

光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発

Development of all-optical switch on chip using optical Kerr effect



田邊 孝純 (Takasumi TANABE, Ph. D.)

慶應義塾大学 理工学部電子工学科 准教授

(Associate Professor, Department of Electronics and Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University)

応用物理学会 レーザー学会 電子情報通信学会 OSA
IEEE/Photonics Society

受賞 : The 6th Annual Scientific American 50 Award, Takasumi Tanabe, "Light Manipulation"(2007) 文部科学大臣表彰 若手科学者賞(2011) レーザー学会 第37回レーザー学会業績賞 奨励賞(2013)

著書 : W. Yoshiki and T. Tanabe, "Performance of Kerr bistable memory in silicon nitride microring and silica microtoroid," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 53, No. 12, 12202 (pp. 7) (2014) W. Yoshiki and T. Tanabe, "All-optical switching using Kerr effect in a silica toroid microcavity," Opt. Express, Vol. 22, No. 20, pp. 24332-24341 (2014) A. Fushimi and T. Tanabe, "All-optical logic gate operating with single wavelength," Opt. Express, Vol. 22, No. 4, pp. 4466-4479 (2014) W. Yoshiki and T. Tanabe, "Analysis of bistable memory in silica toroid microcavity," J. Opt. Soc. Amer. B, Vol. 29, No. 12, pp. 3335-3343 (2012)

研究専門分野 : 光エレクトロニクス

あらまし 本研究では、全光信号処理回路の究極的な低電力化と高速化を実現するための基礎検討として、シリカ材料による微小光共振器を用いて光カー効果を利用した光スイッチ及び光双安定素子の実現を目指した。シリカはバンドギャップが広いので、従来の半導体材料では利用が難しかった光カー効果を利用できる。光カー効果は光子の吸収を伴わないので、低挿入損失素子の実現が期待される。また、シリカは良好な光学材料であることも、低挿入損失素子の実現に貢献する。筆者らは、光スイッチにおいて理想とされる、光カー効果を用いたときに、どこまで低エネルギー化できるかという課題に取り組み、シリカ微小光共振器を用いて、オンチップで動作する光変調器としては世界最小

パワーである、 $36 \mu\text{W}$ を実現できることを示した。さらに、同じ素子を用いて、光論理回路との基本構成素子として知られる光双安定素子も実現できることを理論的に示した。光信号処理が実現すれば、一度電気に変換してから処理していた信号処理を、全光で行えるようになり、光伝送・光信号処理システムの低エネルギー化につながることを期待される。

1. はじめに

今日のインターネットの高速化は光伝送技術の発展によってもたらされた。しかし、伝送は電気から光に置き換わったものの、信号処理は未だに電氣的に行われている。例えば、ネットワークノードにおいては、受信した光信号を一度電気に変換してから電氣的に処理を行い、その後再び光信号に変換してから送信している。光電気光変換は非効率であり、電氣的に信号処理をするのではジュール熱の発生が避けられず、ネットワークノードの省エネルギー化は直ぐに限界を迎える。特にインターネットは世界中のあらゆる場所に張り巡らされているため、莫大なエネルギー消費となる。そこで、筆者らをはじめ多くの研究者は、光のまま信号処理をすることを目標に、研究に取り組んでいる[1][2]。その実現にはいくつかの手法があるが、光スイッチ素子単体の性能という観点においては、もっとも低エネルギーで動作するのは微小光共振器を用いたもので実現されている[2]。

これまでに報告された微小光共振器を用いた光スイッチはキャリアを利用して動作するものが多い[2][3][4]。制御光を素子に入力したときに、キャリアが生成し、それが共振器を構成している材料の屈折率を変調し、その屈折率変調の結果共振器の共鳴波長がシフトする。信号光を共振器の共鳴波長に一致させておくと、共振波長の波長がシフトすれば信号光の透過率が変化するので、全光スイッチングが実現できる。しかし、これらのスイッチの応答時間はキャリアの有限な拡散時間によって制限され、自由キャリア吸収 (Free carrier absorption : FCA) に起因する損失も存在する。このような背景から、筆者らは、キャリア生成の伴わない、光カー効果を用いて屈折率変調を誘起して全光スイッチを実現することに着目した。

