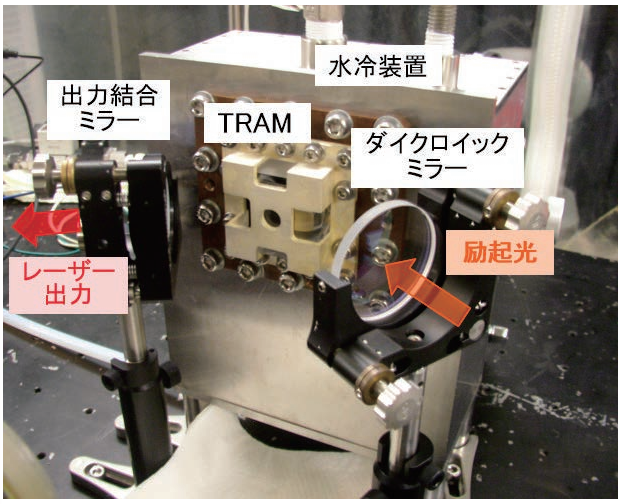
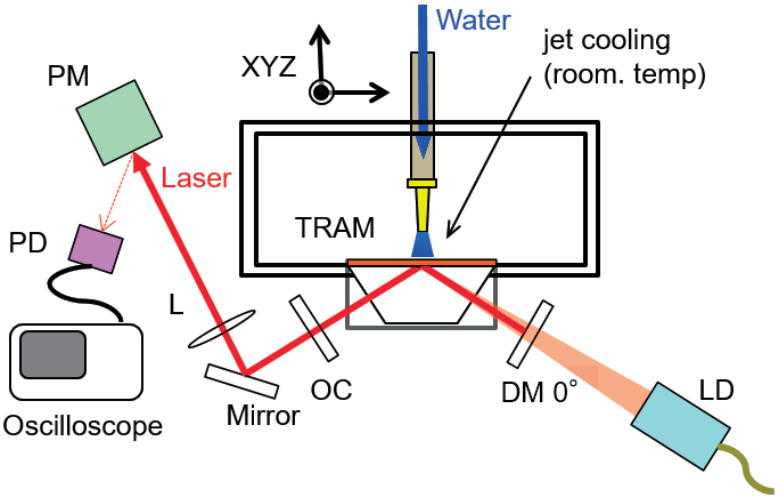
2017, Nov.
No. 356
LASER CROSS
ISSN 0914-9805

CONTENTS

常温動作全反射アクティブミラー型
Yb:YAGレーザーの発振特性
第78回応用物理学会秋季学術講演会報告
主な学会等報告予定





【表紙図】(左)水噴流冷却装置(簡易型)の写真、(右)レーザー発振実験配置(噴流冷却)

常温動作全反射アクティブミラー型 Yb:YAGレーザーの発振特性

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

高出力固体レーザー開発における最重要課題の一つは、レーザー媒質の発熱対策である。Yb:YAG固体レーザー材料は、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ため、高出力レーザー媒質の有力候補の一つであるが、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。発熱制御の手法として第一に挙げられるのは媒質自体の発熱の抑制であり、その一つにゼロフォノンライン(ZPL)励起がある。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。通常、励

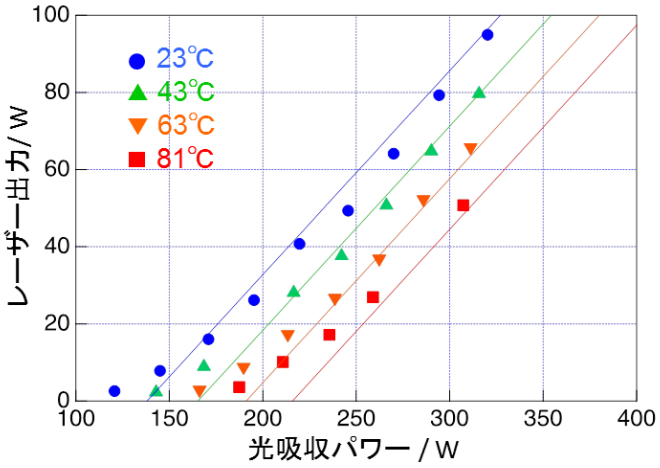
次ページへつづく▶

起にはバンド幅が広い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励起に比べて発熱を抑制できる。第二は、冷却法の開発による除熱性能の向上である。当研究所ではこれまで、全反射型アクティブミラー方式(Total-Reflection Active-Mirror : TRAM)を用いた低温冷却Yb:YAGレーザー(Laser Cross No.287, 2012. Feb.他)の開発を進め、プール冷却の約10倍の除熱能力を持つ液体窒素衝突噴流冷却方式を用いてkW級のレーザー出力を達成した。TRAMは強固なコンポジット構造を持つため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。

