

# High Power Ultrafast Thin-Disk Lasers

## Based on Yb-doped Ceramics

Yb 添加セラミック媒質を用いた高出力超短パルス薄ディスクレーザーの研究

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻 白川晃研究室 北島将太郎

2019 年 3 月 25 日

本論文は、Yb<sup>3+</sup>添加セラミック材料を用いた実験的研究に関するものである。研究内容として、3 種類の Yb<sup>3+</sup>添加セラミック材料の特性評価、バルク型媒質を用いたモード同期実験、thin-disk 型媒質の作製と、それを用いた高出力連続波(CW)発振実験および Kerr レンズモード同期(KLM)発振による高出力超短パルス発振実験を行った。モード同期により実現される超短パルスレーザーは、極めて短いパルス幅と高いピークパワーを持ち、加工などの産業分野や、高次高調波発生、非線形分光、高エネルギー物理学などの幅広い応用に用いられている。中でも近年目覚ましい発展を遂げた Thin-disk レーザーは、高平均出力・短パルス・高ビーム品質を兼ね備えた光源として注目を集めている。Thin-disk レーザー用の媒質としてはこれまで Yb:YAG が独占的に用いられてきたが、これは熱伝導率や利得帯域幅など必ずしも理想的でない特性を持っていた。そのため thin-disk レーザーの更なる特性向上の為の新たな利得媒質の開発が望まれてきた。本研究においてはこのような課題を解決できる一つの選択肢として、セラミックレーザー媒質を用いた thin-disk レーザーの研究に取り組んだ。セラミックは単結晶と比べて機械的特性の向上や高濃度添加等の可能性があり、高出力レーザー用媒質として重要な材料であるが、thin-disk 用のレーザー媒質としてはこれまで広く研究はなされてこなかった。従って本研究ではセラミック材料を用いた thin-disk レーザー媒質を作製し、高出力な超短パルスレーザー動作を実証することで、その有用性を証明することを目的とした。またそのための付随する研究として、thin-disk レーザーにおける KLM 共振器の設計を非線形 ABCD 行列計算を用いて行った。

本論文では神島化学工業(株)との共同研究にて開発した Yb:Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (LuAG)セラミックと Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミック、(株)ニコンとの共同研究にて開発した Yb:CaF<sub>2</sub>-LaF<sub>3</sub> セラミックという 3 種の材料を対象として研究を行った。

Yb: LuAG セラミックと Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミックの 2 種は高い熱伝導率と高い破壊靱性、高い利得を併せ持ち、高出力なレーザー媒質としての応用が期待される。本研究では 10 at.% 添加 Yb:LuAG セラミックと 3 at.% 添加 Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミックの 2 つを用いて Thin-disk レー

レーザー媒質を作製し、CW レーザー発振実験と KLM レーザー発振実験を行った。結果 CW レーザー発振実験にて Yb:LuAG で最高出力 200W、最大励起密度 5.9 kW/cm<sup>2</sup>、スロープ効率 55%、Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミックで最大出力 176W、最大励起密度 5.5 kW/cm<sup>2</sup>、スロープ効率 53% をそれぞれ達成した。これより本研究で開発した thin-disk 作製手法が十分に高い破壊しきい値と再現性を達成できることが確認された。

KLM レーザー発振実験においては Yb:LuAG で平均出力 16W、パルス幅 161 fs を達成した。Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> セラミックにおいては平均出力 3.7W、パルス幅 98 fs の動作を実現した。また最短パルス幅 86 fs を得た。これはセラミック材料を用いたモード同期レーザーとして世界最高の出力であり、単結晶を含めても同パルス幅以下の結果において世界で 2 番目の出力である。これにより本材料及びセラミック材料の thin-disk レーザーとしての有用性が実証された。また共振器の延長による更なるパワースケーリングの可能性を示した。

Yb:CaF<sub>2</sub>-LaF<sub>3</sub> セラミックは非常に広帯域な材料として知られる Yb:CaF<sub>2</sub> をベースにした材料であり、LaF<sub>3</sub> を共添加する事により光学的特性の改善を行った。Yb:CaF<sub>2</sub> は単結晶の状態だとその高い劈開性により thin disk レーザーに用いるのは難しかった。セラミックはそれを構成する微結晶ごとの結晶軸がランダムで劈開が生じないため、その問題を解決できる可能性がある。まずバルク形状の同材料を用いた CW レーザー発振実験にて LaF<sub>3</sub> の添加濃度に依存したレーザー発振効率の向上を確認し、最大 69% の高いスロープ効率を得た。また同材料を用いた世界初のモード同期レーザー発振を実現し、パルス幅 190 fs、出力 300 mW を得た。同材料を用いた thin-disk も作製し、CW レーザー発振動作を実証した。

セラミックレーザー媒質を用いたモード同期 thin-disk レーザー発振は世界で 2 例目の報告であり、特に Kerr レンズモード同期の実証は世界初であった。得られた出力の特性は単結晶による世界最先端の光源と比べても劣らないものであり、これによりセラミック thin-disk の超短パルスレーザー光源への有用性が実証された。