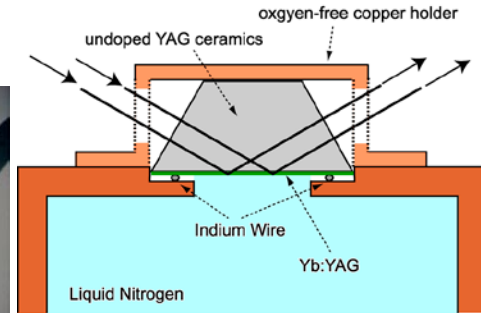
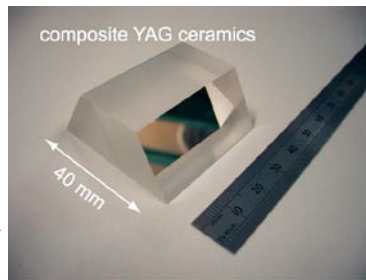


CONTENTS

- 全反射アクティブミラー型低温冷却Yb:YAGレーザー
—理想光源の開発を目指して—
- 海外技術動向報告
- 【光と蔭】「リーダーシップが必要だ」
- 主な学会報告予定

【表紙図】コンポジット型Yb:YAGセラミックスの実物写真(左)と低温冷却全反射アクティブミラー方式(右)



全反射アクティブミラー型低温冷却Yb:YAGレーザー —理想光源の開発を目指して—

レーザーエネルギー研究チーム 古瀬裕章

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 河仲準二

■アクティブミラー型レーザー

現在、高出力、高ビーム品質だけでなく、高効率、コンパクトの全ての条件を満たした理想的な光源が産業・学術の両面から広く要求されている。アクティブミラー方式は高出力固体レーザーの開発において現在最も良く用いられている増幅方式の一つである。ドイツのTRUMPF社では8 kW出力のディスクレーザーを加工用光源として販売している。この方式では数100 μm 程度の薄いレーザー媒質をヒートシンクの上に乗せ、媒質の裏面からレーザー媒質を伝導冷却する。ヒートシンクとレーザー媒質の間にレーザー光に対する高反射膜が施されており、レーザー光はミラーの様に反射するだけで増幅される。媒質が薄いので温度上昇を極力抑えることができ、加えて径方向の温度勾配を小さくできるため高いビーム品質を保って高出力化が可能と言う利点がある。

高出力を得るためには強励起する必要がある。実際に200 μm の厚みのYb:YAGに10 kW/cm²程度の強励起を行えばサンプルの温度は200度以上も上昇してしまう。アクティブミラー型の利点を最大限活用するためには励起面積を大きくし、かつ、裏面からの排熱効率をもっと向上させる必要がある。

■全反射+アクティブミラー増幅方式の考案

我々は全反射とアクティブミラー増幅方式を組み合わせることによって従来よりも大幅に温度上昇を抑えた増幅方式の考案と実証を初めて行った。表紙図に作製した試料と冷却方法を示す。励起面積を大きくするために単結晶よりも大口径化が可能なセラミックス材料を用いた。試料は底面40 mm×40 mm、高さ17 mm、底辺角度60度の台形柱のnon-doped YAGの底面に、厚

み400 μm のYb:YAGを貼り付けたコンポジットセラミックスである。励起光は斜面に対して垂直に入射し、Yb:YAGで吸収される。一方レーザー光は励起光と同軸でサンプルに入射し、Yb:YAGで増幅しながら裏面で全反射した後、別の斜面から出射する。全反射を用いることでレーザー光の反射面に高反射膜を施す必要がなく、直接レーザー媒質を冷却することができるために、従来のアクティブミラー方式よりも高い排熱効率が期待できる。我々は今回開発したこの増幅方式を”TRAM (Total-Reflection Active-Mirror)”と呼んでいる。

一方Yb:YAGは100K以下の低温に冷却することで4準位構造を示し、特性が著しく向上することが知られている(レーザークロスNo.196)。本研究では冷却媒質に液体窒素を選択し、直接低温冷却Yb:YAG-TRAMレーザーの開発を行った。YAGと液体窒素面での全反射の臨界角は41°である。

