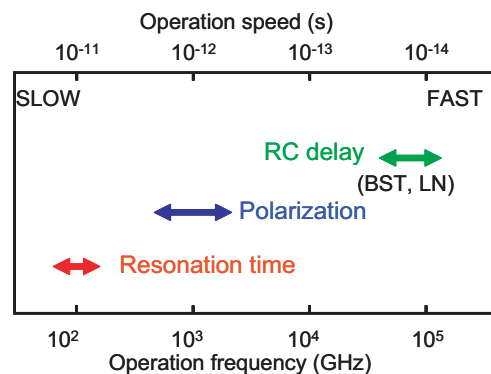


図 5 リング共振器光スイッチの動作速度決定要因。共振時間が主要因である。

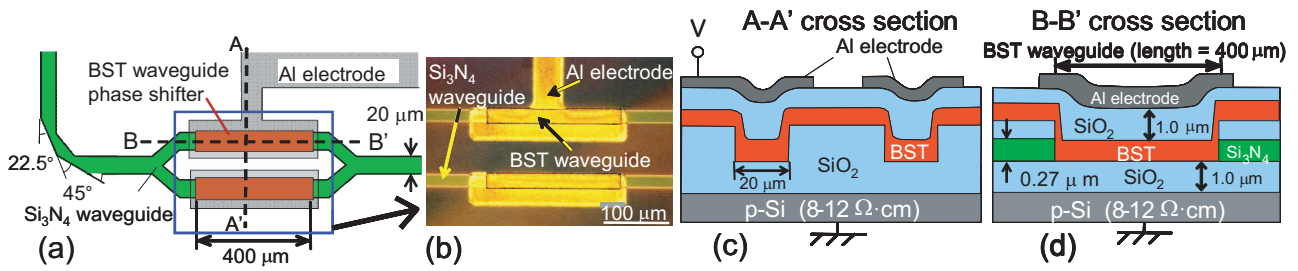


図6 (a) スパッタ (Ba, Sr)TiO₃(BST) とシリコン窒化膜を併用したハイブリッドマッハツェンダー光スイッチの平面構造, (b) 試作試料の平面光学顕微鏡写真, (c) A-A' 断面構造, (d) B-B' 断面構造. BST 膜は RF スパッタによって 450°C で形成した.

cm 以下となる値とし、電界 E は 852 nm の波長においてスイッチングゲインが 5 dB となるように選んだ。リング半径および導波路幅は、それぞれ 12 μm および 2 μm である。図に示すように動作電圧が最小となるコア膜厚が存在し、BST と KH₂PO₄ の組み合わせでは、最小動作電圧は 17.5 V、KTN/KH₂PO₄ では、0.7 V と実用的な値となる。また、次節の図 6(b) に示すようにリッジ型（尾根状）の導波路構造にし、横方向から電極を接続し電極間隔を狭めれば、さらに動作電圧を低減できる可能性がある。

次に、光スイッチの動作速度について考察する [1]。図 3 は共振特性とリング内での光の周回数との関係を示す。周回数が増すにつれて干渉によって共振ピークは鋭くなり、ピーク波長での出力光強度は増大する。その様子を時間経過と共に示したのが図 4 である。図 3 より 30 回程度の周回数から出力が立ち上がることが分かる。リング直径が 24 μm の場合、その時間はおよそ 15 ps である。共振ピークの立ち上がり特性は、リングと入・出力導波路との結合率とリング内での光伝搬損失に依存する（図 4）。スイッチング速度を決める他の要因として、電気光学材料のイオン分極時間と駆動電極部分の RC 時定数があるが、図 5 に示すように主要因は共振時間であり、リング直径が 24 μm の場合 66 GHz 以上での動作が期待できる。この値は Si 光スイッチ [2] より約 1 桁高速である。

3-2 電気光学材料を用いたマッハツェンダー光スイッチ

リング共振器光スイッチの製作に先立ち、製作の容易なマッハツェンダー光スイッチを試作した。マッハツェンダー光スイッチは、図 6(a) に示すように入力光を 2 つに分岐させ、位相差を与えた後に再び合波させることによって出力光強度を変化させるものである。電気光学材料として、DRAM のキャパシタ用高誘電率材料として研究段階で Si プロセスに導入実績のある (Ba, Sr)TiO₃ (BST) を用いた [3]。最初、BST は塗布法によって形成し、550°C でアニールした。その結果 90V の電圧印加によって光出力を約 2% 変化させるこ

