

Yb 添加 Thin-disk レーザーの研究

白川晃研究室 晝場流星

1. 序論

高出力な超短パルスレーザーに用いられる利得媒質には高い機械的・熱的特性、光学的特性など求められる条件が多い。Yb³⁺添加材料は半導体レーザー(LD)による直接励起が可能であり、また、量子効率が高いなどの利点があることから世界でも盛んに研究が行われている材料である。中でも Yb³⁺ 添加 Lu₃Al₅O₁₂(以下 Yb:LuAG)は、添加する Yb イオンと置換される Lu イオンの原子量が非常に近いことから、高い添加濃度と高い熱伝導率を両立できる材料として注目を集めている。また、セラミックス化することにより単結晶よりも高い機械的特性を得ることができ、大口径な試料の作製も容易となる。したがって高出力・高効率なレーザーの利得媒質として最適と考えられる。

利得媒質の持つ特性以外にも、レーザーの高出力化には熱光学効果を抑制することが必要不可欠である。レーザー動作中に媒質内に生じる熱をうまく排出できなければ、熱レンズ効果や熱複屈折効果といった熱光学効果によってビーム品質の劣化、出力限界の低下を招く。Thin-disk レーザーは熱光学効果を抑制し、更なる高出力化を実現するために考

案された技術である。本研究では、Yb:LuAG セラミックスを用いた Thin-disk レーザーのモード同期発振の研究を行った。

2. Yb:LuAG セラミックスの材料特性

YAG を始め、一般的な利得媒質は発光イオンの添加濃度の増大とともに熱伝導率が急激に低下してしまう問題があった。それは置き換えるイオンとの原子量の違いが大きいほど顕著である。先述の通り、LuAG は Yb と Lu の原子量が 173 g/mol と 175 g/mol と非常に近い。したがって図 1 のように YAG と比べて添加濃度の増加に対して熱伝導率の低下の様子は緩やかであり、添加濃度 10 at.%時でも熱伝導率の低下は無添加時と比べて数%に留まっている。

図 2,3 には吸収と放出のスペクトルを示す。968 nm 付近に吸収と放出の等しいゼロラインが存在し、吸収のピークもそこにある。しかし、940 nm 付近に広い吸収帯があり、そこは LD による直接励起に適している。1030 nm の放出断面積は YAG の 1.25 倍にもなり、より高効率な動作が可能である。

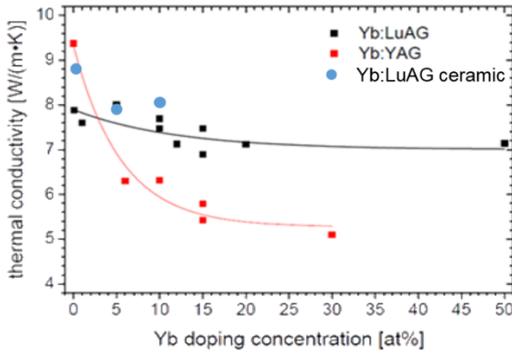


図 1 熱伝導率の Yb 添加濃度依存性[1,2]

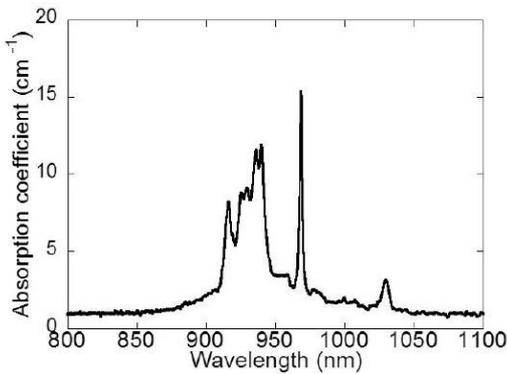


図 2 Yb:LuAG の吸収スペクトル[3]

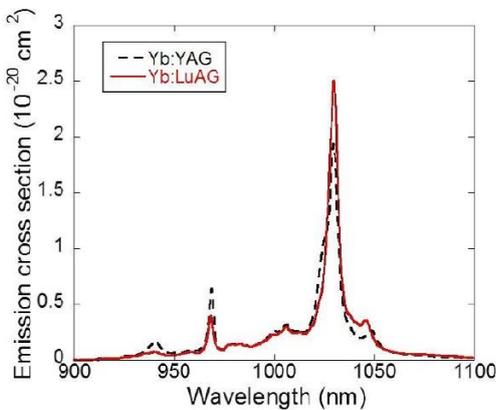


図 3 Yb:LuAG の放出スペクトル[3]