光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発

Development of all-optical switch on chip using optical Kerr effect

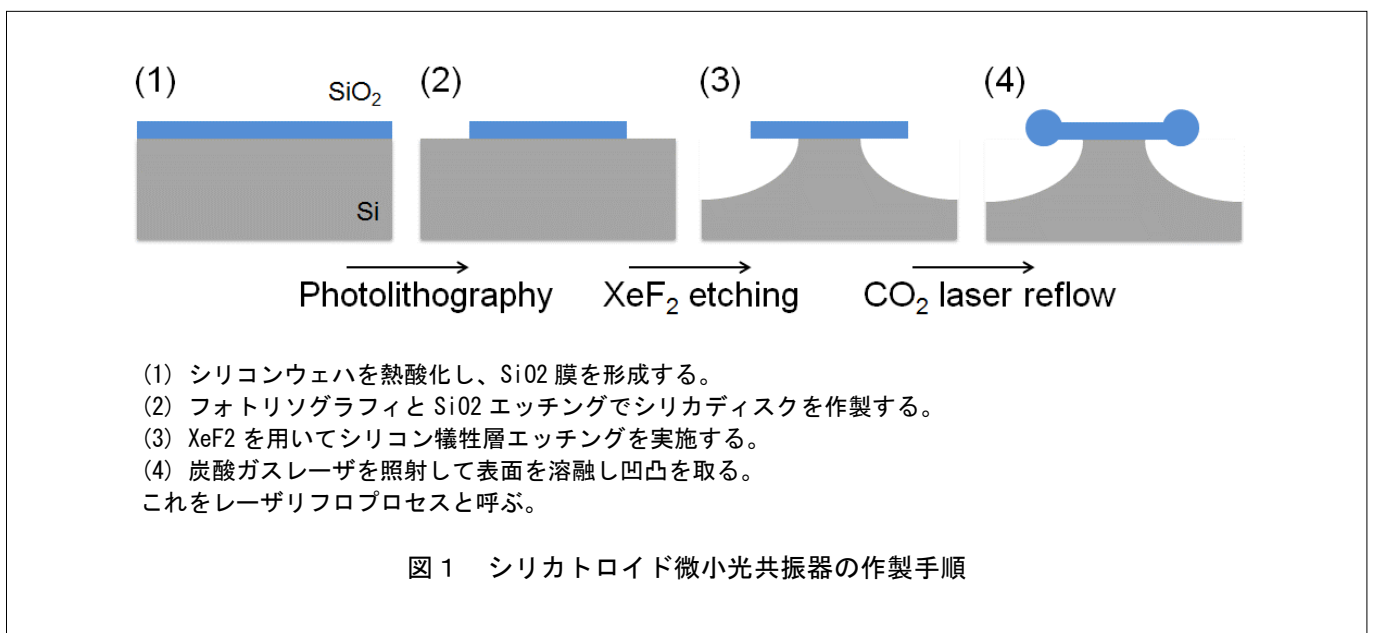
既に、フォトニック結晶共振器[5]やマイクロリング共振器[6]を用いて、光カー効果を用いたスイッチが報告されるようになってきている。しかし、これらの共振器は光の閉じ込め性能を表す Q 値が低く ($<10^5$)、そのために効率的に光スイッチを行うことができない。その結果光スイッチ動作を得るために、100mW 以上の入力光パワーが必要となる。この問題を解決するために超高 Q 値を持つバルク型のウィスパーリングギャラリーモード (Whispering gallery mode : WGM) 共振器を用いた光カースイッチも実現されているが[7][8]、これらはチップ上への集積が困難であるという欠点がある。

そこで本研究では、シリコンウェハ上に集積可能なシリカトロイド共振器を用いて、光カースイッチを実現することを目標とした。高 Q 値共振器を用いれば、光の閉じ込め時間を長くすることができるので、効率的に光カー効果を生じさせることができ、必要となる入力エネルギーを低減させることができる。その一方で高 Q 値共振器を用いると、動作速度は遅くなるが、本研究では、光カースイッチとしての低パワー化の限界を迫及することに特に目標を定めた。こうした低パワー素子が実現できれば、古典的な光スイッチとしてだけでなく、究極的には光量子情報処理素子への応用が拓ける。

2. シリカ微小光共振器の作製

本研究のポイントとなるのは、高 Q 値シリカトロイド共振器の作製である。本素子は図 1 に示すように(1)熱酸化膜の形成、(2)フォトリソグラフィと SiO_2 エッチング、(3) XeF_2 によるシリコン犠牲層エッチング、(4)レーザーリフロプロセスを経て作製される。

