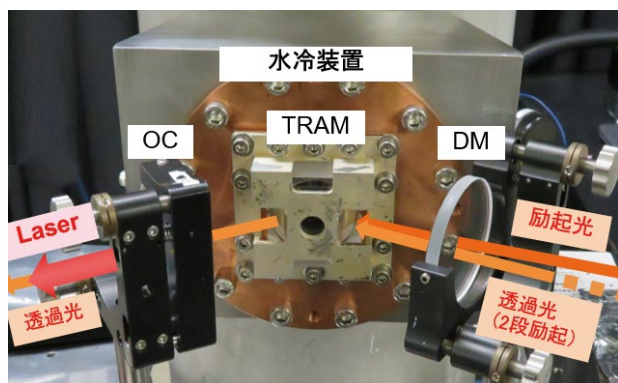
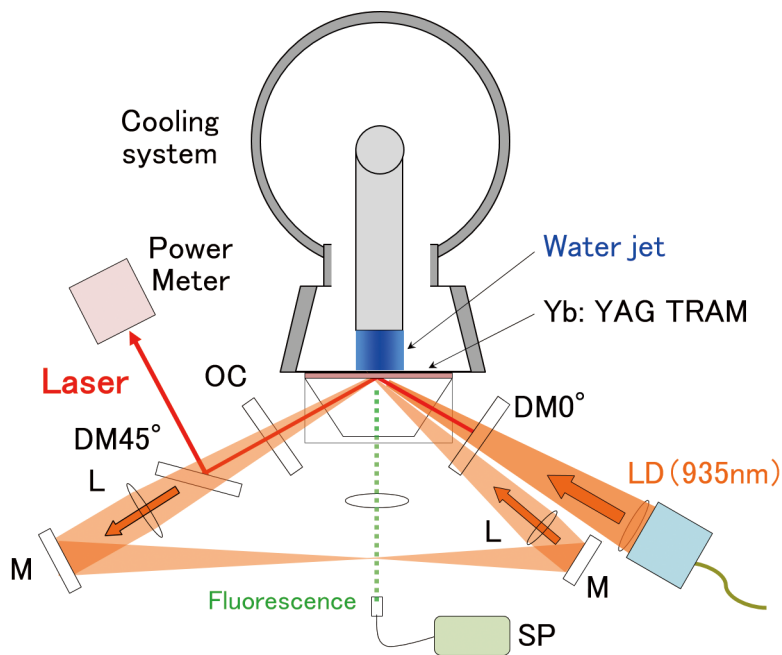


CONTENTS

- 常温動作高平均出力 Yb:YAGレーザーの開発
- 2019年 第66回応用物理学会 春季学術講演会報告



【表紙図】水ジェット冷却および2段励起方式による高出力レーザー発振試験 (左)装置写真、(右)配置図



常温動作高平均出力 Yb:YAG レーザーの開発

レーザー計測研究チーム 谷口誠治

レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン

レーザープロセス研究チーム 藤田雅之

レーザーエネルギー研究チーム 李 大治

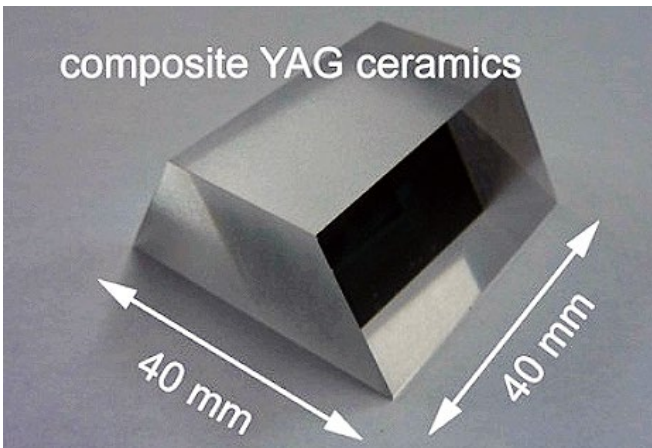
レーザー技術開発室 本越伸二

■はじめに

固体レーザー材料としてのYb:YAGは、励起量子効率が大きく熱損失が小さい、蛍光寿命が長いことエネルギー蓄積能力が高いなどの特長から、高出力、高パルスエネルギー用のレーザー材料として期待される。当研究所では、Yb:YAG層を底面に接合したYAGコン

