

論文の内容の要旨

論文題目 超高繰り返しカーレンズモード同期レーザーの開発

氏 名 木村 祥太

研究背景

フェムト秒の時間領域を扱う超高速科学は超短パルスレーザーと共に発展した。特に1991年に誕生したカーレンズモード同期レーザーは短い時間幅のパルスを安定に生成できることから、光周波数コムやフェムト秒レーザー加工、アト秒パルス発生 of 技術に先駆的な貢献をしてきた。近年のレーザー開発は超短パルスの時間幅だけでなく、波長やパルス波形、パルス列の繰り返し周波数など様々なパラメータに広がっている。本研究ではパルス列の「繰り返し周波数」に着目し、パルスの繰り返し周波数が20 GHzを超える世界最高繰り返し周波数のカーレンズモード同期レーザーを開発した。

パルスの繰り返し周波数が10 GHzを超える「超高繰り返し」領域では、超短パルスレーザーのユニークな応用が期待されている。例えば、光パルス列を信号源としてマイクロ・ミリ波帯の低ノイズ信号を発生させることができる。これを利用して電波望遠鏡やレーダー、通信への応用が期待されている。他にも、レーザーの縦モード間隔（繰り返し周波数）が商用分光器の分解能よりも広いため、縦モードを空間的に分離することができる。この性質を利用して天体光の波長を正確に決定するための参照用光源として活用が期待されている。縦モード間隔が30~40 GHzあれば主要な天文台の分光器ほぼ全てで縦モードを分解可能であり、この繰り返し周波数帯で波長帯域の広い光源が求められている。これらの要求に答えるためには超高繰り返し、かつパルス幅の短いレーザー光源が必要となる。

超高繰り返し超短パルス光を発生させる方法はこれまでにいくつか提案・実証されてきた。低繰り返し周波数のパルス列を通倍化する手法、連続波(CW)レーザーを電気光学効果により変調する手法、微小共振器内でCWレーザーを超短パルス化する手法、過飽和吸収体を用いた受動モード同期レーザーの高繰り返し化、そしてカーレンズモード同期レーザーの高繰り返し化である。これらの手法の中でカーレンズモード同期レーザーによる方法はロバスト、パルス幅が短い、パルスエネルギーが大きい、構成がシンプルといった特徴を有する。そのためカーレンズモード同期レーザーが高繰り返し化出来れば上記応用への強力な手法となる。

研究成果

カーレンズモード同期レーザーの繰り返し周波数世界最高値は2015年時点で15 GHz程度であった。この原因は繰り返し周波数がレーザーの共振器長で決定され、この共振器長の短縮に限界があったためである。特にこれまでの研究ではレーザーの共振器構造はそのままに光学素子を小型化することで共振器長を短縮していたため、5~7個ある微小な光学素子の位置制御が困難を極めた。そこで本研究では光学素子の少ない新たな共振器構造の開発に取り組んだ。

新たな共振器構造は三角形状にカットされた利得媒質、凹面鏡、平面鏡の3つの光学素子で構成した。この共振器構造は従来利用されてきたBow-tieリング共振器を半分にカットした形状の共振器であるためハーフカット共振器と呼んでいる。この共振器構造を採用したことにより繰り返し周波数24 GHz、パルス幅140 fsのカーレンズモード同期レーザー開発に成功した。これはカーレンズモード同期レーザーとして世界最高繰り返し周波数である。また繰り返し周波数を18~24 GHzに変調することにも成功し、応用展開に向けた有用性を示した。

更なる高繰り返し化を目指し、三角形状にカットされた利得媒質、凹面鏡の二つの光学素子でカーレンズモード同期レーザーを構成した。このとき繰り返し周波数36 GHzのパルス列を観測したものの、パルス毎の強度が不安定となるQスイッチ不安定性と呼ばれる現象が発生した。Qスイッチ不安定性を抑制するためにいくつかの実験的検討を行ったが抑制には至らなかった。この一因はカーレンズモード同期レーザーにおけるQスイッチ不安定性がこれまで研究されておらず、抑制方法の理解が不十分であったことである。そこで本研究ではQスイッチ不安定性について理論・実験の両面から詳しく調べた。

Qスイッチ不安定性の基本原理は1970年代に導出され、共振器内の非線形損失が原因であることが明らかにされていた。本研究ではこの理論をカーレンズモード同期レーザーに適用できるよう拡張し、Qスイッチ不安定性を抑制するために鍵となるパラメータを発見した。さらにこれらを確認するために新たにレーザーを構築し、理論と実験が定量的に一致することを確認した。

本研究で構築したQスイッチ不安定性の理論によると、Qスイッチ不安定性を抑制するためには共振器内のレーザー光と励起光を良く重ねる必要がある。我々が開発した繰り返し周波数36 GHzのQスイッチカーレンズモード同期レーザーには共振器構造に由来するビームの非点収差が存在し、この非点収差が共振器内のレーザー光と励起光の重なりを悪くしていることがわかった。そこで非点収差が生じない新たな共振器構造を提案した。この共振器構造により、カーレンズモード同期レーザーの更なる高繰り返し化が実現可能と考えている。

カーレンズモード同期レーザーの高繰り返し化と平行して、超高繰り返しカーレンズモード同期レーザーの短パルス化に関する研究も行った。一般的にパルス幅の短いレーザーを実現するには、利得帯域幅の広い利得媒質を用いる。しかし帯域幅の広い利得媒質の開発は頭打ちとなっており、他の短パルス化手法が求められていた。本研究では利得媒質内で誘導ラマン散乱を生じさせ、レーザーの帯域を広げることで短パルス化を行う新たな手法を提案・実証した。実際に繰り返し周波数1 GHzのYbドープレーザーを作製し、22 fsの時間幅を有するパルス発生に成功した。このパルス幅はYbドープレーザーとして2018年当時で最短のパルス幅である。また異なる種類のレーザーにおいても同様の現象を確認し、本手法の一般性を確認できた。本手法は利得媒質の母材の設計にラマン効果という新たな自由度を与えるものであり、超高繰り返し超短パルスレーザーの開発に資する内容と考えている。

まとめ

本研究ではカーレンズモード同期レーザーとして世界最高繰り返し周波数24 GHzを有するレーザーの開発に成功した。また更なる高繰り返し化を阻む要因としてQスイッチ不安定性を発見し、その抑制方法を理論的・実験的に解明した。そして、この理論に基づいてQスイッチ不安定性を抑制可能な新たな共振器構造を提案した。これらの研究に加えて、限られた共振器空間内でパルス幅を短縮する新たな手法として、誘導ラマン散乱を誘起する方法を見出した。以上の成果は超高繰り返しパルスの新たな応用を切り拓くのみならず、超短パルスレーザーの設計に新たな指針を与えたと考えている。