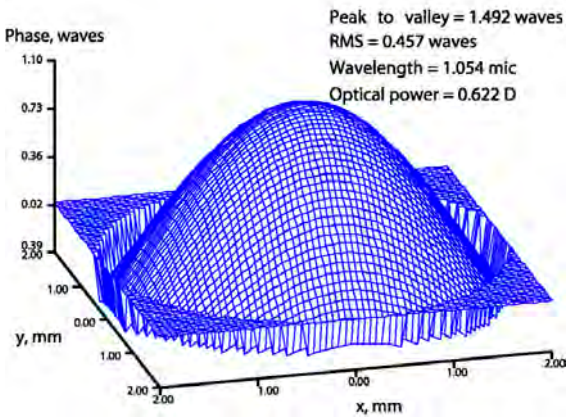
ISSN 0914-9805
Institute for Laser Technology
LASER CROSS レーザー・クロス
2012, Feb.
No. 287
創立25周年記念

CONTENTS

- 低温冷却Yb:YAG全反射アクティブミラーレーザーの増幅特性 —高品位化を目指して—
- 超短パルスレーザー用光学素子の高耐力化
- 【光と蔭】2012への展望
- 第５回全米非破壊試験会議に参加 (5th Pan-American Conference for Nondestructive Testing)
- 主な学会等報告予定



【表紙図】強励起時のTRAM透過波面(励起強度＝1.8 kW/cm²)

低温冷却Yb:YAG全反射アクティブミラーレーザーの増幅特性　—高品位化を目指して—

レーザープロセス研究チーム　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

■加工用高出力光源を目指して！

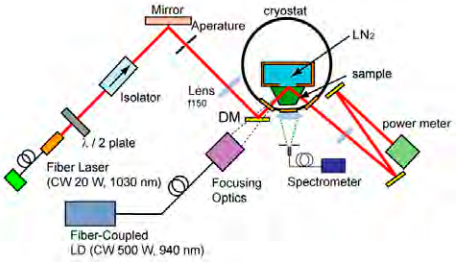
レーザー技術総合研究所は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターと共同で、次世代レーザー材料として期待されている低温冷却Yb:YAGレーザーの開発を行ってきた(Laser Cross No. 196)。また2007年度からは高出力光源の開発を試みており、低温冷却Yb:YAGを用いた全反射アクティブミラー(TRAM: Total-Reflection Active-Mirror)レーザーの開発を行った(Laser Cross No. 254)。さらに10 kW級の大出力動作が可能となる一体型TRAM多段増幅方式(ジグザグアクティブミラー増幅器：ZiZa-AM)を考案・試作し、レーザー発振出力特性を調べた(Laser Cross No. 266)。それぞれ300W級出力を高効率で達成しており、今後の進展が期待されている。

■高品位化に向けて

これまでは横多モード発振器の試作による出力特性の評価を行ってきたため、ビーム品質は良くない。今後はMOPAシステムによる高出力化を図り、高効率、高品質を兼ね備えた理想光源の開発を行う予定である。この際、増幅器の性能評価としては増幅利得だけでなくレーザー媒質の温度や、それに伴う熱影響の調査が必須である。今回我々は基礎データ取得を目的に単一TRAMによる小信号利得、Yb:YAG温度、そして透過波面の測定を行った。

■TRAMの増幅実験

実験構成図を図１に示す。TRAM試料はYAG/Yb:YAGのコンポジットセラミックスであり、神島化学工業に焼成して頂いた。構造の詳細についてはLaser Cross No. 254(ILTホームページ内)を参照されたい。TRAM(Yb:YAG厚み0.4 mm)をクライオスタット内部の液体窒素タンクに取り付け、反射面(Yb:YAG層の裏面)を液体窒素で直接冷却した。励起光源にファイバー結合型半導体レーザー(CW 500W, 940nm)を用い、TRAM裏面でφ４mmになるよう集光した。一方種光源にはファイバーレーザー(CW 20W, 1030 nm)を用い、励起光と同軸にTRAM内を伝搬するよう光路調整した。パワーメーターを用いて増幅後の出力を測定し、小信号利得を調べた。また励起に伴ってどの程度Yb:YAG温度が上昇しているかを調べるために、分光器を用いて蛍光スペクトルを調査した。蛍光スペクトルの形状変化からYb:YAG温度を見積もった。