当研究所では現在、ZPL励起とより高い除熱能を持つ水を用いた衝突噴流冷却法を組み合わせ、コンパクトな冷却装置を持つ常温駆動の高出力Yb:YAGレーザーの開発に向けた研究を開始している。本稿では、その初期段階として、常温領域における水冷Yb:YAG TRAMのレーザー発振特性の温度効果、および水噴流冷却法の効果について検討した結果を報告する。

◆レーザー出力の温度特性

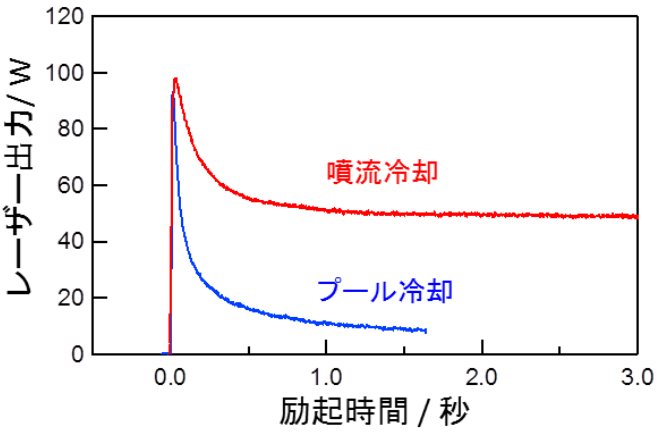
水冷TRAMレーザーの発振特性と動作温度効果について検討するため、波長940nmの低出力LD、および自作した簡易の水冷装置(表紙図(左))を用いてプール冷却によるレーザー発振試験を実施した。プール冷却では、装置内に蒸留水を満たし、TRAMのYbドープ面を水と接触させて冷却を行う。TRAMの両側にそれぞれダイクロイックミラー(DM)、結合出力ミラー(OC)を配置して共振器を構成した。レーザー出力の計測にはパワーメーター(PM)を用いたが、出力の時間変化は応答速度の速いフォトダイオード(PD)により計測した。サーモースタットを用いて水温調整を行い、23～81℃の間で水温を変化させて発振出力の温度依存性を測定した。励起パワーの増大に伴いレーザー出力は増加するが、いずれも励起開始直後がピークで、その後媒質温度が励起時間とともに上昇するため、レーザー出力は励起時間とともに低下した。励起開始直後の媒質温度はプールの初期水温に等しいと考えられるため、各計測におけるピーク値をレーザー出力としてその温度特性を比較した。結果を図1に示す。水温が上昇すると発振閾値は増加するが、スロープ効率は大きく変化しないことがわかる。実験結果を検証するため、レーザー媒質の温度依存因子を考慮した出力モデルを作成し、各温度での出力計算を行ったところ、計算値は実験値をよく再現することがわかった。これにより、高出力化に向けたスケーリングの予測が可能となった。



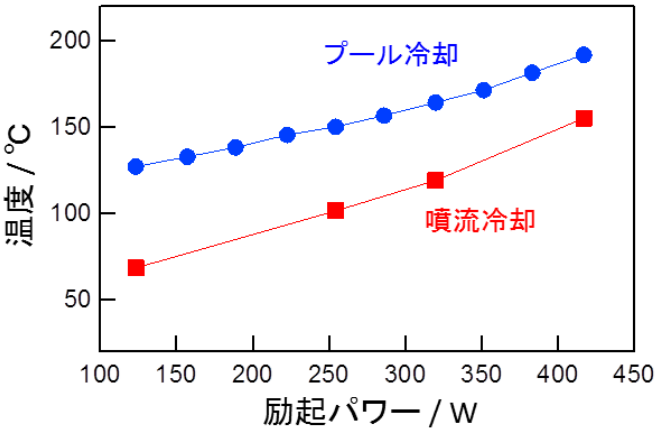
【図1】各プール温度における発振出力(ピーク値)と出力モデルによる計算値(図中実線)

