

# Nonlinear optical processes with a silica toroid microcavity for optical frequency comb generation

March 2017

KATO, Takumi

## 主 論 文 要 旨

| 報告番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 甲 第 号 | 氏 名 | 加藤 拓巳 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|-------|
| <p>主論文題目</p> <p><b>Nonlinear optical processes with a silica toroid microcavity for optical frequency comb generation</b>（光周波数コム発生に向けたシリカトロイド微小光共振器を用いた非線形光学過程）</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |     |       |
| <p>(内容の要旨)</p> <p>レーザ光源は医療や微細加工をはじめ広く用いられており、用途に応じて様々な光周波数域での需要がある。非線形光学効果を用いた光周波数変換は、物質の非線形光学定数が一般的に小さいため、高強度な励起光を必要とする。近年、高 <math>Q</math> 値微小光共振器を利用すると単一周波数で低強度な励起光を用いても非線形周波数変換を容易に実現でき、効率的に光周波数コムが得られると提案されている。また、光周波数コム光源は、ガスセンシングや精密距離計測など多くの応用に向けて、それを小型化・省電力化し、安価な微小光共振器で構成することが望まれている。そこで本研究では、シリカトロイド微小光共振器内で生じる非線形光学過程の物理を調べることで、光周波数コムの実現に必要なマイクロコム（微小光共振器を用いて得られるくし状のスペクトル光）の特性を明らかにすることを目的とした。</p> <p>第1章では、高 <math>Q</math> 値微小光共振器と光周波数コム技術の背景を概説した。非線形光学過程の中でも、3 次の非線形光学効果である四光波混合、誘導ラマン散乱、第三次高調波発生に着目し、従来研究の動向を述べた。</p> <p>第2章では、シリカトロイド微小光共振器の基本理論と作製手法について述べた。また、非線形光学現象を観測するために必要となる実験系について説明した。</p> <p>第3章では、モード同期されたマイクロコムを発生させる方法として、入力パワーを制御する手法を提案し、その実験結果について示した。数値計算にはルジャート・レフイーヴァ方程式を用い、共振器内の光の振る舞いを解析した。共振器への入出力パワー変化に対するヒステリシス性に注目することで、本手法が従来の入力波長を掃引する手法と相互補完関係にあることを明らかにした。新たに提案した本手法を用いて、シリカトロイド微小光共振器においてモード同期されたマイクロコムを達成した。</p> <p>第4章では、マイクロコム発生における誘導ラマン散乱の影響について述べた。従来の解析では、四光波混合と誘導ラマン散乱の最大利得を比較していたが、自由スペクトル領域を考慮することで、2 つの非線形光学効果の競合を更に正確に記述できることを明らかにした。広い自由スペクトル領域を持つシリカトロイド微小光共振器において、入力パワーや、結合 <math>Q</math> 値を変化させることで、四光波混合と誘導ラマン散乱の推移を制御できることを示した。</p> <p>第5章では、誘導ラマン散乱による横モード間相互作用について述べた。広帯域なラマン利得を持つシリカトロイド微小光共振器において、低 <math>Q</math> 値のモードを励振すると、誘導ラマン散乱を介して高 <math>Q</math> 値のモードにエネルギーが移ることを明らかにした。横モード間相互作用の発生はモードの <math>Q</math> 値と空間的な重なりで決定されることを示した。その結果として、高 <math>Q</math> 値の横モードを励振した場合は、誘導ラマン散乱によって単一横モードの広帯域なマイクロコムが得られることを実験的に示した。</p> <p>第6章では、第三次高調波を介した広帯域な可視光発生について述べた。そのスペクトルは第三次高調波現象だけではなく、励振波長が存在する近赤外領域における四光波混合と誘導ラマン散乱にも依存していることを実験的に示した。広帯域な可視光発生には、広帯域な近赤外光発生とその制御が必要であることを明らかにした。</p> <p>第7章では、結論として各章で得られた内容をまとめ、本研究の成果を要約した。</p> |       |     |       |

## SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                               |                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| School<br>School of Integrated Design<br>Engineering                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Student Identification Number | SURNAME, First name<br>KATO, Takumi |
| Title<br>Nonlinear optical processes with a silica toroid microcavity for optical frequency comb generation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                               |                                     |
| Abstract<br><p>Laser technology is now used in various fields including medicine and microfabrication. Since the interaction between light and matter varies with laser frequency, arbitrary frequency conversion is desired for various applications. Frequency conversion with nonlinear optical processes usually requires a high optical pump power because second- and third-order nonlinear coefficients are small. High quality factor (<math>Q</math>) microcavities are attracting attention, because they allow us to compensate for small nonlinear coefficients and achieve frequency conversion with low laser power thanks to the strong confinement of light. Recently, a microcavity-based frequency comb (microcomb) has been generated that requires only a continuous-wave pump and a high-<math>Q</math> microcavity. This allows us to obtain multiple frequency components. This dissertation studies on nonlinear optical processes in a silica toroid microcavity for optical frequency comb generation that is a key technology for precise measurements.</p> <p>Chapter 1 provides the background and motivation for this work. Frequency comb technologies and related studies that use high-<math>Q</math> microcavities to enhance third-order nonlinearities such as four-wave mixing (FWM), stimulated Raman scattering (SRS), and third-harmonic generation (THG) are surveyed, to clarify the motivation for this study.</p> <p>Chapter 2 describes the basic theory and fabrication of a silica toroid microcavity. The experimental setups to measure the nonlinear processes with a fabricated silica toroid microcavity including FWM, SRS, and THG are described.</p> <p>Chapter 3 presents a demonstration of a newly proposed method for achieving mode-locking in a microcomb system. A model based on the Lugiato-Lefever equation is developed to analyze microcomb generation, and it reveals that the hysteresis behavior of a nonlinear cavity will be the key to achieving mode-locking. In contrast to previous methods, where the frequency of the input laser is scanned, it is found numerically and experimentally that mode-locking could also be achieved by adequately sweeping the input laser power.</p> <p>Chapter 4 describes a study of the gain competition between FWM and SRS that occurs in a microcavity. Considering the free-spectral-range (FSR) in addition to an analysis of maximum gains of FWM and SRS, it is found that we can suppress or enhance the modulation instability gain by changing the input power and the coupling <math>Q</math> in a large FSR cavity. This will allow us to control the transition from an FWM dominant state to an SRS dominant state.</p> <p>Chapter 5 discusses the transverse mode interaction that occurs as a result of SRS in a silica cavity, which has broad Raman gain. It is found that in such a system the transverse mode interaction occurs from a low-<math>Q</math> to a high-<math>Q</math> transverse mode family via an SRS process when a low-<math>Q</math> mode is pumped. As a result, a dual-comb-like spectrum appears. The transverse mode interaction dependence on the <math>Q</math> value and the spatial overlap between different transverse mode families are described numerically and experimentally.</p> <p>Chapter 6 describes a demonstration of visible light emission via THG. It is shown experimentally that the FWM and SRS in the near infrared region influence the spectrum shape of the generated visible light.</p> <p>Chapter 7 is a summary. The knowledge obtained in each chapter is summarized and the conclusions reached in this dissertation are presented.</p> |                               |                                     |