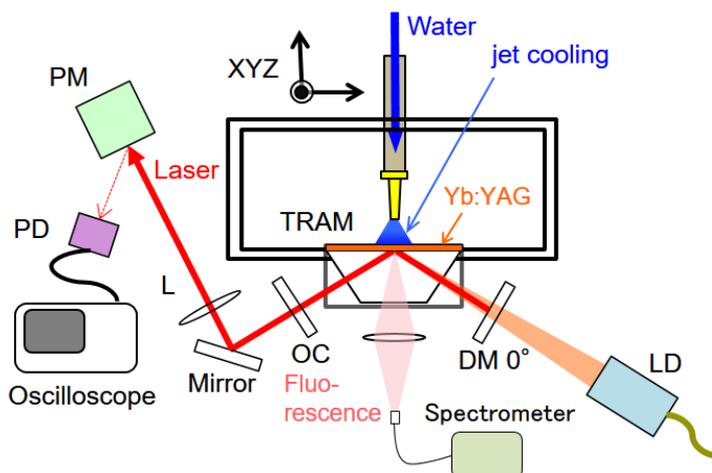
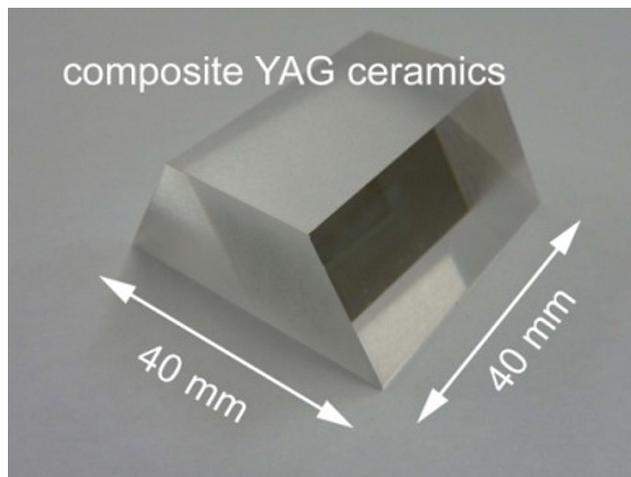


CONTENTS

- 常温動作Yb:YAG TRAMレーザーの出力特性
- 第65回応用物理学会春季学術講演会報告
- 主な学会等報告予定



【表紙図】(左)Yb:YAG TRAM の写真(右)水噴流冷却式レーザー発振試験配置図

常温動作Yb:YAG TRAMレーザーの出力特性

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 ハイタ 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

高出力個体レーザーの開発において、最も重要な課題の一つにレーザー媒質の発熱対策がある。レーザー媒質の有力候補の一つであるYb:YAGは、励起量子効率が大きく熱損失が小さい、蛍光寿命が長くエネルギー蓄積能力が高いなどの特性を持つが、高出力化の際にはやはり発熱による出力やビーム品質の低下などが懸念される。当研究所では、Yb³⁺をドープ(添加)したYAG層を底面に接合したYAGコンジット(Yb:YAG TRAM(Total-Reflection Active-Mirror、全反射型アクティブミラー方式)(表紙図(左)))を用いた

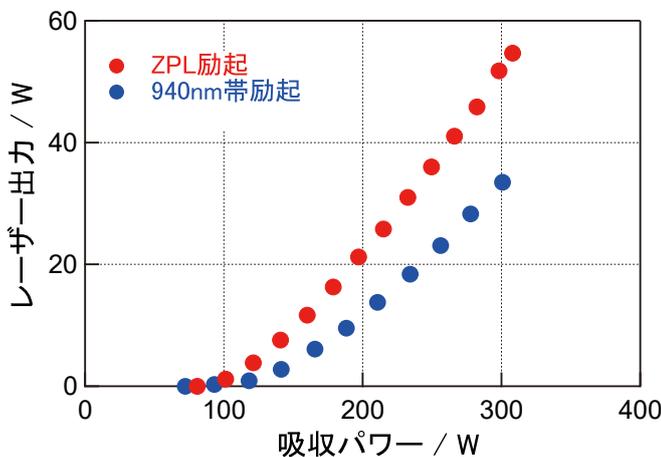
常温動作型高平均出力レーザーの開発を目標に研究を進めており、媒質の発熱対策として二つの手段を新たに用いている。第一に、TRAMの裏面に冷却水の噴流を直接吹き付けて除熱を行う衝突噴流冷却法の導入である。この手法では、噴流により冷却面上の水を強制的に入れ替える(強制対流)ことで高い除熱性能が得られ、また水の沸騰により冷却面上に発生する気泡を物理的に除去できるため、突沸(膜沸騰)による除熱能力の急激な低下を防止できるという利点がある。TRAMは強固な構造を持つためThin disk型のような伝導冷却を必要とせず、直接的な噴流冷却が可能である。第二