■低温冷却Yb:YAG-TRAMレーザーの実証試験

TRAMレーザーの有効性を実証するために、発振実験を行った。図1に発振器の構成を示す。表紙図に示したように、TRAMサンプルをクライオスタット内部のホルダーに設置した。真空シールにはインジウムワイヤを利用した。励起光源として波長940 nm、最大出力500 WのFiber-Coupled Laser Diodeを用いた。励起光を集光光学系に通してサンプル上で直径6 mmに集光した。クライオスタットと集光光学系の上に励起光(940 nm)を透過し、レーザー光(1030 nm)を反射するダイクロミックミラー(flat)を設置した。サンプルを透過した後にレンズと出力ミラー(flat)を設置して長さ35 cmのキャビティを構成した。反射率の異なる5種類(42.6%, 63.5%, 72.0%, 84.6%, 93.6%)の出力ミラーを用いて測定

次ページへつづく▶

全反射アクティブミラー型低温冷却Yb:YAGレーザー——理想光源の開発を目指して——

を行った。

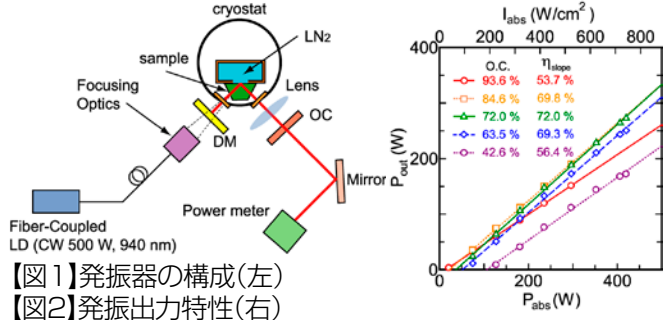
■出力273 W, スロープ効率72%を達成！

図2に発振試験の測定結果を示す。励起光は500 Wの最大出力のとき、Yb:YAGで約420 W吸収される。最大励起密度は742 W/cm²である。測定結果より、出力ミラーの反射率72%を用いた際に最大出力273 W, スロープ効率72%, 光—光変換効率65%を達成した。このスロープ効率は100 W以上の高出力Yb:YAGレーザーシステムにおいて最も高い効率である。

■まだまだ高出力が可能！！

図2で得られた入出力特性において、最大励起時においても出力パワーは入力パワーに対して線形に増加している。これは媒質サンプルが4準位系で動作し続けている、つまり、媒質の温度が100 K以下で動作していることを意味する。液体窒素の温度が77 Kであるので、サンプルでの温度上昇は23 K以下と見積もることができる。したがって、TRAMレーザーではサンプルの温度上昇を極力抑え、高ビーム品質で、高効率を保つ

たまま高出力動作が可能である。400 μmの試料では1.2 kW/cm²程度の励起密度までは100 K以下で動作すると見積もっている。励起光源の入力を増強することで、キロワット級のTRAMレーザーを開発することが可能である。今後我々は、励起密度やYb:YAGの厚み等を変えて熱特性の評価を綿密に行い、その結果に基づいてより高出力・高効率・高ビーム品質を有する理想光源の開発を進める。



【図1】発振器の構成(左)
【図2】発振出力特性(右)

TOPICS

海外技術動向報告

レーザー加工計測研究チーム主席研究員 藤田雅之

に発展させる体制が構築されている。

◆Fraunhofer ILT Aachen

ILT建屋内には企業の専用研究室や大学(RWTH)の研究室もあり、所内で製品の試作まで可能な生産設備が整えられている。例えば、次世代半導体デバイスの製造に必須とされる極端紫外(EUV)光源開発では、オランダPhilips社がその開発拠点をILT内に設けており、Philips社から70名、ILTから20名が研究開発に参加しているとのことである。

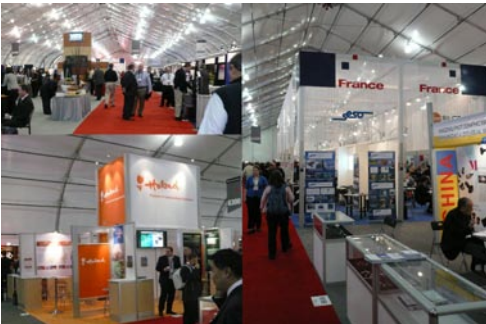
LD端面励起型のスラブレザー開発を10年近く継続しており、近年はこれを利用したフェムト秒レーザーで良い成果を得ている。所内にMarketing部門があり、成果を積極的に外部へ売り込むとともに、今後の技術開発動向の調査や市場規模予測などを行い、企業に対する支援と研究所自身の研究テーマ開拓などに役立っているようである。