◆水衝突噴流による冷却効果

噴流冷却効果について検討するため予備試験を行った。実験配置を表紙図(右)に示す。冷却装置の背後から噴流管を挿入し、水を噴出させてTRAMのYbドープ面を直接冷却した。PDにより観測したレーザー出力の時間変化を図2に示す。励起開始直後の出力はプール冷却時とほぼ同一であるが、その後の出力低下は抑制され、3秒後以降は安定な出力が得られた。除熱性能の向上によりTRAMの温度上昇が抑制されたためであると考えられる。検証のため、励起開始5秒後に観



【図2】レーザー出力の時間変化(励起パワー 417W)



【図3】励起開始から5秒後のTRAM温度（励起中心部）

測したYb蛍光スペクトルの変化からTRAM励起部の温度を算出[1]したところ、励起パワーが同じでも、噴流冷却時の温度はプール冷却に比べ60～40℃低下することを確認した（図3）。

◆まとめと今後

本研究では、ゼロフォノンライン励起による常温駆動高出力Yb:YAGレーザーの開発を目標に、その初期段階として940nm励起による室温動作時のTRAMレーザー発振出力とその温度特性を観測した。レーザー媒質の温度依存因子を考慮した出力モデルによる分析から、実験値と計算値はよい一致を示し、これにより高出力化に向けたスケーリング予測が可能となった。また、水衝突噴流冷却方式の予備的な試験を行い、除熱性能が向上し、レーザー出力が増加することを確認した。現在、ZPL励起によるレーザー発振試験や高出力スケーリング、冷却性能をさらに向上させた水衝突噴流システムの構築などを進めており、今後kW級の高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。

参考文献：

1) H. Furuse, J. Kawanaka, *et al.*, *Optics Express*, **20**, 21739-21748, 2012.

REPORT

第78回応用物理学会秋季学術講演会報告

レーザープロセス研究チーム　ハイク　コスロービアン

■応用物理学会秋季講演会が福岡にて開催

去る9月5日～8日、福岡国際会議場・国際センター・福岡サンパレスにて第78回応用物理学会秋季学術講演会が開催された。応用物理学とは、物理学を他の学術分野、特に工学（エンジニアリング）へ応用することを意図した学問であり、物理学の中ではとりわけ産業や経済との結びつきが強い分野でもある。このため本学会がカバーする領域は、光・フォトニクス、放射線・プラズマ、量子エレクトロニクス、薄膜・表面、半導体、結晶工学、計測・制御など広範囲におよび、また20000人を超える会員のうち3割以上が企業に所属しているという点も特徴的である。学術講演会は春季、秋季の年2回開催され、それぞれ参加者6000人以上、講演件数は約4000件とその規模は大きい。企業からの参加も活発で、併設された展示会にはさまざまな企業が出展しており、自社製品とそのアプリケーション、および関連技術について講演を行うランチョンセミナーも多数開催された。筆者は、コーナーキューブおよびアキシコンレトロリフレクターの偏光とレーザー特性に関する研究結果を発表し、レーザー共振器におけるそれらの高反射ミラー（再帰反射光学素子）への応用の可能性について議論した（Laser Cross No.353, 2017 Aug.）。以下に、レーザー開発、およびコヒーレントビーム結合（CBC）技術に関するトピックをまとめる。

■2μm帯全ファイバー型双方向モード同期レーザー

波長2μm付近の光は網膜に対する吸収性が低いため、この帯域のレーザーはアイセーフレーザーと呼ばれる。医療分野やライダー（リモートセンシング）のほか、さまざまな応用が期待されている。これに関し、山下真司教授（東京大学）らの研究グループは、2μm帯全ファイバー型双方向モード同期パルスレーザーの開発を行った。彼らは高い光非線形性を持つカーボンナノチューブを過飽和吸収体（CNT-SA）に用いて2μm帯の受動モード同期を行い、透過、反射の両モードでレーザーを発振させた。利得媒質には約4m長のツリウムドープシリカファイバーが使用され、双方向でパルス列を出力できるよう、レーザーキャビティにアイソレーターは用いられていない。レーザーパルスの時間

幅は約1.2ピコ秒、出力はそれぞれ2.9mW、6.1mWであった。反対方向の2つ出力パルスは良好なコヒーレンスを有しており、またそれぞれのスペクトルおよび繰り返し周波数はわずかに異なっていることがわかった。これらの特性は、FT-IR(フーリエ変換型赤外分光)よりも高速、高精度測定が可能なデュアルコム分光法や、超広帯域光(supercontinuum)発生などの応用に利用可能とのことである。