3.Thin-disk レーザーの原理

媒質に生じる熱は中心から放射状に排出されるのでレーザー光の断面方向には温度分布が形成され、熱光学効果によって高出力化が妨げられる。Thin-disk は利得媒質を非常に薄いディスク

状にした上、背面をヒートシンクで一様に冷却することによって高い冷却能力を得るとともに、排熱の方向をレーザー光の光軸と同一にして熱光学効果を抑制することができる。図 4 に Thin-disk レーザーの概念図を示す。

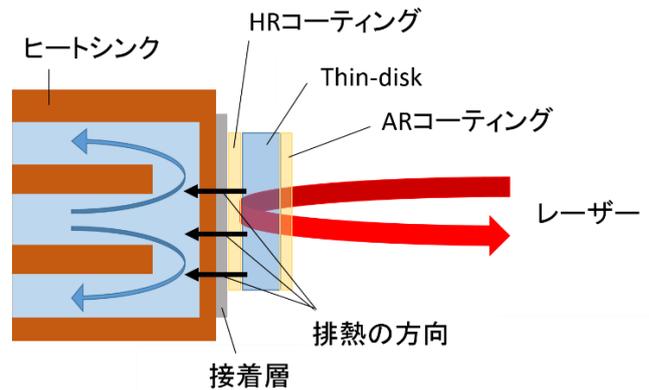


図 4 Thin-disk レーザーの概念図

Thin-disk レーザーの持つ欠点として、利得媒質が非常に薄いことに起因する吸収長の短さがある。そのため、一度の励起光の通過では十分な励起が得られない。そこで、Thin-disk レーザーでは発光イオンの高濃度添加と、励起光を一往復で複数回ディスクに入射させるマルチパス励起が用いられる。図 5,6 にマルチパス励起光学系の概念図を示す。

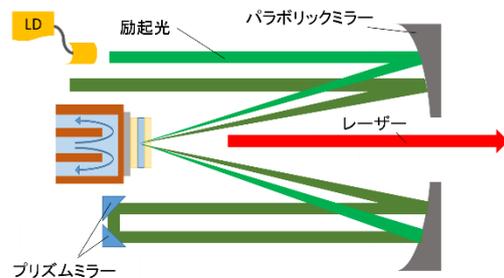


図 5 マルチパス励起光学系の概念図

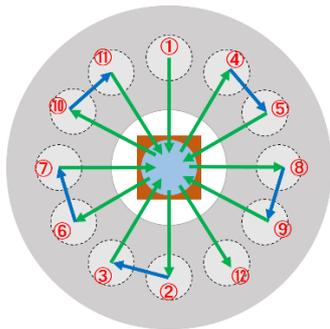


図 6 パラボリックミラーの反射位置

まず、LD から出た励起光はコリメートされてパラボリックミラーに入射する。パラボリックミラーによって集光された状態でディスクに入射し、パラボリックミラー上の 180 度ずれた位置へ反射される。そこで再び平行光になった励起光は、2 枚 1 組のプリズムミラーによってパラボリックミラー上の少しずれた位置へ折り返されてもう一度ディスクへ入射する。このプロセスをパラボリックミラーの反射位置全てを使うまで繰り返して励起を行っている。吸収されなかった励起光は光学系の外へ行くが、反射鏡を置くことで同じ経路を折り返すことになり、さらに 2 倍のパスを得ることができる。図 6 は 12 パスでのパラボリックミラー上の反射位置を示している。緑色の矢印はディスクへの入射とディスクからの反射から得るパスであり、青色の矢印はプリズムミラー間の光路である。

