

Thin-disk lasers based on Yb³⁺-doped ceramics

Yb³⁺添加セラミック材料を用いた thin-disk レーザーの開発

白川研究室 中尾 博明

2015年3月25日

本論文では、Yb³⁺添加セラミック材料を用いた thin-disk レーザーの特性評価及び高効率・高出力動作の実証、また利得媒質とヒートシンクの独自の接合工程の開発を行った。

現在、高出力レーザーは加工等の産業応用が盛んに行われており、基礎研究においても新たな分野の開拓が成されている。光源に対しては、主として高効率、高出力、高輝度であることが要求されるが、従来用いられていたバルク型、ファイバー型のレーザーでは、熱光学的歪曲や非線形性の抑制に課題があった。これらの問題に対して、thin-disk 型のレーザーは優位な特性を示す。薄い利得媒質 (100~500 μm) を面冷却することから、高い冷却能力及び小さな非線形性が得られる。更に熱流束がレーザーの光軸と同軸であるため、熱光学的歪曲の最小化が可能となる。また利得媒質として、低発熱かつ高効率動作が可能な Yb³⁺添加材料を用いることで、特に高平均出力超短パルスレーザー動作に優位性を示し、近年、急速に実証や製品化が進んでいる。しかし、ほぼ全ての光源において単結晶材料が用いられている。セラミック材料での実証例はほぼ無く、その理由も不明である。セラミック材料は単結晶材料と比較し、機械的強度の向上や高濃度添加等の可能性があり、高出力レーザー光源用利得媒質として重要な材料である。従って、セラミック材料を用いた thin-disk レーザーの実証を行い、セラミック材料の有用性の評価を行うことを目的とした。また他の目的として、利得媒質とヒートシンクの独自の接合工程の開発がある。接合部の品質は、thin-disk レーザーの性能を左右する最も重要な点である。しかし、接合はドイツの一部企業・大学のみでしかできず、世界的に thin-disk レーザーは大きくドイツに依存している。従って、ドイツの研究機関と競合するため、また、研究途上で発生した問題や要求に柔軟に対応することができる環境を構築するためにも、独自の接合技術の開発は必要不可欠である。

評価を行う材料として、thin-disk レーザーで特に顕著になる問題の解決が可能な材料に注目した。Thin-disk レーザーは相互作用長が短く、励起光吸収量や利得が小さい。これらを補うために、利得媒質に複数回励起光を入射するマルチパス励起光学系や、高濃度添加材料が用いられる。しかし、Yb³⁺イオンの添加濃度の増加に伴い、熱伝導率の低下や強励起時の非線形過程の増加が発生する。前者は Yb³⁺イオンと置換される母材の質量差に起因するため、Yb³⁺イオンとほぼ同等の質量を持つ Lu³⁺イオンを含む材料を用いることで抑制可能である。後者は特に添加濃度分布の制御が困難な単結晶で問題となるもので、添加濃度の上限を制限している。これは、我々が神島化学工業と共同開発した非反応性焼結法による、均一な添加濃度の制御により抑制が可能である。以上より、Lu を含むセラミック材料が望ましく、その中でも特に Lu₃Al₅O₁₂ (LuAG) 及び Lu₂O₃ に注目した。Yb:LuAG は、現在最も重要な利得媒質である Yb:Y₃Al₅O₁₂ (YAG) と類似した材料であり、高濃度添加と高熱伝導率の両立が可能である。また、Yb:YAG と比較し利得が大きく、増幅器として有望な材料である。Yb:Lu₂O₃ は Yb:YAG と比較し、高い熱伝導率及び広い利得帯域幅を示す。超短パルスレーザー発振器として重要な材料であるが、融点が高く大口径な単結晶育成が困難である。セラミックであれ

ば、融点以下での焼結が可能であるため大口径な媒質の作製が可能である。

10 at.% Yb³⁺添加 LuAG セラミックを用いて thin-disk レーザーの特性評価を行った。最大出力・効率等の評価のために連続 (CW) 空間多モード発振実験を行った。厚さ 150 μm の試料を用いて、最高出力 166 W、スロープ効率 72%、光-光変換効率 60%を実証した。これは現在単結晶 Yb:LuAG で報告されている効率と同等である。次に共振器設計による試料上での TEM₀₀ モード径の制御を行い、CW 空間単一モード発振実験を行った。試料上での TEM₀₀ モード径を励起光径の 80%に制御することで、厚さ 200 μm の試料にて回折限界に近いビーム品質 ($M^2 = 1.22$) を達成した。また、薄いセラミック材料での影響が懸念される、偏光解消効果についても評価を行った。共振器内に偏光選択のためのプリュースタ板 (BP) を挿入し、出射ビームの偏光度及び偏光解消による損失の評価を行った。厚さ 200 μm の試料において、偏光度は約 99.5%、共振器一周での偏光解消による損失は約 0.15%であった。これらの結果から、セラミック材料が thin-disk レーザーでも有用であることが明らかにされた。

3 at.% Yb³⁺添加 Lu₂O₃ セラミックを、開発した接合行程にて接合し、自作のマルチパス励起光学系を用いて thin-disk レーザーの特性評価を行った。接合方法として、In-Sn ハンダを用いた接合及び、エポキシ樹脂を用いた接合の 2 種類を開発した。厚さ 300 μm でハンダ接合された試料を用い、スロープ効率 61%、光-光変換効率 45%の CW 空間多モード発振を実証した。また、厚さ 250 μm でエポキシ接合された試料を用い、スロープ効率 56%、光-光変換効率 44%の CW 空間多モード発振を実証した。この時、最大励起密度は一般的な破壊閾値 (5 kW/cm²) に近い 4.4 kW/cm²に達したが、試料の破損やレーザー動作に不安定性等は観測されなかった。また、接合試料のサーモグラフィー測定から、より高い励起密度 (6 kW/cm²以上) での thin-disk レーザー動作の可能性も示唆された。これらの結果より、接合工程の基盤技術の確立が証明された。