

Design and fabrication of high- Q optical microresonators for integrated passive mode-locked lasers

August 2025

Riku Imamura

主 論 文 要 旨

No.1

報告番号	甲	第	号	氏 名	今村 陸
主論文題名： Design and fabrication of high- Q optical microresonators for integrated passive mode-locked lasers (集積型受動モード同期レーザ向け高 Q 値微小光共振器の設計と作製)					
(内容の要旨)					
レーザの発明以来，特にモード同期レーザは超短パルス光の生成において産業の基盤技術として重要な役割を果たしており，これまで多くの応用が開拓されてきた．しかし，従来のモード同期レーザは大規模な光学系を必要とし，集積化による小型化や安定性の向上が課題となっている．一方，微小光共振器は微小な領域に光を閉じ込め，光と物質の相互作用を究極的に高めることにより，非線形光学効果をはじめとする様々な現象を発現させることができる．微小光共振器を用いた光周波数コム（マイクロコム）やソリトン化したマイクロコム（ソリトンマイクロコム）は，学術的にも産業的にも注目されている． しかしながら，従来のマイクロコム生成では，励起レーザを微小光共振器に注入し，四光波混合によって利得を得る手法が主流であったため，緻密な波長制御が必要であるほか，励起光が出力に残留してしまうなどの課題が存在した．これらを解決するためには，利得媒質や非線形損失媒質を微小光共振器へ付加し，自励発振レーザによる受動モード同期を実現することが重要である．本論文では，集積化された受動モード同期レーザの開発に向け，高Q値微小光共振器の設計と作製について論じ，その実現可能性を明らかにした． 第一章では，本論文の背景として，モード同期レーザの基本概念と先行研究を概観し，本研究の目的について述べた． 第二章では，本研究における主なデバイスである微小光共振器の原理と，それに関連する非線形光学効果について基礎理論や先行研究を説明した． 第三章では，100 μm から 1 mm の直径を有する高Q値微小光共振器の作製プロセスとその性能評価について述べた．特に利得媒質としてエルビウムイオンを添加する方法や，非線形損失としてカーボンナノチューブやグラフェンを修飾する方法について詳述した． 第四章では，繰り返し周波数 100 GHz を超える集積型モード同期レーザの設計について述べた．単一共振器モデルと結合共振器モデルの二つのアプローチを検討し，それぞれのモード同期条件を計算で示した．単一共振器モデルでは，可飽和吸収素子を付加した後の微小光共振器でQ値を10^8以上にすることで受動モード同期が可能となり，結合共振器モデルでは，可飽和吸収素子を付加せずともQ値10^8の微小光共振器を用いることで同様に受動モード同期が達成できることを明らかにした． 第五章では，本研究の成果を総括し，今後の展望について述べた． 本研究により，設計指針と素子作製の手法を明らかにし，微小光共振器を基盤とする集積型受動モード同期レーザ実現の可能性を示した．					

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ “KOU” ☐ “OTSU” No. _____ *Office use only	Name	IMAMURA, Riku
Thesis Title Design and fabrication of high-Q optical microresonators for integrated passive mode-locked lasers			
Thesis Summary Since the invention of the laser, mode-locked lasers have played a critical role as foundational technology in generating ultrashort pulses of light and have paved the way for numerous applications. However, conventional mode-locked lasers require large-scale optical setups, presenting challenges in terms of miniaturization and enhanced stability through integration. On the other hand, microresonators, by confining light within a microscale region, significantly enhance light-matter interactions, enabling various phenomena, including nonlinear optical effects. Optical frequency combs (microcombs) and soliton microcombs generated using microresonators have emerged as highly promising research fields with academic and industrial significance. Nevertheless, Current microcomb generation relies on precise wavelength control and often suffers from residual pump light. To address this, integrating gain and nonlinear loss media into a microresonator enables passive mode-locking in self-oscillating lasers. This thesis explores the design and fabrication of high-Q microresonators as a key step toward the development of integrated passive mode-locked lasers. In Chapter 1, the fundamental concepts of mode-locked lasers, previous research, and the objectives of this study are outlined to provide the background for this thesis. Chapter 2 focuses on the principles of microresonators, the core devices of this study, as well as the basic theory and previous research on related nonlinear optical effects. Chapter 3 presents the fabrication process and performance evaluation of high-Q optical microresonators with diameters ranging from 100 μm to 1 mm. Specific attention is given to methods for doping erbium ions as the gain medium and incorporating carbon nanotubes or graphene as nonlinear loss materials. Chapter 4 discusses the design of an integrated mode-locked laser with a repetition frequency exceeding 100 GHz. Two approaches are discussed: a single-resonator model and a coupled-resonator model. For each approach, the conditions required for mode-locking are investigated through numerical simulations. In the single-resonator model, passive mode-locking is shown to be achievable by employing a high-Q microresonator with a Q-factor exceeding 10^8, provided a saturable absorber is introduced. In contrast, the coupled-resonator model demonstrates that passive mode-locking can also be realized without a saturable absorber, by utilizing a microresonator with a Q-factor of 10^8. Chapter 5 concludes the thesis by summarizing the findings and discussing prospects. This study demonstrates the potential of integrated passive mode-locked lasers based on microresonators, providing clear design guidelines and fabrication processes for achieving passive mode-locking.			