ポジット(Yb:YAG TRAM (Total-Reflection Active-Mirror、全反射型アクティブミラー方式)) (図1)をレーザー媒質に用いた常温(~300 K)で動作する高平均出力固体レーザーの開発を目標に研究を進めてきた。

高出力固体レーザー開発における最重要課題の一つ



【図1】Yb:YAG TRAM の写真

にレーザー媒質の発熱対策があり、二つの手法を検討してきた。第一は、媒質自体の発熱を抑制するゼロフォノンライン(ZPL、969 nm)励起の導入である。969 nm励起を用いた場合、励起波長と発振波長(1030 nm)のエネルギー差が小さくなるため、通常用いられる940 nm励起に比べ発熱損失を約32%抑制できる。第二は、除熱性能の大きい冷却技術の開発である。新たな手法としてTRAMの裏面に冷却水の噴流を直接吹き付けて除熱を行う衝突噴流(ジェット)冷却法の導入を進めてきた。この手法は、噴流により冷却面上の水を強制的に入れ替える(強制対流)ことで高い除熱性能が得られ、また水の沸騰により冷却面上に発生する気泡を物理的に除去できるため、突沸(膜沸騰)による除熱能力の急激な低下を防止できるという利点がある。これまでの研究で、ZPL励起による発振効率の増加(Laser Cross No 361, 2018 Apr.)や、水ジェット冷却による除熱能力の向上がレーザーの高効率化、高出力化に有利に働くこと(Laser Cross No 368, 2018 Nov.)を明確にした。さらに試験結果の分析により、kW級高出力化に向けた具体的な条件も明らかになってきた。本稿では、これまでの成果に基づき、kW級のレーザー出力を実証することを目標に高励起パワー(~2 kW)条件でのレーザー発振試験を行った結果について報告を行う。

■多段励起方式を導入

表紙図に試験配置図を示す。媒質の冷却には、噴流の速度および温度の調整が可能な水ジェット冷却法を用いた。TRAMの背後から水を高速で噴出させ底面を

直接冷却する。レーザー媒質には吸収パワーに対するレーザー出力特性の良いYb濃度5 at%–層厚0.6 mmのTRAMを用いた。励起光源には、現状で2 kW以上の励起パワーが得られる波長935 nmのLDを用いた。TRAMの近傍にダイクロミックミラー(DM 0°)、結合出力ミラー(OC、反射率85%)を配置し、共振器を作成した。媒質の光吸収率を考慮し、励起には多段励起(2段)方式を用いた。1段目の励起で媒質に吸収されなかった光を再度媒質に入力することにより、励起パワーに対する吸収パワーの比率が増加するため、出力の効率化が可能となる。励起ビーム径は $\phi 7$ mmあるいは $\phi 6$ mmとした。また分光器(SP)により媒質の蛍光スペクトルを同時計測して励起中心部の温度を推定し、光吸収率の温度依存性から吸収パワーを求めた。

図2に、1段励起と2段励起時の吸収パワーに対するレーザー出力を比較したものを示す(最大励起 1.8 kW)。励起ビーム径は $\phi 7$ mm、冷却水温は19 °C(± 1 °C)とした。励起パワーの最大値は1.8 kWである。多段励起化により変化するのは吸収パワーのみであるため、出力特性(発振しきい値、スロープ効率)は両条件で同一となる。このため励起パワーが同じ場合、吸収パワーがより増加する2段励起の方が出力も増加する。1.8 kW励起時で比較(図2を参照)すると、2段励起により出力が約1.5倍増加することが確認できた。

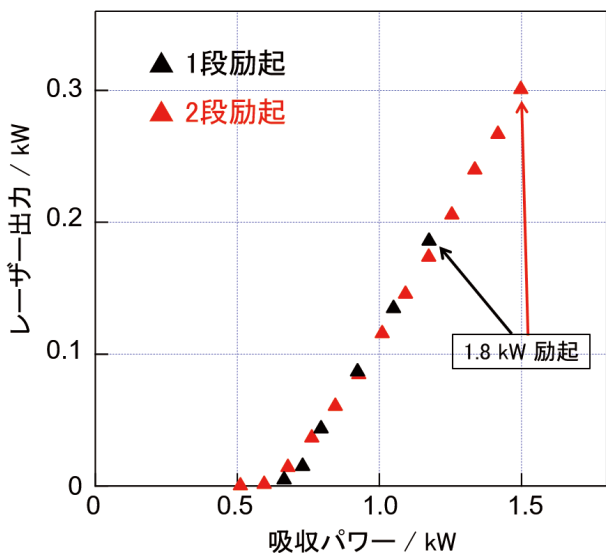
図3に、2段励起を用いて励起パワーを最大2.3 kWまで増加させた際のレーザー出力特性を示す。励起ビーム径は $\phi 6$ mm、冷却水温は19および12 °C(± 1 °C)とし、除熱性能による出力特性の変化についても比較した。水温19 °Cの時レーザー出力は最大720 Wに達した。スロープ効率は約60%であった。さらに、冷却水温を12 °Cまで低下させると出力はさらに増加した(最大750 W)。この結果は、低水温でのジェット冷却は除熱能力が向上し出力が増加するという前回の報告(Laser Cross No 368, 2018 Nov.)と合致するものである。実際に冷却水温12 °Cでの媒質温度を計測すると、19 °C冷却時に比べ約10 °C低下することも明らかとなっている。

