

A Thesis for the Degree of Ph.D. in Engineering

**Dispersion engineering of high- Q optical
microresonators for frequency comb generation**

July 2020



Keio University

Graduate School of Science and Technology
School of Integrated Design Engineering

FUJII, Shun

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲	第	号	氏 名	藤井 瞬
主論文題名： Dispersion engineering of high-Q optical microresonators for frequency comb generation (光周波数コム発生のための高 Q 値微小光共振器の分散設計)					
<p>レーザーの発明以来、光と物質の相互作用に関する研究は大いに進展してきた。その中でも微小光共振器はその微小な領域に光を閉じ込め、究極的に光密度を高めることで非線形光学効果をはじめとするさまざまな現象を発現することができる素子として知られている。特に微小光共振器を用いた光周波数コム発生（マイクロコム）は近年非常に注目を集めており、世界中で精力的に研究が進められている。</p> <p>マイクロコムの発生にはいくつか重要な条件が存在するが、その一つが共振器分散である。分散は光パラメトリック発振の位相整合条件の成立に深く関わっており、共振器分散の制御はマイクロコムの波長帯域拡大やモード同期を達成するときの必要不可欠な技術となる。</p> <p>本論文の研究は光周波数コムのための高Q値微小光共振器の分散設計に関して論じたものである。特に単結晶フッ化物やシリカガラスから作製されるウィスパリングギャラリーモード微小光共振器の分散制御とさらなる高Q値化に基づいた、マイクロコムの波長帯域拡大を目的としている。</p> <p>第一章では、本論文の背景および目的を概説した。</p> <p>第二章では、高Q値微小光共振器およびマイクロコムを中心に、三次の非線形光学効果の基礎理論や共振器の作製手法、光学実験の手法に関して述べた。</p> <p>第三章では、光周波数コム応用へ向けた共振器分散制御に関して、理論から計算手法、光学測定方法について詳細に導入した。特にマイクロコムと高次分散の関係性に焦点を当て、共振器分散設計の指針やその手法について解説した。</p> <p>第四章では、超精密機械加工を用いた単結晶微小光共振器の作製について議論し、Q値10^8を超える高Q値化と構造分散制御を両立する手法について述べた。また、章後半では超精密機械加工によるトップダウンで作製したフッ化マグネシウム微小光共振器を用いて、通信波長帯で励起する1オクターブ以上離れた光パラメトリック発振の発生を実証した。</p> <p>第五章では、分散制御したオンチップシリカ微小光共振器を用いて、四光波混合と第三高調波発生を介した青色光発生を実現した。分散を適切に設計することで狙った波長での可視光発生ができることを明らかにした。</p> <p>第六章では、異なる横モード間のモード結合を利用したマイクロコム発生の新たな数値計算モデルを構築した。本章で構築したモデルは、特に正常分散領域におけるモードロックパルスの厳密な解析に用いることができるため、これまで解明されていなかった不安定（カオス）領域の評価が可能となった。</p> <p>第七章では、本論文の総括として、結論と今後の展望を述べる。</p>					

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	FUJII, Shun
Thesis Title			
<p>Dispersion engineering of high-Q optical microresonators for frequency comb generation</p>			
<p>Since the development of laser technology, light-matter interactions, and relevant applications have been intensively studied. In particular, the optical microresonator is known to be a device that enables the ultimate enhancement of optical density by confining light with a small mode volume, resulting in the appearance of various optical nonlinearities. Recently, a microresonator-based optical frequency comb, which is known as a microcomb, has been attracting a lot of attention.</p> <p>One requirement for the development of a microcomb is dispersion engineering. Specifically, dispersion plays a vital role as regards the phase-matching condition for optical parametric oscillation. Proper control of microresonator dispersion has the potential to allow the expansion of the microcomb bandwidth and the mode-locking operation.</p> <p>This thesis describes a study of the dispersion engineering of high-Q optical microresonators, which influences optical frequency comb generation, featuring monolithic whispering gallery mode microresonators. This study demonstrates the expansion of the microcomb bandwidth based on sophisticated dispersion engineering, which became possible by employing high-Q microresonators fabricated with precision machining.</p> <p>Chapter 1 provides the background and objective of this thesis.</p> <p>Chapter 2 introduces the fundamental theory of third-order nonlinearity, fabrication, and the pros and cons of different high-Q microresonators from the perspective of microcomb formation.</p> <p>Chapter 3 explains basic theory, calculation, and measurement with regard to the dispersion of a microresonator for a frequency comb. In particular, it highlights the relationship between a microcomb and higher-order dispersion, and reveals the dispersion geometry design strategy.</p> <p>Chapter 4 discusses the ultraprecision machining fabrication of dispersion-engineered optical microresonators with a Q exceeding 10^8. Moreover, an octave-wide optical parametric oscillation was demonstrated in a machined magnesium fluoride resonator.</p> <p>Chapter 5 describes a blue light emission realized via cascade four-wave mixing and third-harmonic generation in dispersion-engineered on-chip silica microresonators. This chapter also reveals that precise dispersion engineering can be used to generate visible light deterministically.</p> <p>Chapter 6 describes the numerical modeling of the anti-mode crossing-induced microcomb generation. It is shown that this model is particularly powerful for simulating mode-locked pulse formation in a normal-dispersion regime in a rigorous way.</p> <p>Chapter 7 summarizes the thesis and describes the future outlook.</p>			