初めに、シリコンウェハを熱酸化し、 $2\mu\text{m}$ の SiO_2 膜を形成する。次にフォトリソグラフィ及び SiO_2 をエッチングすることで、 SiO_2 のディスク状の構造をシリコンウェハ上に作製する。 SiO_2 のエッチングにはフッ化水素を用いても、ドライエッチングを用いてもよい。ディスクの直径は約 $100\mu\text{m}$ である。このウェハを XeF_2 ドライエッチング装置に入れると、 SiO_2 ディスク下のシリコンが選択的に削り取られる。これを犠牲層エッチングと呼ぶ。適切な時間でエッチングを終了すれば、シリコンポストに SiO_2 のディスクが乗ったテーブルのような構造が得られる。最後に、このディスク状構造の上面から炭酸ガスレーザを一樣に照射する。炭酸ガスレーザはガラスを溶かすが、中央部分はシリコンポストがヒートシンクの役割を果たすので、温度が上昇しない。その結果、構造の縁のみが熔融する。レーザ照射を止めると再凝固し、表面張力の影響で SiO_2 ディスクがドーナツ状に丸まり表面の凹凸が取れる。このキノコ状の構造をトロイド構造とよび、



光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発

Development of all-optical switch on chip using optical Kerr effect

この共振器をトロイド微小光共振器と呼ぶ。このようにして作製した共振器と円環部分の直径はそれぞれ $70\mu\text{m}$ 及び $4.5\mu\text{m}$ であった。光は円環を全反射しながら周回することで閉じ込めることができる。表面散乱や材料吸収が極めて小さいため、非常に長い時間光を閉じ込めることができ、効率的な光カー効果を発現できる。

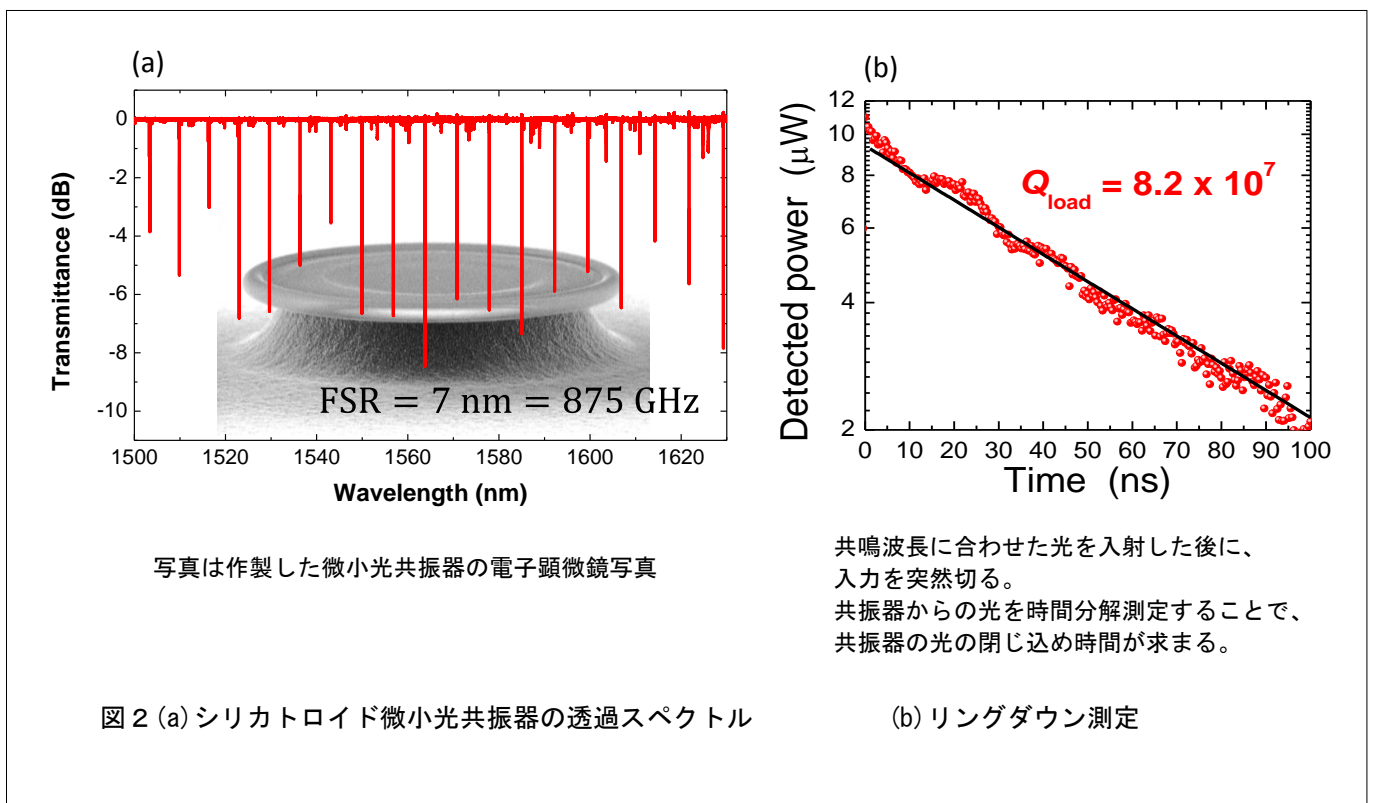
この共振器には、細くテーパさせた光ファイバを共振器の側壁付近に固定することで光を結合できる。このテーパ光ファイバは市販のシングルモード光ファイバを熱しながら延伸することにより作製できる。作製したテーパ光ファイバの直径は $1\mu\text{m}$ 程度であり、適切に制作すれば、90%を超える高い透過率を示す。例えば、シリコンマイクロリング共振器による光スイッチ素子は、素子自体の性能は極めて高いものの[4]、光ファイバとシリコン光導波路のモード直径に大きな差があるために、光ファイバから素子へ入出力する際に約 $1/20$ の光しか透過せず、挿入損失の大きな素子になってしまう。その一方で、本素子は光ファイバから高い透過率を有するナノ光ファイバを用いて結合できる