また、ILT内には1Bユーロを投資したLaser User Centerがあり、Photonics Platformと呼ばれる研究ネットワークが構築されている。メンバー数1000程度で20~30Mユーロの資金で運営されているが、数年後には900Mユーロ規模に発展させていきたいとのことであった。

◆Fraunhofer IOF Jena

IOFの研究内容はマイクロ・ナノ光学と微細加工が中心テーマである。極端紫外からX線領域用ミラーの精密研磨や多層膜コートなどが可能な装置をはじめ、最先端のもの作り用設備が整っている。

ILTではILT建屋内に大学の研究室があり、学生を積極的にILTの研究に参加させているのに対し、IOFでは大学の研究室は別建屋になっており、学生は企業からの受託研究開発には係わらせない、とのことである。



【写真】Photonics West(米国サンノゼ)会場入り口

◆欧米のレーザー技術調査

昨年11月17~25日にかけてドイツのレーザー関連技術調査を行った。イェナ、アーヘン、ブルバハ、シュツットガルト各都市をまわり、レーザー関連企業、大学、ブラウンホーファー研究所を訪問し技術動向を調査した。また、今年1月26日~29日に米国サンノゼで開催されたPhotonics Westに参加する機会を得たので、最近の欧米におけるレーザー関連技術動向を報告する。

◆Fraunhofer ILT AachenとFraunhofer IOF Jena

両方ともレーザー技術開発とその産業応用を主な研究開発領域とする研究所で、ILT Aachenは自動車産業へのレーザー応用、IOF Jenaは半導体産業へのレーザー応用を前面に打ち出している。前者はアーヘン工科大学(正式には Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 略称RWTH)、後者はイェナ大学(正式にはFriedrich-Schiller University, 略称FSU)応用物理研究所(Institute of Applied Physics, IAP)と密接に連携しており、それぞれの大学教授Prof. R. PopraweとProf. A. Tunnermanが所長を兼務している。ILTは研究所7部門とRWTH 3部門が、IOFは研究所4部門とIAP, FSU 2部門が一体運営を行っており、両者とも教授の統一した考えの下に研究を展開するとともに、大学における基礎・基盤研究の成果を研究所が産業応用

一方、大学(IAP, FSU)の研究内容は、IOFの研究分野との重なりが多い。光源開発ではファイバーレーザーに力を入れており、ファイバーレーザー出力のスケールアップ、Photonic crystal fiberの大口径化とCWおよびパルス動作での高出力化、超短パルスファイバーレーザーで優れた成果を上げている。CWで $> 1.5 \text{ kW}$ 、ナノ秒パルス動作で 325 W などの出力を達成している。

◆Jenoptik社

1992年Carl Zeissのハイテク部門から分離独立して設立された。半導体レーザー(LD)に関しては、当初はSiemens社から素子の供給を受けてその組立のみを行っていたが、その後Berlinの研究所を買収し、LD素子の製造から組立までを一貫して行っている。

Laser & material processing divisionでは、半導体レーザー、固体レーザーなどを単体として製造販売するとともに、固体レーザー加工システムまでの構築を手がけており、社内での垂直統合型体制を作り上げている。レーザー結晶などのパーツは外部から購入しているが、パーツ製造企業までを全てコントロールしたいと極めて意欲的である。

国際宇宙ステーションで用いられている特殊な半導体レーザーはイエナオプティクス社製である。fiber coupled LDはプラスチックの溶着に利用されている。自動車のベンツCクラスのレーザー溶接にはイエナオプティクス社の半導体レーザーで励起されたディスクレーザー(TRUMPF社製)が使われ、トヨタ・プリウスの電池の溶接にはイエナオプティクス社の半導体レーザーが使われている(製造はパナソニック)とのことである。

同社のUsers application centerにはレーザー加工機が10台以上設置されている。ここでは、自主開発(厚板ガラスの切断など)、受託開発(ユーザー企業からの委託によりダッシュボード、バンパー成型品の切断などをテストし、レーザー加工システムとして販売をめざす)、ならびに少量品の生産加工を行っている。

◆IPG Photonics 社

ファイバーレーザーで世界の最先端を走るIPG Photonics社の開発・製造拠点であるドイツBurbachを訪問した。本社は米国であるが、開発・製造拠点はドイツ、ロシアが中心である。元々はロシアの会社であるために、開発部門(全体の90%)はロシア人のみで、セールス・応用部門ではロシア人以外からも採用している。事業内容は、74%がレーザー加工、5%がバイオ応用、7%が通信関係である。