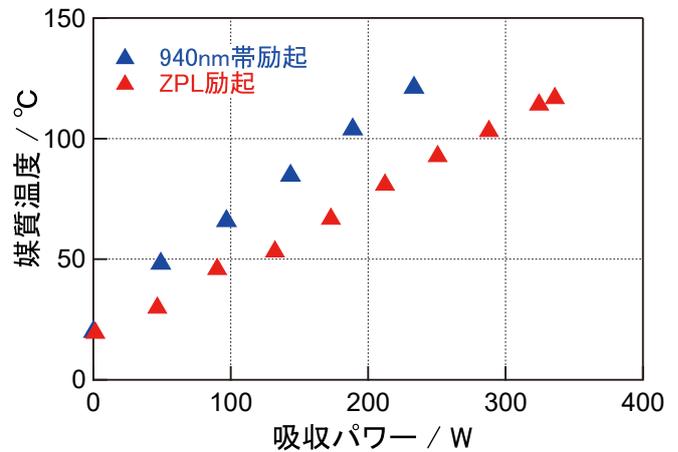
の手段は、ゼロフォノンライン (ZPL) 励起による媒質自体の発熱抑制である。Yb:YAGは940nm付近と969nm付近に吸収帯のピークを持ち、969nmの吸収はZPLに相当する。励起には通常、バンド幅が広い940nm帯のLDを用いるが、近年VBG (Volume Bragg Gratings) 波長ロック型LDが開発され、ZPL励起も可能となっている。ZPL励起の場合、励起波長と発振波長(1030nm)のエネルギー差が小さくなるため、940nm帯の励起に比べ媒質自体の発熱を抑制できる。前回の報告(Laser Cross No.356, 2017 Nov.を参照)では、水衝突噴流冷却法を用いたYb:YAG TRAMレーザーの出力特性について検討し、除熱性能の向上により出力が増加することを示した。本稿では、ZPL励起におけるレーザー発振出力特性の検討、および940nm帯励起時との特性比較を行った結果を報告する。また、レーザー媒質(Yb:YAG)のYbドーパ率や層厚の出力特性への効果について検討した結果についても報告する。

◆ZPL励起レーザーの出力特性

表紙図(右)に実験配置図を示す。背後から噴流管を挿入し、流速9.2m/sで室温の水を噴出させ、TRAMのYb:YAG面を直接冷却した。TRAMの両側にそれぞれダイクロミックミラー(DM)、結合出力ミラー(OC)を配置して共振器を構成し、パワーメーター(PM)およびフォトダイオード(PD)によりレーザー出力を計測した。またTRAMの励起部分から発生するYb蛍光のスペクトルを計測し、スペクトル形状の温度変化から励起中心部の媒質温度を算出した。励起には波長969nm、940nmのダイオードレーザー(LD)を用い、レーザー出力および媒質温度を比較した。Yb:YAG層



【図1】(●)ZPL励起、(●)940nm帯励起時のレーザー出力



【図2】(▲)ZPL励起、(▲)940nm帯励起時の媒質温度(励起中央部)

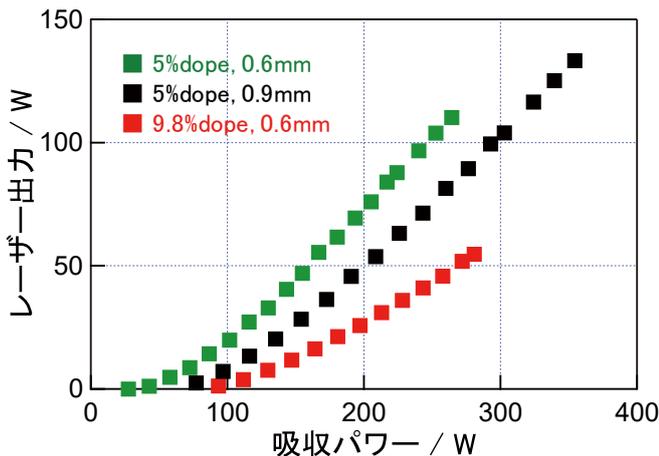
のドーパ率は9.8%、層厚は0.6mmであり、冷却条件や励起ビーム径など励起波長以外の条件はほぼ同一とした。各励起条件におけるレーザー出力を図1に示す。ZPL励起では、940nm帯励起時に比べ吸収パワーが同じ場合でも出力が大きく、より高い出力特性を示している。一方媒質温度(図2)はZPL励起時の方が低く、940nm帯励起時に比べ媒質温度の上昇が抑制されていることがわかった。これらの結果から、ZPL励起による媒質の発熱抑制効果が出力特性の向上に寄与することが示唆される。