本研究では、水ジェット冷却法および2段励起方式を用いて高励起パワー(~2 kW)条件でのレーザー発振試験を行い、レーザー出力の効率化に対する多段励起の有為性を明らかにするとともに、最大で750 Wの

出力を得た。これらの手法をさらに発展させることにより、kW級の高出力化は十分に可能である。

◇◇◇

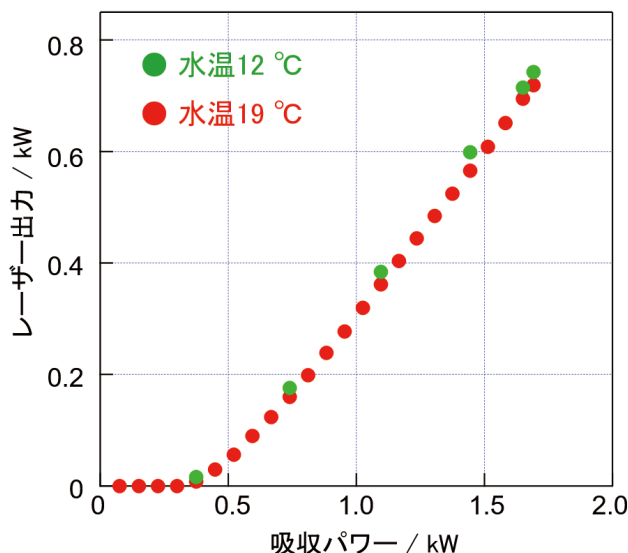
現時点で我々は、すでに1 kWを越えるレーザー出力を実証している。その詳細は7月開催予定の成果報告会、ならびに本誌にて報告する予定である。



【図2】1段および2段励起時の出力特性の比較

謝辞：

本研究の一部は、安全保障技術研究推進制度(研究課題名「ゼロフォノンライン励起新型高出力Yb:YAGセラミックレーザー」)の支援を受けて実施した。水噴流冷却装置の開発は、三菱重工業株式会社との共同研究として行われた。ご協力に深く感謝いたします。



【図3】高励起パワー(最大2.3 kW)条件(2段励起)での出力特性と冷却水温度による特性変化



2019年 第66回応用物理学会 春季学術講演会報告

■応用物理学会春季大会が東工大で開催

去る3月9日～12日、東京工業大学大岡山キャンパス(目黒区)にて2019年第66回応用物理学会春季学術講演会が開催された。応用物理学会の講演会は春季、秋季の年2回開催される。春季大会の方が規模は大きく、今回も合計で約4000件(口頭発表約2600件、ポスター発表約1200件)の発表が行われた。講演会には光・フォトンクス、放射線・プラズマ、量子エレクトロニクス、有機分子・バイオエレクトロニクス、半導体、結晶工学など14の大分類分科会が設置され、広範囲の研究領域をカバーしている。また分科会ごとに企画されるシンポジウムや、境界領域を扱う合同/コードシェアセッ

レーザー計測研究チーム 谷口誠治

ション、講演会参加者以外にも自由に参加できる特別シンポジウムなども多数開催された。ポスター会場に併設された展示会(JSAP EXPO)には計測機器や材料関連など160の企業・団体が出展し、産業界とのつながりも深い。以下に、本講演会におけるレーザー開発や応用に関する研究トピックをまとめる。

■誘導ラマンを用いた広帯域モード同期レーザー

フェムト秒モード同期レーザーのパルス幅は、レーザー媒質の発光帯域によって制限を受ける。その制限を越える広帯域化(短パルス化)を行うため、東大物性研の研究グループでは誘導ラマン散乱効果を利用した手法を開発した。レーザー媒質にYb:Y₂O₃セラミック