IPG社の強みは、垂直統合型レーザー開発にある。励起用の半導体レーザーから増幅媒質のファイバー、出力ヘッドまで全て自社内で開発・生産している。他社に価格を支配される余地がない。現在、シングルモードのファイバーレーザーでコア径 $20 \mu\text{m}$ から出力 6 kW 、マルチモードのファイバーレーザーで出力 100 kW を製品化している。出力 1 kW (CW)の場合、ダイレクト半導体レーザーよりもファイバーレーザーの方が価格を低く設定できるとのことであった。

IPG社内には加工ラボが設置してあり、加工技術の開発とともに顧客のお試し加工が可能となっている。加工分野として注目しているのは燃料電池の溶接、太陽光発電パネル端の絶縁、太陽光発電パネルの穴あけ

山中千代衛



.....148

「リーダーシップが必要だ」

風雲急を告げる変革の時代、社会の命運はすぐれたリーダーの存在によって左右されることは言うまでもない。わが国において、国のリーダーたる総理大臣が相次いで1年足らずの間に決断力の不足から自発的に交代するの

を見ると、現在の日本こそリーダーを必要とするにもかかわらず適格なリーダーを育成して来なかった現状にかつての教育者の一人として忸怩たるものがある。

戦後60年にわたってリーダーの育成は意図的に避けられてきた。平等社会を意識するあまりリーダーシップを持った指導者像を忌避しつづけてきた結果今日の昏迷がある。

戦前戦後にわたりわが国でも多くの傑出したリーダーが存在した。これらの人々は社会の変動に対しすぐれた洞察力をもち将来ビジョンに向けての構想力とその実現に対する実行力を保有していた。当然のように人を主導する指導力と優れた国際感覚の持ち主であった。

このような特徴のある人材を育成する手法は小中高から大学を通じて軽視され、無視されてきた。その結果が国際競争場裡におけるわが国の見事なまでの人材不足である。一方欧米や中国においてはエリート存在は社会において不可欠とされその育成に熱心な努力が傾注されている。

わが国でも明治時代以後かなりの成果を上げた時代があったが、戦後の学制改革のあとリーダー教育は存在していない。リーダーの養成は公教育では許されないという誤った考え方はこの際払拭されなければならない。リーダー教育にはまず義務感、倫理感の養成が大切でリーダー候補者は各種教育過程を経る中から生長してくるものと思われるので日本の社会システムに合った独自の手法を考えるべきであろう。高等教育は本質的にリーダー育成の使命がある。リーダーの素養としてインテリジェンスとインフルエンスを併せ持つ人という定義がある。リーダーの育成について教育方法の具体像を持つことが大切である。

昔の緒方洪庵の適塾や福沢諭吉の洋学塾さらには旧制高校などにみられた見識の高い精神的指導者の存在が重要である。専門性のみならず人格に優れ、個性のある教育者を高い教育理念の下に保持することが何より必要となる。

今や人材育成、リーダーの養成は国を挙げて喫緊の課題である。優れた人材を国の内外から導入してリーダーシップを確立する努力を尽し100年の計を立案しなければならない。烏合の衆のみでは現代の変革の時代を生き抜けない。

【研究名誉所長】

である。太陽光発電パネルの穴あけでは、厚さ500 μ mの板に、表面50 μ m ϕ 、裏面20 μ m ϕ の穴を繰り返し500kHzのファイバーレーザーを用いて、毎秒3500個の穴開けを実現している。ファイバーレーザー開発以外のビジネスでは、垂直統合の最終段階である加工システム(ロボット、ヘッド等)開発をロシアで始めている。また、最近CO₂レーザー開発を始めており、世界のCO₂レーザー市場の30%を獲得することを目的とし商品リリースするとのことであった。

◆Stuttgart大学、IFSW

Stuttgart大学はディスクレーザーの開発で有名である。出力25kWを達成し、今後30kWまではスケールアップできるとのこと。同じレーザーの構成で二倍高調波発生、Qスイッチ動作、ピコ秒からナノ秒のパルス動作とバリエーションが増えている。

最近IFSWの所長がProf.Grafに交替したことに伴い、1.8Mユーロの投資をして(ノキア社とコンパチブルなテレコムグレードの線引きをが可能な)ファイバー線引き機を導入し、レーザー開発の中心をファイバーレーザー開発へシフトしつつある。タワーの高さは、3階建て建物より少し高く(約10m)、ハーネス(母材加熱用電気炉)のメーカー及び仕様は本格的である。2009年2月から稼動予定である。