■計算機合成ホログラム・回折光学素子設計の最適化

計算機合成ホログラム(CGH)は、回折現象を利用して入射光の波面を変換する波面変換素子であり、回折光学素子(DOE)の一種であると考えられる。W. F. Hsu教授(台北工科大学)は、CGH/DOE設計の最適化戦略について報告した。講演では、直接解法(直接二分探索法、模擬アニーリングアルゴリズムなど)に比べ効率的な計算が可能な逆解法による最適化アルゴリズム(Gerchberg-Saxtonアルゴリズム)において、その欠点である回折画像の画質の悪さを改善するためのピクセルワイズ操作を含む新たな手法が提案された。また教授は、自由空間光学系で最小誤差の近似解を得るため、二乗平均平方誤差、回折効率、シグナル/ノイズ比、および回折像の信号変動などのデバイスパラメータを組み合わせたメリット関数(誤差関数)を導入し、直接解法、逆解法におけるメリット関数の特性を示した。より効率的な最適化アルゴリズムの開発は、電子デバイスなどの高性能化にともなう数100万ピクセルのCGH/DOEの製造に対して大きな需要がある。またレーザー開発、特に超短レーザーパルスのCBC技術の開発においても不可欠である。

■小型CBCシステムの開発

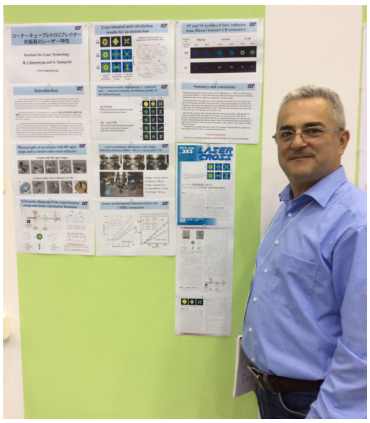
三菱電機(株)から、光空間通信やリモートセンシングへの応用を目指した小型CBCシステムの開発に関する報告があった。彼らはこれまでに、セロダイン光位相変調による光位相同期、および単一光検出器で各ビームの位相誤差を検出するマルチディザ方式を開発したが、今回の報告ではこれらを組み合わせた方式を提案し、低出力レーザーによる実証実験を行った。この方式では、光位相変調器に各信号光路識別用の正弦波信号と、位相同期用の鋸刃状セロダイン変調信号とを加算して印加し、セロダイン変調信号の周期を制御して信号光の周波数をシフトさせることで各ビームの位相同期を可能とする。これにより光位相変調器1台で位相同期と信号光路識別を同時に行うことができるため、CBCシステムの小型化に寄与できるとのことである。

■機械学習によるビームフォーカシング法

谷田純教授(大阪大学)らの研究グループでは、機械学習法をベースに、単純な光学系により散乱媒体を介してビームの焦点を調整する手法を提案している。この手法では、入力と出力の多くのトレーニングペアを持つ回帰アルゴリズム(サポートベクトル回帰)を用い、入力面から出力面への散乱を介した光学過程の逆関数を計算し、目標とする出力ビームの画像と逆関数を用いて空間光変調器により入力ビームを最適化する。実証実験では、目標とする集束ビーム画像のスポット位置と、実測した出力画像のスポット位置はほぼ一致しており、両画像間のシグナル/ノイズ比は17.8 dBとのことであった。このような光散乱体を用いたビームフォーミングは、例えば生体深部の組織をターゲットとした光計測などに有用な技術である。

■次回開催予定

次回は来春3月17日～20日、早稲田大学での開催が予定されている。



【写真】発表会場にて

主な学会報告

18年1月24日(水)～26日(金) レーザー学会学術講演会第38回年次大会(京都市勧業館みやこめっせ)

染川　智弘「海上ラマンライダーの開発」
藤田　雅之「ゼロフォノンライン励起Yb:YAG TRAMレーザーの熱特性」
李　大治　「新型放射を用いたスミス･パーセル自由電子レーザー」
倉橋　慎理「屋外利用を目指したレーザーによるコンクリート構造物内部欠陥検出の高速化技術の開発」

発行／公益財団法人レーザー技術総合研究所　編集者代表／谷口誠治　〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4　大阪科学技術センタービル4F TEL(06)6443-6311 FAX(06)6443-6313
掲載記事の内容に関するお問い合わせは、編集者代表・谷口誠治(E-mail:taniguchi@ilt.or.jp)までお願いいたします。