ので、素子の挿入損失を最小に抑えることができる。

このようにして作製した微小光共振器の透過スペクトルを測定した結果を図 2(a)に示す。鋭い共振スペクトルが観測される。共振器の閉じ込め性能を得るために共振器の光子寿命を測定した結果が図 2(b)であり、この結果より 8.2×10^7 の高い Q 値が得られていることが確認された。

3. 光カー効果を用いた光スイッチ

光スイッチ実験には、信号 (Signal) 光と制御 (Control) 光と呼ばれる 2 つの光を用いる。いずれの光も WGM と共振する必要があるため、図 2(a)に示すように本共振器には多数の共振器モードがあることを利用して、 1550nm 付近の異なる WGM の共振波長に合わせる。制御光は電気光学変調器 (Electro-optical modulator : EOM) により矩形信号に変調する。その後、制御光と信号光は波長多重カップラによって合波され、同時に共振器へと入射する。出力では信号光のみを波長多重フィルタで取り出し、時間波形を測定する。実験中のシリカトロイド微小光共振器を上面より



光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発

Development of all-optical switch on chip using optical Kerr effect

光学顕微鏡で観測したのが図 3(a)である。

図 3(b)に動作原理を示す。Mode S が信号光、Mode C が制御光に用いる共振器モードである。信号光が共振器に共鳴すると、信号光が共振器へ結合し閉じ込められて効率的な光カー効果が生じて屈折率が変調される。その結果、Mode C の共鳴波長が長波長側にシフトする。Mode C に結合する波長の信号光を入力すると、制御光が OFF の場合には透過率が低い、制御

利用し、TO 効果が応答できないほど速い制御パルスを入力することで、光カー効果のみを選択的に誘起した。光カー効果の応答速度は、約数 ns (共振器の光子寿命によって制限される) と極めて速いのにに対し、TO 効果のそれは遅く、シリカトロイド共振器の中では μs を超える。Q 値 10^6 程度の共振器を用いて、64ns のパルス幅を持つ制御光を入力したときの透過光の時間変化を測定した結果が図 4 である。

