

Add-drop 型 WGM 共振器における光 Kerr 双安定メモリの解析

Analysis of optical Kerr bistable memory in add-drop WGM cavities

慶應義塾大学理工学部, ○吉岐航¹, 田邊孝純¹Keio Univ.¹ ○Wataru Yoshiki¹, Takasumi Tanabe¹

E-mail: takasumi@elec.keio.ac.jp

近年の微小光共振器の Q 値の上昇により, 光共振器上において非常に小さな駆動パワーで光双安定を得ることができるようになった [1]. そこで本研究では, 結合モード理論 (Coupled Mode Theory: CMT) 及び有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を組み合わせた手法を用いて, シリカトロイド微小光共振器 [2] における光 Kerr 双安定メモリに関する数値解析を行った. その結果, シリカトロイド微小光共振器をはじめとするリング型共振器で Kerr 双安定メモリを得るためには, 共振器 - 導波路間の結合を調整すると共に, side-couple 系 (Fig.1(b) 右上) ではなく add-drop 系 (Fig.1(c) 右上) を使用する必要があるという結論が得られた. side-couple 系及び add-drop 系の Q 値は以下のように書き表すことができる.

$$Q_{\text{tot}}^{2\text{-port}} = \omega_0(\tau_{\text{int}}^{-1} + \tau_{\text{coup}}^{-1})^{-1} \quad (1)$$

$$Q_{\text{tot}}^{4\text{-port}} = \omega_0(\tau_{\text{int}}^{-1} + \tau_{\text{coup1}}^{-1} + \tau_{\text{coup2}}^{-1})^{-1} \quad (2)$$

ω_0 は共振角周波数, τ_{int} は共振器固有の光子寿命, τ_{coup} , τ_{coup1} 及び τ_{coup2} は共振器と導波路との結合に関する光子寿命である. 本研究ではこの結合に関する光子寿命を様々な値に調整しながら解析を行った.

共振器中で光双安定を得るには, 共振器の屈折率を変調する必要がある. しかしながら, 一般にはシリカ中では TO 効果の存在により, Kerr 効果を観測するのが非常に難しくなる. そこで我々はまず Kerr 効果と TO 効果によって誘起される屈折率変化の大きさ (Δn_{Kerr} , Δn_{TO}) について解析を行った. 結果を Fig. 1(a) に示す. まず $2.3 \mu\text{s}$ 経過後までは Δn_{Kerr} は Δn_{TO} を上回っていることが分かる. さらに, 図中に “Kerr memory usable” と示した, Δn_{Kerr} が水平かつ Δn_{TO} より大きい領域は, τ_{coup} が小さくなればなるほど長くなることが分かる. この “Kerr memory usable” はこの共振器が光 Kerr 双安定メモリとして動作できる時間と等価であるので, この結果より, 光 Kerr 双安定メモリのメモリ保持時間を長くするには τ_{coup} を小さくする必要があることが分かる.

次に, side-couple 系において $\tau_{\text{coup}} = \tau_{\text{int}}/100$ とした時のメモリ動作の結果を Fig. 1(b) に示す. この図では, 共振器内に蓄えられている光エネルギー U_p が明確に 2 つの双安定状態を示している一方で, 出力パワー P_{out} は 1 つの状態しか示していない. これは τ_{coup} が τ_{int} より極めて小さいためにクリティカルカップリング ($\tau_{\text{coup}} = \tau_{\text{int}}$) の条件を満たすことができないためである. この条件では透過スペクトル

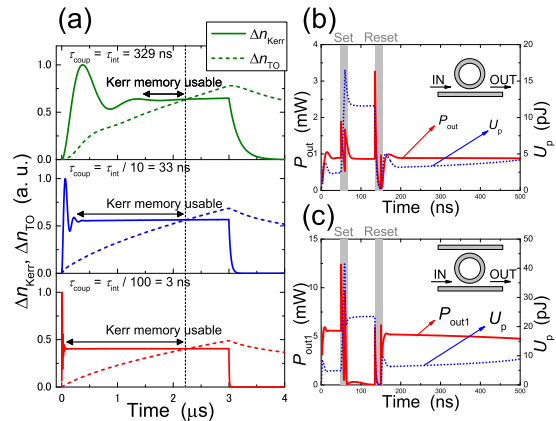


Fig. 1: The result of the numerical calculation. we assumed that $Q_{\text{int}} = 4 \times 10^8$ ($\tau_{\text{int}} = 329 \text{ ns}$) [2]. (a) Δn_{Kerr} (solid line) and Δn_{TO} (dashed line) versus time when a side-coupled system is employed. (b) Optical bistable memory operation in a side-coupled system. (c) Optical bistable memory operation in an add-drop system.

上のディップが消え, 波長に対して透過率がフラットになるので, 出力ポートにおいて双安定状態を観測することができなくなる.

出力ポートで双安定状態を得るためには, クリティカルカップリングの条件を維持しつつ τ_{coup} を小さくする必要がある. そのために我々は add-drop 系を用いることにした [3]. add-drop 系でクリティカルカップリングを得るためには $\tau_{\text{coup1}}^{-1} = \tau_{\text{int}}^{-1} + \tau_{\text{coup2}}^{-1}$ を満足させる必要があるが, 左辺と右辺にある τ_{coup1} 及び τ_{coup2} は自由に調整可能であるので, 仮に τ_{coup1} が τ_{int} に対して非常に小さい場合でもクリティカルカップリングを得ることができる. add-drop 系において $\tau_{\text{coup1}} = \tau_{\text{coup2}} = \tau_{\text{int}}/100$ と置いた時のメモリ動作の解析結果を Fig.1(c) に示した. この時, クリティカルカップリング条件はほぼに満たされている. Fig. 1(c) では Fig. 1(b) とは異なり, U_p のみならず P_{out} も光メモリ動作を示していることが分かる. したがって Kerr 双安定メモリはシリカトロイド微小光共振器を用いた add-drop 系において実現可能であると結論付けることができる.

[1] M. Notomi *et al.*, Opt. Express **13**, 2678–2687 (2005).

[2] T. Kippenberg *et al.*, Appl. Phys. Lett. **85**, 6113–6115 (2004).

[3] W. Yoshiki and T. Tanabe, J. Opt. Soc. Am. B **29**, 3335–3343 (2012).