【図1】TRAM(Yb:YAG厚0.4mm)の増幅試験構成図

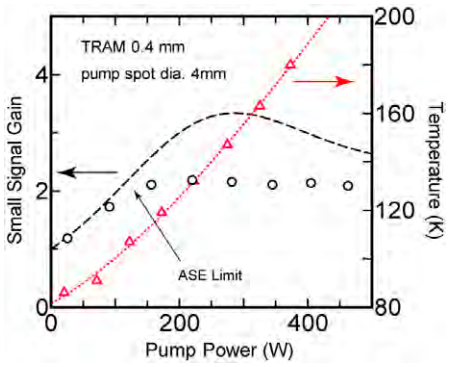
次ページへつづく▶

■増幅利得とYb:YAG温度

図２にTRAM１バウンス時の増幅利得結果と、蛍光スペクトルから見積もったYb:YAG温度を示す。利得は励起パワー 200W付近から飽和し、G～２程度に留まった。一方Yb:YAG温度は励起パワーが増えるにしたがって上昇し、励起パワー 350W程度では180Kまで増加している可能性がある。液体窒素が励起面を中心に沸騰しており、窒素ガスが熱伝達を妨げていることが温度上昇に強く起因していると考えており、より効果的な冷却方式の導入を検討している。一方黒の点線は誘導放出断面積の温度依存性を考慮して計算した小信号利得であり、吸収パワー 150W程度から計算結果と実験結果が合わなくなった。この理由の一つとして、励起径方向に生じる寄生発振を想定している。ASEや寄生発振に関しては現在詳細に調査している。

■波面補償による高品位化！

またシャックハルトマン波面センサを用いてTRAM透過後の波面を調べた。表紙図に励起パワー 450W(= 1.8 kW/cm^2)時に測定された透過波面を示す。波面歪の形状から主要な収差成分は熱レンズを構成するDefocus成分であることがわかる。Zernike多項式による解析の結果、f1000mm程度の熱レンズが生じていることがわかった。この波面歪はレンズ等を用いて補償できると考えている。一方、Defocus以外の収差は可変形鏡等で補償する必要がある。Defocus成分以外の収差RMS値からストレール比(無収差時の集光強度に対する強度比)を見積もったところ、励起強度１kW/cm^{2}までは95%以上を維持しており、ほぼ無収差と考えることができる。したがってYb:YAG厚0.4mmのTRAMでは励起強度1 kW/cm^{2}までは比較的単純な光学系(可変形鏡不要)で高品位化が実現可能と考えている。今後は異なる厚み、ドープ量のTRAM試料で増幅特性の調査を行い、キロワット級レーザーの最適な設計を行う予定である。



【図2】小信号利得、Yb:YAG温度と励起パワーの関係

TOPICS

超短パルスレーザー用光学素子の高耐力化

レーザー技術開発室　本越伸二

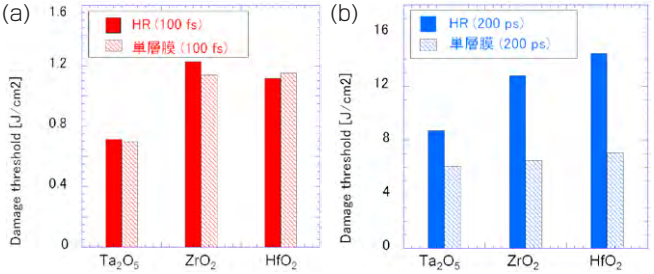
チタンサファイア材料を使用したフェムト秒パルスを持つ高強度レーザー装置が発明されてから久しく、研究用ツールから産業用レーザーとしても利用されている。レーザー材料もチタンサファイアだけでなく、Yb系材料など、半導体レーザーによる直接励起が可能となり、増幅形態も非線形光学結晶による光パラメトリックを用いるなど、装置の幅も広がっている。その結果、テラW(10^{12}W)級のピーク出力は比較的容易に入手できるようになり、ペタW(10^{15}W)からエクサW(10^{18}W)を目指そうとしている。

その一方で、これら超短パルスレーザー装置に使用される光学素子に対する理解、高レーザー耐力化は、十分に進んだとは言い難い。100ps以上のパルス幅に対する光学素子のレーザー損傷閾値は、パルス幅の1/2乗に比例することが知られている。1990年代に入りチタンサファイアレーザー装置が一般的になり、光学材料などの損傷閾値が評価され、約10psより短いパルス幅の損傷閾値は、1/2乗則で求められる閾値よりも高い値を示すことが報告された。様々な研究機関より、誘電体材料に対して同様の報告が出されている。結果、ロングパルスの場合に支配的となる電子雪崩による絶縁破壊とは異なる損傷機構であると理解されている。しかしながら、多層膜光学素子の高耐力化に対する設計指針は示されていない。