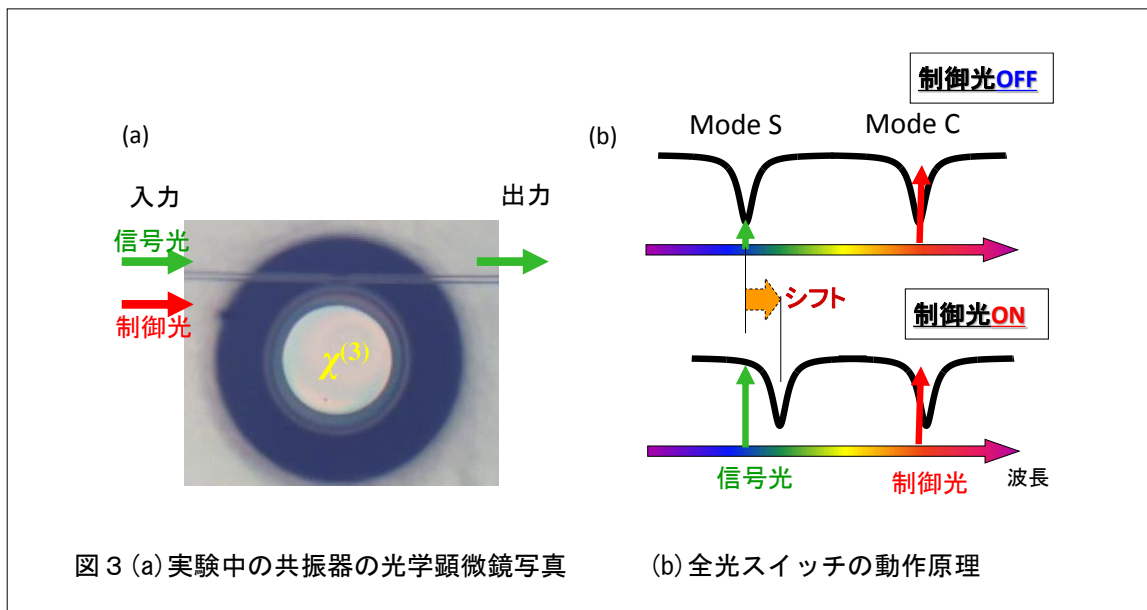


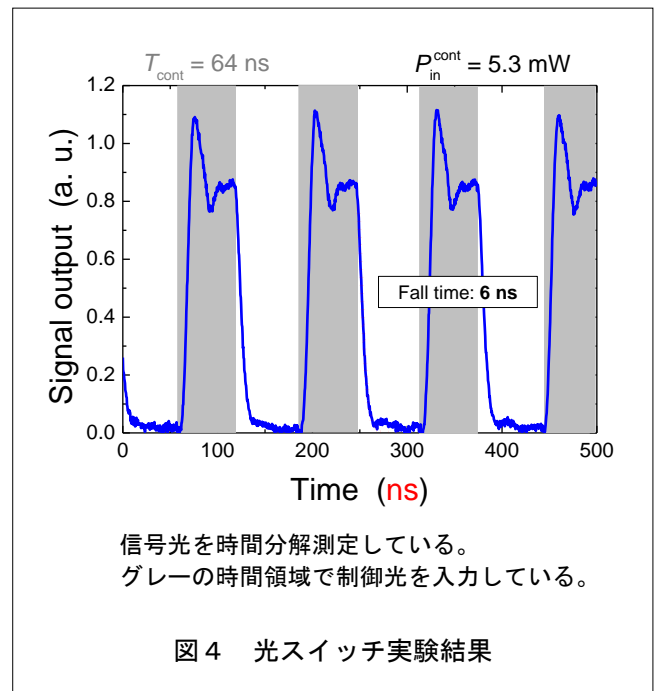
図 3 (a) 実験中の共振器の光学顕微鏡写真

(b) 全光スイッチの動作原理

光が ON となると共振波長が外れるために、光が共振器に結合せずにそのまま出力側の光ファイバに伝搬する。その結果、全光スイッチが実現できる。

シリカトロイド共振器中においては、キャリアの生成は抑制されるために、純粋に光カー効果を用いることができる。さらに、シリカの吸収係数は極めて小さいため ($Q = 2 \times 10^{11}$ に対応)、熱の発生も極めて小さい。これらの特徴を有するので、カー効果と競合するキャリアプラズマ効果や熱光学効果 (Thermo-optic : TO) 効果の発生を抑えるので、カー効果を利用しやすくなる。

しかしながら、実際にはシリカトロイド共振器の吸収係数は無視できず、一定の TO 効果が発生するので、光カー効果をスイッチに用いるためには、実験的に光カー効果と TO 効果を分離する必要がある。そこで、カー効果と TO 効果の応答時間が大きく異なる性質を