◆Ybドーパ率、層厚の効果

TRAMのYbドーパ率およびYb:YAGの層厚の効果について検討するため、それぞれ異なるTRAMを用いて発振試験を行った。試験にはドーパ率5%、層厚0.6mmおよびドーパ率5%、層厚0.9mmの2種を用い、上記のTRAM(ドーパ率9.8%、層厚0.6mm)と同一の実験条件でレーザー出力を比較した。励起には969nmのLDを使用した。図3に吸収パワーに対する各TRAMのレーザー出力を示す。ドーパ率5%のTRAMは、9.8%のものに比べて発振閾(しきい)値が低下するため吸収パワーに対する出力の増加がみられ、いずれも100W以上の安定な出力が得られた。また層厚の薄い(0.6mm)TRAMの方が閾値は低く、吸収パワーに対する出力特性は最も高いことがわかる。一方で低ドーパ率、層厚の薄いレーザー媒質は励起光吸収率が低下するため、高出力化の際には多重パス励起など吸収率を増加させる方策を施すことが重要となる。

◆まとめと今後

本研究では、ゼロフォノンライン(ZPL)励起による



【図3】Ybドーパ率、層厚に対する出力特性の変化

常温動作の高出力Yb:YAGレーザーの開発を目標に、ZPL励起と従来の940nm帯励起での発振出力特性を比

較し、ZPL励起による媒質温度の発熱抑制効果と出力特性への寄与について実験的に検討した。またTRAMのYbドーパ率およびYb:YAGの層厚の効果についても検討し、ドーパ率5%のTRAMにおいて100W以上の安定な出力が得られた。現在、冷却性能をさらに向上させた水衝突噴流システムを用いた試験や高出力化スケールアップなどを進めており、今後はkWスケールの励起によるレーザー発振試験など、kW級の高平均出力レーザー開発に向けた具体的な取り組みを行っていく予定である。

◆謝辞

本研究の一部は、防衛装備庁「安全保障研究推進制度」の支援を受け実施された。

第65回応用物理学会春季学術講演会報告

■応用物理学会春季講演会が早稲田大学にて開催

3月17日～20日、早稲田大学西早稲田キャンパス(新宿区)にて開催された第65回応用物理学会春季学術講演会に参加した。講演会は春季、秋季の年2回開催され、春季の参加者は約7000人、講演件数は約4000件におよぶ。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、ナノカーボンなど17の大分類分科会、およびそれぞれに3～15の中分類分科会が設置されており、広範囲の研究領域をカバーしている。また本学会は産業分野との関わりも強く、企業の参加も活発である。ポスター発表会場に併設された展示会(JSAP EXPO)には計測機器、材料関連など100社以上が出展しており、また昼食時には自社製品とそのアプリケーションなどについて講演するランチセミナーも多数開催された。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。

■光フェーズドアレイによる空間通信

長距離光伝送では、大気の大擾乱(じょうらん)に起因する伝送ビームの位相の乱れや、それにとともなる光強度低下の抑制が大きな課題とされている。これに関し、三菱電機、東海大学の研究グループから、光フェーズ

レーザー計測研究チーム 谷口誠治

ドアレイを用いた大気擾乱抑制効果に関する報告があった。光フェーズドアレイとは複数の素子光を空間配置したものであり、光の位相を素子単位で制御することで任意のビームパターンを生成することができる。大気擾乱効果を抑制するには高次モードのビームを用いることが効果的とされていることから、彼らはシミュレーターを構築し、光フェーズドアレイにより生成した高次モードビームが大気擾乱を模した位相マスクを通過した後の出力波面強度を求め、同様の条件でガウシアンビームを送った場合のそれと比較した。その結果、1km伝送後の出力波面強度の損失はガウシアンビームでは16[dB]であるのに対し、高次モードビームでは4[dB]と損失が抑制されることが示された。今後、光空間通信やリモートセンシングなどへの応用に期待が持たれる。