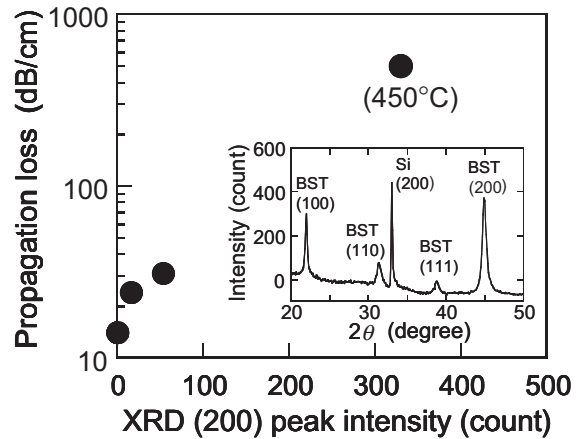


図 7 BST 光導波路の伝播損失と結晶性の関係. 挿入図は 450°C の RF スパッタによって形成した BST 膜の X 線回折スペクトル. 横軸は BST 膜の (200) X 線回折強度. 結晶性の向上と共に光伝播損失は増大する.

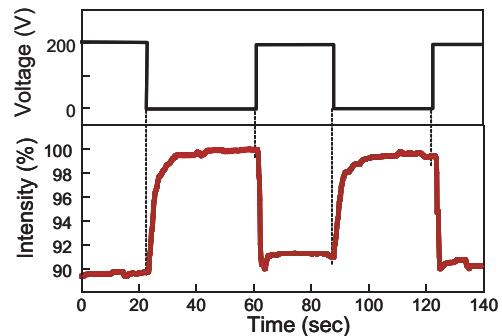


図 8 450°C で形成した BST マッハツェンダー光スイッチの光変調特性. 450°C という温度は金属配線層の上層に適用可能なプロセス温度である.

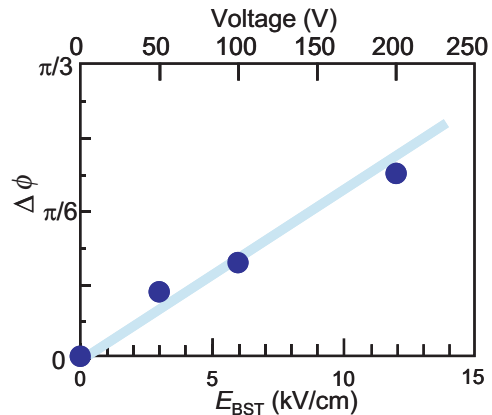


図 9 位相シフト量 $\Delta\phi$ と電界強度 E_{BST} の関係. 直線関係は電気光学効果による光変調であることを示唆している.

とができた. この成果は Appl. Phys. Lett. に掲載された [4]. 図 1 に示すように金属配線層の上層に光スイッチを集積化するためには, プロセス温度は 450°C 以下が必要である [5]. そこで次に, RF マグネトロンスパッタ法によって作製した BST 膜を用いて図 6 に示す構造のマッハツェンダー光スイッチを作製した. 製作した光スイッチの断面構造を図 6(c), (d) に示す. 電極は最上層に形成され, 電界は垂直方向に印加される. スパッタ法を用いると, 結晶性の良い膜が比較的低温で得られるが, 結晶性の向上と共に光伝播損失が増加することが分かった. その様子を図 7 に示す. 光伝播損失の原因は, 多結晶 BST 膜のグレイン境界で光が散乱されるためと推測される. 450°C で作製した BST 膜は光伝播損失が 470 dB/cm と大きいので, 光伝播損失の小さい Si 窒化膜光導波路の一部に BST 導波路を埋め込んだハイブリッド型導波路を作製した (図 6(d)) [6]. 光変調測定結果を図 8 に示す. 印加電圧 200V (電界強度 1.2×10^4 V/cm) において, 最大光変調率 10% を達成した [6, 7]. この光変調が, マッハツェンダー光モジュレータの 2 つのアーム (長さ $l = 400 \mu\text{m}$) の位相差 $\Delta\phi$ に基づくものとする,

$$\Delta\phi = \cos^{-1} \left(\frac{2I}{I_0} - 1 \right). \quad (3)$$

ここで, I は出力光強度, I_0 は出力光強度の最大値である. また, 位相差 $\Delta\phi$ が電気光学効果に基づくものとする,

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta n l}{\lambda} = 2\pi \frac{(1/2)n_{\text{eff}}^3 r E l}{\lambda}. \quad (4)$$

ここで, Δn は (2) 式で示した屈折率変化である. (4) 式より, $\Delta\phi$ と電界 E は直線関係になる. 図 9 は (3) 式を用いて算出した $\Delta\phi$ を BST 膜内電界 E_{BST} に対してプロットしたものである. 良い直線関係にあることから, 出力光強度の変化は電気光学効果に基づく位相変調によるものであると考えられる. 直線の傾きより, 電気光学定数 $r = 25.2$ pm/V が得られる. この値は LiNbO_3 のものと同等である. 今回作製したデバイスは, 誘電率の小さい SiO_2 を介して BST に電圧を印加する構造のため, 動作電圧は 200V と大きい, 前節で述べたリッジ型導波路構造を用い横方向から電極接続する方式を取り, 導波路幅を $2 \mu\text{m}$ と狭めれば, 動作電圧は数 V まで低減できる. また, 図 8 より応答時間が 1 ~ 6 秒と遅いことが分かる. この原因は, BST 膜の組成が化学量論的組成になっておらず, 過剰なイオンが膜中に存在するためと推測される [6, 7]. 今後組成を最適化することによって改善されると思われる.