やYb:CaGdAlO₄(CALGO)を用いて誘導ラマン散乱による共振器内での帯域拡大を実現し、Yb:CALGOを用いた場合に、パルス幅22 fsが得られた。この値はYb:CALGOを用いたレーザーとしては最短である。またポンプ光強度を上げると、誘導ラマン散乱による帯域の拡大効果がみられたとのことある。

■Pr:YLF再生増幅器

Pr³⁺(プラセオジウムイオン)ドープ結晶は可視域に多くのレーザー遷移を持つため、490~720 nmでの直接発振が可能なレーザー媒質として注目される。また近年励起光源となる青色半導体(InGaN)LDの高出力化が進んでいることから、レーザー加工などの産業応用が可能な紫外・可視全固体高出力レーザーの開発にも期待が持たれる。慶応大の研究グループでは、紫外・可視短パルスレーザーの高出力化に向けPr³⁺:LiYF₄(YLF)結晶を用いた再生増幅器を作製し、その増幅特性について報告した。シードパルス光には波長640 nmの可飽和吸収体を用いたPr³⁺:YLFモード同期レーザーを、再生増幅器の利得媒質には結晶長5 mmのPr³⁺:YLFを用いていた。励起光源には波長444 nmのInGaN半導体レーザーを用い、吸収エネルギーは最大3.0 Wであった。パルス幅600 ns、エネルギー70 pJ/pulseのシードパルス再生増幅した結果、10 kHzの駆動で最大12 μJのパルスエネルギーが得られていた。また発表では、パルス幅がより短いピコ秒LDパルスを用いた結果についても報告された。

■高繰り返し近赤外広帯域光コム

産総研の研究グループから、24 GHz高繰り返し近赤外広帯域光コムの開発に関する報告があった。周波数軸上に等間隔で並んだ多数の色成分からなる光信号を光(周波数)コム(comb(櫛))と呼ぶ。光コムはその高い安定性やコヒーレンスからさまざまな精密分光や標準、天体物理などに利用されている。産総研では、天体の視速度観測用分光器の波長校正に利用することを目的に、20 GHz以上の周波数(モード)間隔、数10 nmの広帯域を持つ可視域光コムの開発を行っているが、その過程でモード間隔24 GHzの近赤外広帯域光コムの開発に成功した。彼らはエルビウム添加ファイバーを用いた繰り返し230 MHzのモード同期レーザーを光源に、3台の光共振器によりコムモードを切り出して24 GHzの光コムを構成し、不要なモードを抑制した(抑圧比60 dB)。2段の光増幅とチャープ補償後、高非

線形ファイバー(High Non-Linear Fiber, HNLF)に入射することで、コムモード1本あたりのパワーが10 μW、波長帯1350~1675 nmの広帯域光コムが得られた。講演では2台の光共振器で発生させた光コムとのモード比較を行い、HNLF内で再発生する不要モードを抑制するためには、広帯域化前に不要モードの抑圧比を十分に上げておくことが重要であることを明らかにした。

■高出力・高安定中赤外ファイバーレーザー

中赤外(波長~2 μm)レーザーは、その波長特性からさまざまな産業分野への応用が期待されている。阪大レーザー研の研究グループでは、ガラスや樹脂のレーザー加工技術への応用を主な目的に、波長2.8 μmの高出力・高安定連続光ファイバーレーザーの開発を進めている。高いレーザー利得を得るため、彼らはEr添加フッ化物ガラス(Er: ZBLAN)ファイバーに着目した。フッ化物ガラスファイバーは中赤外波長域に透過帯域を持つことから増幅媒質として有用であるが、一方で低融点、潮解性、低い機械的強度など課題もある。今回の講演では、石英-ZBLANファイバーの融着接続やフッ化物ファイバー内へのFBG(ファイバーブラッググレーティング)描画などの要素技術開発と、これらの技術を用いて構築された双方向励起レーザーシステムの実験結果が報告された。出力は最大35 W(吸収パワー~200W)で世界トップクラス、波長安定性や経時安定性にも優れていることが示され、今後の産業応用化に期待できるとのことであった。

■次回開催予定

今回は9月18日~21日、秋季の学術講演会が北海道大学で開催される予定である。



【写真】講演会場(東京工業大学本館)