■高出力固体レーザー開発

分子科学研究所(平等拓範教授ら)の研究グループから、レーザー媒質に異方性セラミックを用いた高輝度パルスレーザーに関する報告があった。彼らはセラミックに常磁性の希土類を添加し、静磁場あるいは回転磁場によって配向を制御した異方性セラミック(Yb:FAP)を自作し、レーザーパルス発生実験を行った。その結果パルス幅1.1ns、ピークパワー 2.3kWの

ルス列(8.1kHz)が得られた。出力自体は大きなものではないが、異方性セラミックでのパルス発生に成功により、今後核融合ドライバー級へのパワースケーリングに期待できるとのことである。また同グループからは、高平均出力Nd³⁺:YAGレーザーに関する報告もあった。彼らは複数の薄いNd³⁺:YAG結晶の前後に熱伝導率が大きなサファイア板を接合することで、結晶の発熱を分散冷却する手法(Distributed Face Cooling, DFC)を開発している。講演では4枚の結晶からなるDFCチップを用いたレーザー発振実験の結果が報告され、86Wの入力に対して45W以上の出力が得られていた。またDFCチップとNd³⁺:YAG結晶のみを用いた場合の発振出力の比較により、DFCチップがより高い除熱性能を持つことが示された。現在高出力化に向けた開発が進められているようである。

■THzパルスの加工への応用

レーザープロセッシングに関する報告では、橋田昌樹准教授(京大)らの研究グループから、高強度THzパルスの発生技術に関する講演があった。准教授らは、チャンバー内にアルゴンガスを高圧封入して生成させたアルゴンクラスターに高強度フェムト秒レーザー(10mJ)を照射することで、大気プラズマの600倍(590nJ)の効率でTHzパルスを発生させることに成功した。また彼らはTHzパルスの加工技術への応用の可能性についても検討しており、自由電子レーザーから得られる1mJのTHzパルスを用いたシリコン表面のアブレーション実験の結果が報告された。アブレーション後のシリコン表面には、パルスの偏向に平行の方向にTHz波長の約1/25の微細な周期構造が形成され、さらに照射を続けると、偏向の垂直方向にTHz波長と同程度の周期構造が形成されたとのことであった。講演では、フェムト秒レーザーによる周期構造形成に関する研究事例との比較や、形成メカニズムの類似性などが議論された。

■フェムト秒レーザーによる細胞回収技術

近年、iPS細胞を用いた再生医療など細胞を直接治療に用いる技術が急速に進展している。これらの技術

で重要となるのが、培養した細胞群の中から目的にかなう細胞の一つ一つを高速で選別、回収する手法の開発である。これに関し奈良先端科学技術大学院大学の細川陽一郎教授らは、フェムト秒レーザーを用いた新しい細胞回収技術を提案している。マイクロ流路に細胞群を一行に流通させ、目的の細胞が流路の分岐点に到達した際、細胞側方の培養液にレーザーパルスを集光照射し、液中に誘起される衝撃波や圧力、気泡生成(キャビテーションバブル)などの物理的な力により、細胞を流路から分岐させて回収する。講演では、装置構成が簡単で、高繰り返し(~1MHz)、高安定の増幅パルスが得られるYb再生増幅器を用いた細胞回収実験の結果が報告され、細胞死滅率など従来のTi:Sapphire増幅器を用いた結果との比較も行われた。Yb増幅パルスは上記のような優位性を持つものの、波長は1030nmでTi:Sapphire増幅パルス(800nm)よりも長いなどのトレードオフもあり、性能の大幅な向上は見られなかったようである。しかしながら、実験には市販の汎用増幅器が使用されているため、今後レーザー照射条件が明確になれば、この用途に最適なレーザーシステムが新たに開発される可能性もあると感じた。

■次回開催予定

今回は2018年9月18日~21日、名古屋国際会議場(名古屋市)での開催が予定されている。



【写真】講演会場(早稲田大学)

主な学会報告

5月28日(月)~31日(金) アジア・パシフィック・レーザー・シンポジウム(APLS2018)(西安)

李 大治 「Research on Terahertz Radiation from Femtosecond Electron Bunches」

6月4日(月)~8日(金) ICLO 2018 (サンクトペテルブルク)

ハイク コスロビアン「Laser characteristics of resonators with retro-reflective elements」