インプリント効果については, 添付論文を参照されたい [8].

3-3 シリコンリング共振器光スイッチ

コーネル大学の Xu らは平面型 Si リング共振器を用いて 1.5Gb/s で動作する光スイッチを実現した [9]. このデバイスは, pn 接合を用いて電流によってキャリア注入し屈折率を変化させ共振周波数をシフトさせているため, 消費電力の点で問題があると思われる. 一方, デンマーク工科大学の Jacobsen らは, 歪シリコンが電気光学効果を持つことを利用して, マッハツェンダー干渉計型の光スイッチを動作させた [10]. マッハツェンダー型の欠点は, サイズがリング型に比べて大きいことである. 我々は, 両者の長を組み合わせて, リング型歪シリコン光スイッチを SOI 基板を用いて作製した [11]. その構造を図 10 に, 図 11 に走査電子顕微鏡写真を示す. 図 12 は, 波長をリング共振器の共振波長である 1501.6 nm に固

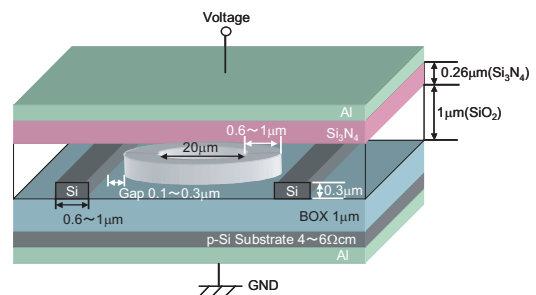


図 10 歪 Si リング共振器光スイッチの構造. 歪は最上層の Si 窒化膜によって誘起される.

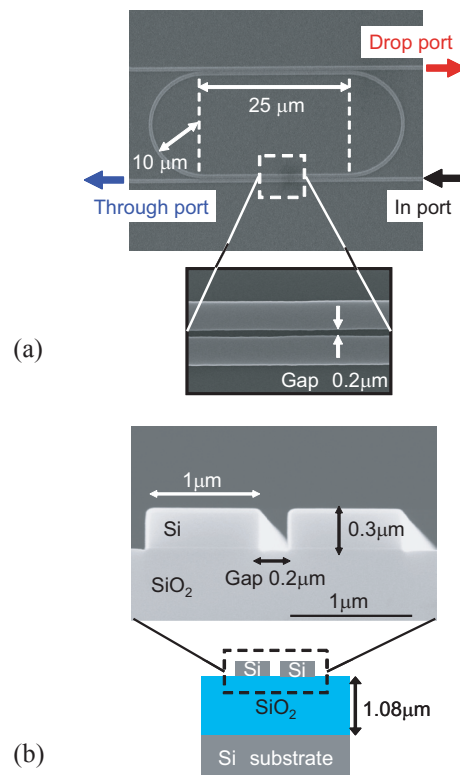


図 11 作製したリング共振器の (a) 平面, 及び (b) 断面走査電子顕微鏡写真と模式図.

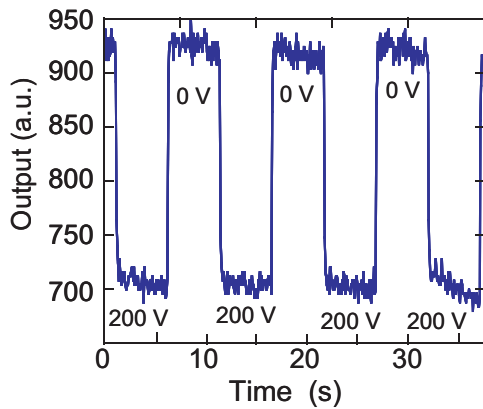


図 12 歪 Si リング共振器光スイッチのスイッチング特性の例. 光変調率は 33% である.

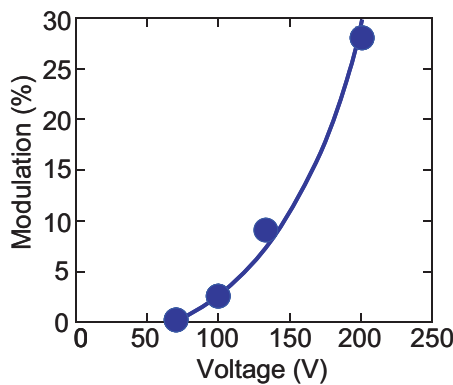


図 13 歪 Si リング共振器光スイッチの光変調率の印加電圧依存性.