信号光を時間分解測定している。グレーの時間領域で制御光を入力している。

図 4 光スイッチ実験結果

光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発

Development of all-optical switch on chip using optical Kerr effect

制御光が入射されている間のみ信号光の透過率が高くなり、出力が得られている様子が観測される。すなわち、この実験結果が全光スイッチの直接的なデモンストレーションに他ならない。制御光を切ってから信号光が回復するまでに要するのは 6ns であり、これは使用した共振器の光子寿命と一致するため、光カー効果によるスイッチが実現できていることがわかる。注目すべきは、スイッチに要する制御光の入力光強度であり、わずか 5.3mW である。筆者らはさらに共振器を最適化し、より高 Q 値 ($> 2 \times 10^7$) な共振器を用いることによりすることで、最小 36 μ W での光変調を実現した。この値はチップ集積された光カースイッチとしては全ての中で世界最小である [9]。

4. 光カー効果を用いた光論理回路素子

共振器と光学非線形効果を組み合わせると、光双安定素子を実現できることが知られている。光双安定素子を用いると光トランジスタが実現でき、光論理回路の基本構成素子となりうるということが知られている [1]。そこで、筆者らはさらに光双安定素子の動作について理論的に検討を進めた。使用したのは結合モード理論と呼ばれる支配方程式であり、これを用いると共振器中の光の時間変化を記述できる。

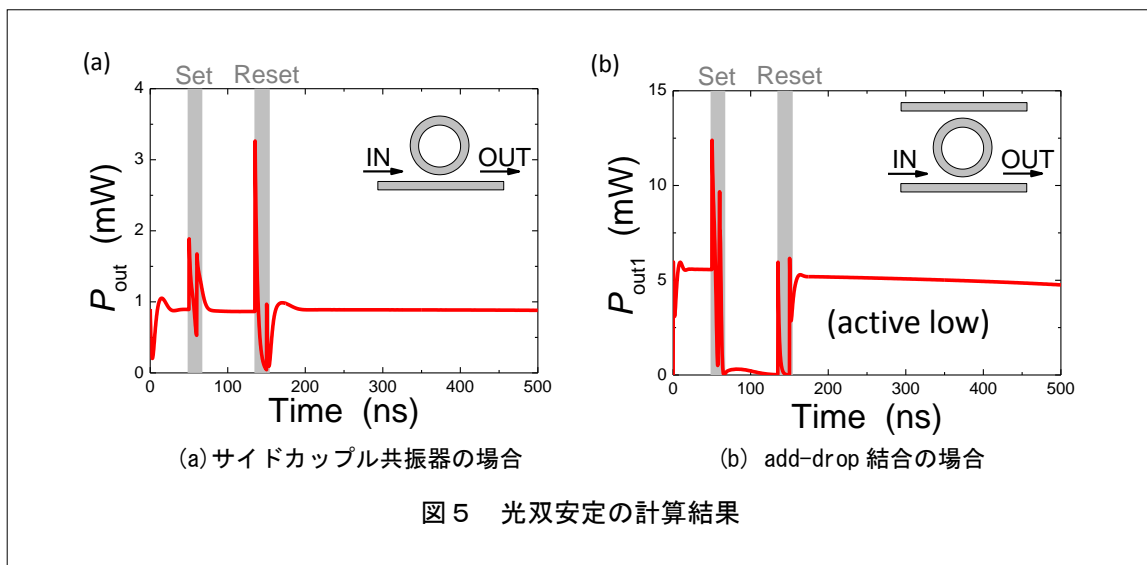
計算機上の実験は光スイッチと同様に行う。しかし、信号光自身で光カー効果が誘起されるまで、信号光強度を強める点が異なる。信号光自身で光カー効果が誘

起されるために、制御光で共振波長をシフトさせて、一度信号光が共振器結合されれば、その後は信号光が透過（反射）し続けることができ、メモリ動作が実現される。

計算結果を図 5 に示す。図 5(a) は光スイッチ実験でも用いたサイドカップルと呼ばれる系であるのに対して、図 5(b) は add-drop と呼ばれる出力ポートを追加した系となっている。計算の結果、add-drop 系のみ所望の動作が得られることがわかった。

