

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 木村 祥太

超短パルスを発生するカーレンズモード同期レーザーは、超高速現象の解明、光周波数コムによる超精密分光や非熱的なレーザー加工などに用いられてきた。高繰り返しモード同期レーザーは、光周波数コムにおいて縦モードパワーが大きく、かつモード毎の分離が容易であることから天文応用や超精密分光に有用である。また、GHz 以上の高繰り返しレーザーは加工において熱影響が小さく高品位加工ができると期待されている。さらに、通信において今後 Beyond 5G へと進む中で 20 GHz 以上の超高周波の RF 周波数源としてもレーザーのさらなる高繰り返し化が期待されている。本論文以前の世界記録は繰り返し周波数にして 15 GHz である。

このような背景のもと、本論文では Yb ドープ固体カーレンズモード同期レーザーにおいて、さらなる高繰り返し化に取り組んだ。モード同期レーザーにおける繰り返し周波数は共振器長と反比例する。木村氏はこれまで一般的に使われてきた共振器構造を半分にするタイプの新しい共振器構成を提案し、それを実現することで 24 GHz の繰り返し周波数をもつモード同期レーザーを実現した。さらに小型化を進め、Q スイッチ動作ではあるが 36 GHz の動作を確認した。その過程で、カーレンズモード同期における Q スイッチ動作についての理論を自ら構築し、その実験的検証を行った。

また、Yb:CALGO レーザーを作成中に利得がない波長にもスペクトルが広がる現象を発見した。これを精査したところ、レーザー利得媒質のなかで誘導ラマン効果によって長波長側にスペクトルが広がっているということ突き止めた。この効果を取り入れて幅の広いスペクトル発振をさせることで、Yb ドープ固体レーザーでも 22 fs まで短パルス化を行うことに成功した。これは Yb 固体レーザーで最短パルスである。

本論文は 7 章から構成されている。

第 1 章では序論として本研究の背景や位置づけ、構成を述べている。

第 2 章で超短パルスレーザーの設計の方法論として、共振器モードやモード同期の理論など超短パルスレーザーを作成する上で重要な理論が記述されている。

第 3 章ではモード同期レーザーの高繰り返し化についての研究内容が書かれている。一般的な 5 つの光学部品構成（4 枚のミラーと利得媒質）のリング共振器では、凹面ミラーの曲率半径をこれ以上小さくできないことから小型化の限界を迎えている。そこで、利得媒質の片面をミラーとすることで、3 つの光学部品での共振器構成を考案した。このようにすると共振器長の短いリニア共振器構成が可能となり、かつ励起レーザーのビーム品質を向上することができる特徴を有する。結果 24 GHz の繰り返しを達成した。さらに、2 つの光学部品でのみ構成される共振器を試したところ、Q スイッチ動作ではあるが、36 GHz の繰り返しを実現した。

第 4 章では第 3 章で得られた Q スイッチ動作について詳細に考察している。Q スイッチモード同期が起きた場合、これまで経験に基づきアライメントすることで cw モード同期を実現してい

たが、木村氏は Q スイッチ動作と cw 動作との違いを理論的に考察し、cw カーレンズモード同期の条件を定式化した。これにより、今後の共振器構成を設計する際の指針が得られた。

第 5 章では新たな共振器構成として、光学部品が一つのもの、つまりモノリシックな共振器を提案し、試作を行った。半球の形状のレーザー利得媒質を作成し、平面側と球面側にそれぞれミラーをコーティングした。およそ半径は 2 mm の半球面である。これを LD で励起することで縦モード間隔 44 GHz の cw レーザー発振を確認した。励起強度を上げていくとスペクトルが広がる挙動を見せたが、これがモード同期かどうかの確認までには至っていない。

第 6 章では誘導ラマンを利得としてもちいることで、広帯域発振をするレーザー発振器について議論している。もともと短パルス動作を見込んで Yb:CALGO カーレンズモード同期レーザーを作成していたところ、利得のないところまで長波長側にスペクトルが広がる現象を発見した。理論的な検証を取り入れ、この原因が誘導ラマン効果であることを実証した。Yb:Y₂O₃ など、他の結晶でも同様の現象を起こすことが確認され、レーザーの利得範囲以上にスペクトルを広げ、パルス幅を短くできる方法であることを確認した。Yb 系では最短パルスとなる、22 fs のパルス幅を実現した。

第 7 章は結論である。

以上のように、木村祥太氏はカーレンズモード同期の高繰り返し化と短パルス化に取り組み、レーザー共振器やレーザー結晶内の非線形光学過程を考察しながら光源開発を進めてきた。その結果、繰り返しでは 24 GHz という記録を作り、短パルス化では Yb 固体レーザーでは最短となる 22 fs のパルス発生を実現した。これはレーザーの応用を進めていくうえで重要な基盤技術であり、本研究の成果は今後の物理工学の発展に大きく寄与することが期待される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。