4.実験

本研究で用いた共振器を図 7 に示す。

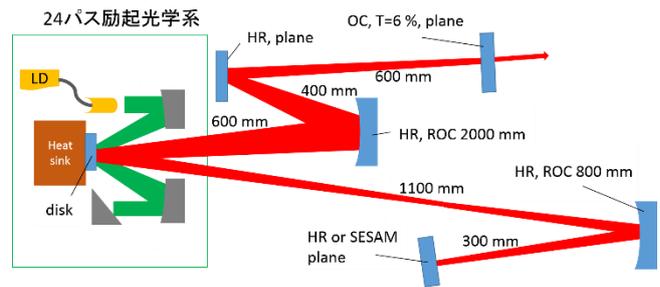


図 7 共振器構成

利得媒質には厚さ 200 μm で Yb 添加濃度 10 at.% の LuAG セラミックを用いており、エポキシ樹脂によってヒートシンクに接着されている。LD には波長 940 nm のものを用い、24 パスの励起光学系によってディスク上で直径 2.9 mm に集光されている。この共振器はディスク上でのレーザー光の集光径が励起光径の 60% となるように設計されており、 TEM_{00} のみモードマッチが良くなるようにしている。まず、エンドミラーを高反射鏡(HR)にしたときの CW 発振の入出力特性を測定した。

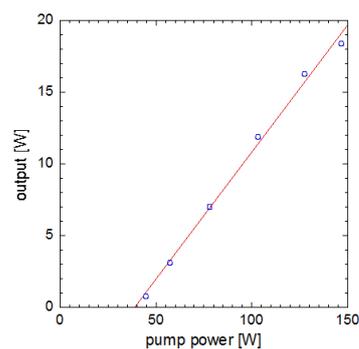


図 8 CW 入出力特性

発振閾値 39 W、最大出力 18 W、スロープ効率 は 18% であった。また、励起パワー 56 W 時のビームプロファイルを図

9に示す。

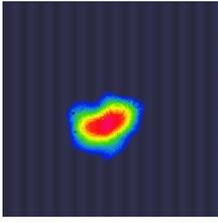


図9 ビームプロファイル

このときビーム品質を表す M^2 は x 方向は1.36、 y 方向は1.00であり、 TEM_{00} のシングルモードに近い状態であった。ただし、出力を上げると高次の横モードが発振して、ビーム品質は劣化してしまった。

次にエンドミラーを変調深さ0.3%のSESAMに置き換えてモード同期発振を試みた。オシロスコープ上で図10のようなQスイッチパルスが確認された。

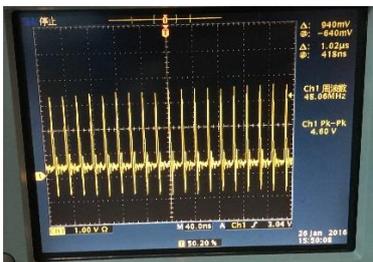
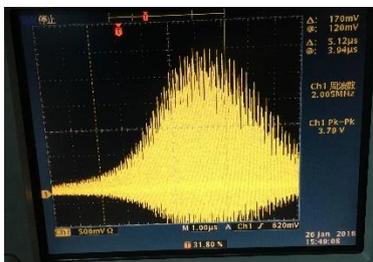


図10 Q スイッチパルス(上)と拡大図(下)

このとき、励起パワーは124 W で出力は2.4 W と非常に低効率であった。得られたパルスの繰り返し周波数は48MHzであり、共振器の長さ3 m から計算でき

るモード同期パルスの繰り返し周波数50 MHzに近かったため、Q スイッチモード同期が得られたといえる。

5.まとめ

非常に低効率ながら Yb:LuAG セラミックを用いた Thin-disk レーザーにおいて初めてモード同期が実現された。効率が低い原因としては、HR から SESAM に置き換えただけで出力が急激に落ちたことから、SESAM 表面の傷による散乱損失が大きいと考えられる。

今後は、ピーク出力が一定な CW モード同期を得るために、SESAM の交換の他に OC の最適な透過率の検討、分散補償と同時に共振器をさらに伸ばすなどして共振器内のパルスエネルギーを大きくする必要がある。さらにディスク上でのレーザー光の集光径を励起光径の80%まで広げて TEM_{00} のモードマッチをより良くする必要がある。

参考文献

- [1] S. Kitajima, *et. al.*, CLEO/EUROPE-EQEC 2015, CA-2.5, Munich, Germany, Jun. 21, 2015.
- [2] K. Beil *et. al.*, Optics Express **18**, 20, 20712 (2012).
- [3] 中尾博明, 電気通信大学大学院平成23年度修士論文.