

Ultrashort pulse generation in 2- μm laser oscillators based on Tm-doped sesquioxides

Tm 添加 sesquioxide を用いた波長 2 μm 帯レーザーの超短パルス化

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻 戸倉川研究室 鈴木杏奈

2023 年 3 月 7 日

本論文は、広帯域な利得を実現する新規手法により波長 2 μm 帯 Tm レーザーの超短パルス化を目指す研究に関するものである。Tm レーザーは高効率・高出力動作可能な波長 2 μm 帯コヒーレント光源として知られ、高出力半導体レーザー(LD)励起、そして通信帯で用いられるガラスファイバーの利用が可能であり、高出力化を目指した連続波(CW)や Q スイッチレーザー等の研究が中心になされてきた。その後、光周波数コムや非線形波長変換の基本波としての応用が期待され、モード同期による超短パルス発振が注目され始めた。ファイバーレーザーでは 2000 年代から、そして 2010 年代からは固体バルク材料を用いたモード同期レーザーの研究が盛んになった。しかし Tm³⁺は希土類イオンであり Cr²⁺などの遷移金属レーザーに比べ利得帯域幅が狭いため超短パルス発振はあまり得意としていない。さらにレーザー光源の歴史が古い近赤外域に比べ、波長 2 μm 帯では可飽和吸収体などモード同期技術が成熟しておらず、当初はピコ秒 (ps) 程度のパルス幅しか実現することができなかった。そこで、より広帯域な利得を得るための宿主材料の開発やモード同期技術の改良の研究が行われ、現在では 100 fs 以下の超短パルス発生が可能になった。しかしながら、有限の利得幅の中で超短パルス化を試みる場合、低い透過率の取り出し鏡を用いて線形損失を小さくした共振器を構成することが多く、結果として短パルス性と高出力性を両立することは難しい。

本研究では、高出力性を兼ね備えた超短パルス発生のため、より広い利得帯域を得る 2 つの新規手法を提案した。1 つは、複数の異なる利得材料を用いた複合利得媒質である。異なる利得媒質を同一共振器内で使用することで、両者の利得スペクトルを同時に利用することができる。本研究で用いた Tm:Lu₂O₃、Tm:Sc₂O₃ は 1950 nm と 2070 nm、および 1980 nm と 2100 nm 付近に利得のピークを持つため、これらのスペクトルを線形に結合することで実効的に広く平坦な形状の利得スペクトルを得ることができる。この 2 つの利得媒質を同時に用いて、連続波(CW)およびカーレンズモード同期レーザー発振実験を行った。CW の波長可変実験では、両媒質の利得帯域全体に及ぶ 1962-2252 nm の波長可変幅が得られた。カーレンズモード同期実験では、透過率 1% の出力鏡を用いて平均出力 81 mW において 52 fs のパルス幅が得られた。そして、更なる短パルスを得るため、出力鏡を透過率 0.5% の

ものに変更し、低損失の共振器を構築した。その結果、中心波長 2094 nm において半値幅 100 nm 以上の広帯域なモード同期スペクトルを得ることができた。これは両媒質の利得帯域を同時に用いることで利得帯域が拡大されたことによって実現された。

利得帯域の拡大のためのもう一つの手法は、新規母料、混晶 sesquioxide の開発である。混晶 sesquioxide は、3 種類の立方晶の sesquioxide の混合組成 $(\text{Lu}_x\text{Sc}_y\text{Y}_z)_2\text{O}_3$ ($x+y+z=1$) からなっている。希土類を添加した混晶 sesquioxide は、混合組成中の様々な結晶場強度に起因する不均一広がりにより、広帯域で平坦な形状の利得スペクトルを示すことから超短パルス発生に適している。さらに、従来の sesquioxide は 2350°C 以上の極めて高い融点を示すのに対し、混晶では融点が 2150°C を下回る組成が存在する。これにより、従来のチョクラスキー(Cz)法による高品質な大型レーザー結晶の育成が可能となる。本研究では、イリジウムつぼから Cz 法により新規 Tm:YScO₃ 単結晶を育成し、結晶光学および分光特性を明らかにした。CW レーザー実験では 1611 nm の Er:Yb ファイバー-MOPA 励起により透過率 5% の出力鏡を用いて最大 51% のスロープ効率を達成し、また波長可変実験では 1950 nm から 2152 nm の可変幅が得られた。これらの結果より、混晶 sesquioxide の超短パルスレーザーの利得媒質としての有用性が示された。

以上より、複合利得媒質では利得帯域の線形結合により実効的な利得帯域幅を広げることになり成功し、カーレンズモード同期によりこれまでの Tm 添加固体レーザーの最短パルス幅を大幅に更新した 41 fs の最短パルス幅を実現した。混晶 sesquioxide の開発では、Tm 添加 YScO₃ 結晶の育成及び分光・レーザー特性評価を行い広帯域かつ平坦な利得のプロファイルを確認した。双方の手法において従来の単一利得媒質の限界を超えた利得の広帯域化に成功し、高出力性と超短パルス性を兼ね備えた Tm レーザーの実現に向け有効な手法であることを示した。