

(inner cover)

Dynamic control of ultra-high Q silica toroid optical microcavities

February 2017

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy in Engineering



Keio University

Graduate School of Science and Technology
School of Integrated Design Engineering

YOSHIKI, Wataru

主 論 文 要 旨

報告番号	甲	第	号	氏 名	吉岐 航
主 論 文 題 目 :					
<p style="text-align: center;">Dynamic control of ultra-high Q silica toroid optical microcavities (超高 Q 値シリカトロイド微小光共振器の動的制御)</p>					
<p>(内容の要旨)</p> <p>シリカガラスは、光の吸収や散乱が小さく加工も容易なことから、光ファイバ、光カプラや光フィルタを含むパッシブな光学素子の材料として広く用いられてきた。その一方で、シリカガラスは非線形光学定数が小さく、キャリア注入や電界印可による光制御も困難である。それ故に、シリカガラスは優れた光学特性を持つにも関わらず、光スイッチや光メモリを始めとするアクティブな光学素子にはほとんど用いられてこなかった。しかしながら、高 Q 値かつ小さなモード体積を有する微小光共振器を用いると、非線形光学定数が小さい材料を用いた場合でも、効率的に光を制御できることに、近年注目が集まっている。特に、非線形光学効果によって光共振器の特性を時間的に変化させることで実現される光制御は動的制御と呼ばれ、光スイッチ、光メモリや光周波数変換素子への応用が期待される。本研究では、超高 Q 値シリカトロイド微小光共振器の動的制御を、光カー効果を用いて実現し、全光スイッチ、全光メモリ、光周波数変換素子、全光バッファへと応用することを目的とする。</p> <p>第 1 章では、本研究の背景および目的を概説した。</p> <p>第 2 章では、本研究で用いるシリカトロイド微小光共振器の基礎理論、作製及び光学測定の手法について述べた。</p> <p>第 3 章では、シリカトロイド微小光共振器中にて生じる、光カー効果と熱光学効果の 2 つの非線形光学効果に関する理論モデルを構築し、光共振器を用いた全光メモリの実現可能性を確かめた。</p> <p>第 4 章では、光カー効果を用いた全光スイッチの実証実験を、シリカトロイド微小光共振器を用いて行い、2.1 mW の入力光パワーでスイッチング動作が得られることを示した。さらに、Q 値が 10^7 を超える微小光共振器を用いることにより必要な入力光パワーを 36 μW 程度まで低減可能であることを明らかにした。</p> <p>第 5 章では、断熱的周波数変換過程を利用した光周波数変換動作について示した。超高 Q 値をもつシリカトロイド微小光共振器と高速な光カー効果を組み合わせることにより、周波数変換量、変換時間幅、変換回数を自在に制御できる断熱的周波数変換動作を実現した。また、光周波数変換動作の前後での光の位相差が光出力に与える影響を明らかにした。</p> <p>第 6 章では、シリカトロイド微小光共振器中の超高 Q 値の光モード間の強結合を時間領域で観測した。本章で構築した数値モデルおよび実験技術は第 7 章の理論と実験で利用される。</p> <p>第 7 章では、遅延量可変な全光バッファを理論と実験の両面から実証した。2 つのシリカトロイド微小光共振器それぞれが持つ超高 Q 値な光モードと低 Q 値な光モードとを結合させ、それらの結合を光カー効果によって動的に制御することで、遅延量を制御可能な全光バッファ動作を実現した。</p> <p>第 8 章では、各章で得られた知見をまとめ、本研究の総括を行った。</p>					

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Integrated Design Engineering	Student Identification Number	SURNAME, Given name YOSHIKI, Wataru
Title <div style="text-align: center; padding-top: 10px;">Dynamic control of ultra-high Q silica toroid optical microcavities</div>		
Abstract <p>Silica has been widely employed as a host material for passive optical devices including fibers, couplers, and filters because it has an extremely low absorption and scattering loss and can be easily processed. However, despite its excellent properties, it has rarely been used for active optical devices such as optical switches and memories. This is owing to a small nonlinear coefficient and absence of carrier-induced and electro-optic effects in silica. Nevertheless, it is possible to control light efficiently even in a material with a small nonlinear coefficient if a microcavity with an ultra-high Q factor and a small mode volume is used. Specifically, the “dynamic control” method for controlling light, which is achieved by time-dependently changing the microcavity characteristics, is expected to be employed for optical switches, memories and frequency converters. The goal of this study is to demonstrate the dynamic control of an ultra-high Q silica microcavity and to use it for an all-optical memory, switching, frequency conversion, and tunable buffering.</p> <p>Chapter 1 describes the background and objective of this study.</p> <p>Chapter 2 deals with the basic theory, fabrication, and characterization of a silica toroid microcavity that is used in this study.</p> <p>Chapter 3 describes the development of a theoretical model for nonlinear optical effects such as optical Kerr and thermo-optic effects in a silica toroid microcavity, and then uses it to confirm numerically the feasibility of an all-optical memory in a microcavity.</p> <p>Chapter 4 reports proof-of-principle all-optical switching experiments that were performed using the optical Kerr effect in a silica toroid microcavity. The results proved that a moderate input control power of 2.1 mW is sufficient for switching, and the required power can be further reduced to 36 μW when a Q value of over 10^7 is employed.</p> <p>Chapter 5 describes the achievement of all-optical frequency conversion based on an adiabatic frequency conversion (AFC) process. The use of the optical Kerr effect in an ultra-high Q silica toroid microcavity made it possible to demonstrate AFC with arbitral amount of frequency shift, conversion time width, and multiple times of conversion processes. In addition, the effect of the relative phase between the original and converted lights on the optical output was revealed.</p> <p>Chapter 6 reports the experimental observation in the time domain of the strong coupling between ultra-high Q optical modes in a silica toroid microcavity. The numerical model and the experimental techniques developed in this chapter were employed for the experiments described in Chapter 7.</p> <p>Chapter 7 describes a demonstration of all-optical tunable buffering both numerically and experimentally. All-optical tunable buffering was achieved by coupling ultra-high and moderate Q modes in two different silica toroid microcavities and controlling the coupling between the two modes dynamically via the Kerr effect.</p> <p>Chapter 8 summarizes the knowledge obtained in each chapter, and concludes the thesis.</p>		