定し、電圧 200 V を印加した時の光変調特性の例である。迷光を差し引いて光変調率を計算すると 33% という値が得られる。図 13 は光変調率の印加電圧依存性である。電圧に対して非線形に変化する。解析の結果、この光変調は、電気光学効果ではなく、Si 表面における電界誘起キャリア濃度変化による屈折率変調によるものであることが分かった。電気光学効果が観測されなかった理由は、歪が不十分であったためと考えられる（詳細は添付論文 [11] 参照）。今後デバイス構造の改良と歪増大により、電気光学効果によって低電圧で動作する光スイッチの開発が期待される。

<参考文献>

- [1] Y. Tanushi and S. Yokoyama, "Design and Simulation of Ring Resonator Optical Switches using Electro-Optic Materials," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, pp. 3493-3497, 2006.
- [2] A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu and M. Paniccia, "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor," *Nature*, **427**, pp. 615-618, 2004.
- [3] H. Yamaguchi, T. Iizuka, H. Koga, K. Takemura, S. Sone, H. Yabuta, S. Yamamichi, P. Lesaichere, M. Suzuki, Y. Kojima, K. Nakajima, N. Kasai, T. Sakuma, Y. Kato, Y. Miyasaka, M. Yoshida, M. S. Nishimoto, "A stacked capacitor with an MOCVD-(Ba,Sr)TiO₃ film and a RuO₂/Ru

- storage node on a TiN-capped plug for 4 Gbit DRAMs and beyond," *Ext. Abst. IEEE IEDM*, pp. 675-678, 1996.
- [4] Z. M. Xu, M. Suzuki, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Monolithically Integrated optical modulator based on polycrystalline Ba_{0.7}Sr_{0.3}TiO₃ thin films," *Appl. Phys. Lett.*, **88**, pp. 161107(1-3), 2006.
- [5] M. Salib, M. Morse and M. Paniccia, "Opportunities and integration challenges for CMOS-compatible silicon photonic and optoelectronic devices," *Proceedings of Int. Conf. Group IV Photonics*, pp. PLE1(1-6), 2004.
- [6] M. Suzuki, K. Nagata, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Low Temperature Fabrication of Monolithic Mach-Zehnder Optical Modulator on Silicon using Sputtered (Ba,Sr)TiO₃ and Mechanism of Transient Response," *Ext. Abst. of Int. Conf. Solid State Devices and Materials*, pp. 48-49, 2006.
- [7] M. Suzuki, K. Nagata, Y. Tanushi, and S. Yokoyama, "Transient Response in Monolithic Mach-Zehnder Optical Modulator Using (Ba,Sr)TiO₃ Film Sputtered at Low Temperature on Silicon," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46**, pp. 2462-2466, 2007.
- [8] M. Suzuki, K. Nagata, and S. Yokoyama, "Imprint Property of Optical Mach-Zehnder Interferometer Using Sputter-Deposited (Ba,Sr)TiO₃ at 450°C," *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, No. 4, pp. 2897-2901 (2008).
- [9] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, **435**, pp. 325-327, 2005.
- [10] R. S. Jacobsen, K. N. Andersen, P. I. Borel, J. Fage-Pedersen, L. H. Frandsen, O. Hansen, M. Kristensen, a. V. Lavrinenko, G. Moulin, H. Ou, C. Peucherer, B. Zsigri and A. Bjarklev, "Strained silicon as a new electro-optic material," *Nature*, **441**, pp.199-202, 2006.
- [11] 徳永智大, 田主裕一朗, 雨宮嘉照, 横山 新, "シリコンリング共振器を用いた電界駆動光変調素子," 電子情報通信学会研究会, 東京, 機械振興会館, 2007 年 12 月, 信学技報 OPE2007-143, pp. 41-46 (2007).

第 4 章 まとめ

本研究によって得られた成果をまとめる。

- (1) これまで、メモリ用高誘電率材料として知られていた (Ba, Sr)TiO₃ が電気光学材料の性質を持つことを示し、これを用いてマッハツェンダー光変調器を作製した。金属配線層の上層に集積可能な 450°C のプロセス温度で作製することに初めて成功した。
 - (2) 歪シリコンを用いたリング型光スイッチを初めて提案・作製し光変調率 33% を得た。
- これらの成果は、実用化には遠いが、これまでになかったプロセス技術の開発および新規光デバイスの創出という点において独創的である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、本報告書 1 頁に記載した研究協力者の方々に多大のご支援とご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表しま

す。また、ナノデバイス・システム研究センターの角南英夫教授をはじめとする教員，田部井哲夫研究員，門前智美研究員，他の研究員，事務員，学生の方々には、間接的にたいへんお世話になりました。ここに深く感謝いたします。