信号光はあらかじめ共振器の共鳴波長より長波長側にシフトさせておく。Set の時間領域で制御光を入力させて、共振器の共振波長を長波長にシフトさせる。すると、信号光は共振器に共鳴するようになるので、信号光で光カー効果が発生し、制御光を切った後も状態が維持できる。図 5(b) ではいわゆるメモリ動作が実現されている。状態を OFF に戻すには (active low なので、OFF の状態が高透過率状態であることに注意)、入力を瞬間的に切ればよい (Reset 領域)。

計算結果より、add-drop のみ所望の動作が得られることがわかった。これは現実的な系ではわずかながら熱が発生してしまうことと関係がある。計算機上の仮想実験によって、筆者らは現実的な系であっても add-drop の構成を採用することで、光双安定動作が実現できることを明らかにした [10][11]。この結果は、将来の微小光共振器を用いた光論理回路の構築に向けて重要な知見となる。



光カー効果によるオンチップ型光スイッチの開発

Development of all-optical switch on chip using optical Kerr effect

5. まとめ

筆者らは、シリカ微小光共振器を用いて、光カー効果を用いた全光スイッチの開発を行った。特に、光カースイッチとしてどこまで動作パワーを低減できるかの、課題に取り組み最小 36 μ W まで低下できることを示した。これは現在までに報告されている全ての光カースイッチの中で最小の値であり、高い Q 値の共振器が作製されたので実現できた。

また、光論理回路の構成素子となる、光双安定素子についても検討を行い、add-drop と呼ばれる系を構築することで、同一素子で光双安定動作が実現できることを理論的に示した。これらの研究成果は、将来の光信号処理の低エネルギー化に向けた第一歩である。

本研究において実験を実施し、本報告書をまとめるに当たり尽力頂いた、慶應義塾大学リーディング大学院 RA 吉岐航氏に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A. Fushimi and T. Tanabe, "All-optical logic gate operating with single wavelength," *Opt. Express* **22**, 4466-4479 (2014).
- [2] K. Nozaki, T. Tanabe, A. Shinya, S. Matsuo, T. Sato, H. Taniyama, and M. Notomi, "Sub-femtojoule all-optical switching using a photonic crystal nanocavity," *Nature Photon.* **4**, 477-483 (2010).
- [3] T. Tanabe, M. Notomi, A. Shinya, S. Mitsugi, and E. Kuramochi, "All-optical switches on a silicon chip realized using photonic crystal nanocavities," *Appl. Phys. Lett.* **87**, 151112 (2005).
- [4] V. R. Almeida, C. A. Barrios, R. R. Panepucci, and M. Lipson, "All-optical control of light on a silicon chip," *Nature* **431**, 1081-1084 (2004).
- [5] V. Eckhouse, I. Cestier, G. Eisenstein, S. Combri`e, G. Lehoucq, and A. D. Rossi, "Kerr-induced all-optical switching in a GaInP photonic crystal Fabry-Perot resonator," *Opt. Express* **20**, 8524-8534 (2012).
- [6] J. S. Pelc, K. Rivoire, S. Vo, C. Santori, D. A. Fattal, and R. G. Beausoleil, "Picosecond all-optical switching in hydrogenated amorphous silicon microring resonators," *Opt. Express* **22**, 3797-3810 (2014).
- [7] M. Pöllinger and A. Rauschenbeutel, "All-optical signal processing at ultra-low powers in bottle microresonators using the Kerr effect," *Opt. Express* **18**, 17764-17775 (2010).
- [8] I. Razdolskiy, S. Berneschi, G. N. Conti, S. Pelli, T. V. Murzina, G. C. Righini, and S. Soria, "Hybrid microspheres for nonlinear Kerr switching devices," *Opt. Express* **19**, 9523-9528 (2011).
- [9] W. Yoshiki and T. Tanabe, "All-optical switching using Kerr effect in a silica toroid microcavity," *Opt. Express* **22**, 24332-24341 (2014).
- [10] W. Yoshiki and T. Tanabe, "Analysis of bistable memory in silica toroid microcavity," *J. Opt. Soc. Amer. B* **29**, 3335-3343 (2012).
- [11] W. Yoshiki and T. Tanabe, "Performance of Kerr bistable memory in silicon nitride microring and silica microtoroid," *Jpn. J. Appl. Phys.* **53**, 12202 (pp. 7) (2014).

この研究は、平成 22 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 23 ~ 25 年度に実施されたものです。