ファイバーレーザーを独自開発するとともにレーザー加工技術開発も行っている。例えばパルス幅10ps、32-100kHz、のレーザーを用いた微細加工やファイバーレーザーからの出力を波長変換(二倍高調波)したレーザー(グリーン光)を用い銅と鉄の溶接を試みている。地理的にトルンプ、ダイムラー、アウディ社と近い位置にあるので産業界との共同研究及び人材交流をしやすい環境にある。

◆Photonics Westはファイバーレーザーと太陽電池

今回のPhotonics Westにおける注目の分野は光源だとファイバーレーザー、応用だと太陽電池、燃料電池など省エネ・エコ関連のレーザー応用であった。米国、欧州勢が景気後退の影響も見られずに勢いがあつたのが印象的である。

光源開発で最も注目された発表は、IPG社からグリーン光のファイバーレーザーがリリースされたことであった。CWで15Wシングルモード出力で二倍高調波への変換効率は90%であった。波長変換ユニットとし

てファイバーの先端に取り付ける構造になっている。内部にはLBO結晶を用いてリング共振器型の波長変換ユニットとなっている。また、パルスのグリーンファイバーレーザーの発表もあった。パルス幅は8-11nsで二倍高調波への変換効率は84%、波長532nmで80W出力が可能であるとのことである。今後、IPG社は三倍高調波(最大60W@355nm)、四倍高調波(50W@267nm)のリリースを予定している。さらに、CW高出力のファイバーレーザーの開発では、3kWシングルモードファイバーを複数本束ねて50 μ mのファイバーへコンバインするプロジェクトを計画している。世界的に見てファイバーレーザーはIPG社の独壇場である。

レーザー加工に関しては、米国で”Solar America Initiative”がはしっている。今後益々太陽電池へのレーザー加工の需要が高まると予測される。太陽電池製造にレーザーが使われる工程としてエッジアイソレーション、グリッドパターンニング、スクライビング等があるが、今後はパルス幅がピコ秒領域で波長が紫外域のレーザー利用が盛んになると予測されている。

◆展示会の盛り上がり

Photonics West展示会も金融危機の影響も見られず盛況であった。TRUMPF、IPG、Jenoptikなど欧州の大手レーザー企業による大規模な展示とは別に、ドイツ、フランス、オランダなどが政府主導でパビリオンを設け、自国の光関連技術の成果や中小企業の製品をアピールしていた。スイスやスコットランドも自国のパビリオンを運営していた。ちなみに、中国やシンガポールも企業群が集まってパビリオンを設け、それとは別に独立したブースを運営する中国企業も多かった。米国は、州別のクラスター(ニューヨーク、フロリダ、コロラド、アリゾナ、カリフォルニアなど)毎にブースを集中させて展示を行っていた。日本からも多くの企業が参加していたが、各企業がそれぞれ独立したブースを設け、しかもその多くが運営を米国現地法人に任せており、またそれぞれのブースが分散しているため、日本のレーザー関連光技術の影が薄くなったという印象をぬぐい切れなかった。

このように欧米各国は政府主導の下に、光技術、レーザー産業の振興を図っている。中でもドイツは「ドイツハイテク戦略」のなかで光技術を国家重要戦略の一つに位置づけ、強力にその研究開発を支援している。

主な学会報告予定

5月31日(日)～6月5日(金) CLEO / IQEC (Baltimore, MD USA)

古瀬 裕章「Total-Reflection Active-Mirror Laser with Directly Liquid-Nitrogen-Cooled Yb:YAG Ceramics」

6月14日(日)～19日(金) CLEO EUROPE—EQEC2009 (Munich, Germany)

藤田 雅之「Laser wavelength dependences of amorphization and crystallization of Si by femtosecond laser pulses」

古瀬 裕章「High Efficient Cryogenically-Cooled Yb:YAG Active-Mirror Laser Using Total-Reflection Geometry」

6月29日(月)～7月2日(木) The 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP2009 神戸コンベンションセンター)

古河 裕之「Simulation on Laser Peening」

藤田 雅之「Debris-Free Laser Dicing for Multi-Layered MEMS」

6月30日(火)～7月3日(金) The 7th International Conference on Non destructive Testing on Civil Engineering (NDTCE09 Nantes, France)

オレグ・コチャエフ「LASER-BASED NON-DESTRUCTIVE LOCATION OF DEFECTS IN CONCRETE USING STANDING LAMB WAVES AND IMPACT ECHO」