本稿では、多層膜光学素子に対して、異なったパルスによるレーザー損傷閾値を評価し、超短パルスレーザー用光学素子の高耐力化への提案を示す。

●単層膜と多層膜光学素子の損傷閾値

誘電体材料が多層膜光学素子のレーザー損傷閾値に及ぼす影響について調べた。評価用レーザー装置には、中心波長800nmのチタンサファイアレーザーを使用した。繰返し周波数10Hzで出力されたレーザーパルスの１パルスのみを評価試料に照射し、照射毎に損傷の有



【図1】波長800nmレーザー光によるレーザー損傷閾値
(a)パルス幅100fs、(b)パルス幅200ps

無を確認し、位置を変える1-on-1試験方法で閾値を決定した。評価試料には、電子ビーム蒸着法により製膜した各種単層膜（光学膜厚200nm）と、低屈折率材料にSiO_2、高屈折率材料にTa_2O_5、ZrO_2、HfO_2のそれぞれを用いた場合の高反射膜を用意した。

図１に、高屈折率材料単層膜とそれを用いた多層高反射膜の損傷閾値を示す。図１(a)は100fsパルスによる結果で、高反射膜の損傷閾値は、構成する高屈折率材料の損傷閾値とほぼ同じであることが判った。高反射膜を構成する低屈折率材料SiO_2の損傷閾値に比べて、高屈折率材料の損傷閾値は低く、その高屈折率材料層の破壊が高反射膜の閾値を決定していることを意味する。比較のために図１(b)には、200psパルスによる損傷閾値の結果を示す。パルス幅が長くなることにより、損傷閾値の絶対値は高くなる。しかし、高反射膜の損傷閾値はそれぞれの単層膜の1.4～2.0倍高い値を示した。200psパルスに対する多層膜の閾値は、単純に構成する膜材料の損傷閾値のみで決定されるのではなく、多層膜設計等にも依存する。このことから、100fsパルスと200psパルスでは、高耐力光学素子の設計指針が異なると言える。

●損傷機構の違い

200psパルスの結果から、高反射膜の損傷閾値は、基板表面に光が届かない、基板表面の粗さや不純物の影

山中千代衛

……178

2012への展望

大阪大学レーザー核融合研究センター改めレーザーエネルギー学研究センターは今年創立40周年を迎える。また、その兄弟組織である（財）レーザー技術総合研究所も創設25周年の記念すべき年を迎えた。前者はレーザーによる科学技術研究を推進するため1972年に大阪大学工学部付属レーザー工学研究施設として誕生したが、４年後大阪大学附置レーザー核融合研究センターとなり、欧米のレーザー核融合研究体制に対抗する目的を掲げ官民挙げての協力の下、研究陣営の構築をすすめ、世界に先駆けて輝かしい成果を上げ、その地位は世界の三極の一つを占めるに至った。

今日までの40年の歴史の重みを噛みしめる2012年である。当初の10年は米国リバモア研究所のレーザー開発シリーズ、Janus、Cyclops、Angus、Shiva、Novaクラスの大出力レーザーレースに対して激光II号、Ⅳ号、MII号、XII号と一歩も引くことなく開発をすすめ、ロスアラモス研究所のCO_2レーザーAntaresに対しては烈光XII号のレーザーを建設し、さらにサンディア研究所のビーム装置PBFAに向けて、励電IV号を開発し、ピルスパワー核融合でもすぐれた勢を備えたのである。事実慣性核融合研究では米国がクラシファイしていたホーラムターゲットと独立にキヤノンボールターゲットを開発し、その成果は世界の刮目するところであった。1972年にエドワード　テラーがＩQEC会議で提起したレーザー核融合の課題である「重水素・三重水素の正規密度の1000倍圧縮」にいち早く挑戦、見事に達成し日本の実力を世界に周知させたのは1980年代の最大の成果であった。この成功の陰には人知れぬ研鑽の山積がある。長寿命高出力フラッシュランプの実現、中性子高イールドLHARTターゲットの開発、燃料圧縮密度の新計測法の完成、均一照射用ランダムフェースプレートの発明、燐酸ガラスの開発、波長変換用大型KDD結晶の育成、爆縮計算コードの実現、高速点火追加熱の考案など膨大な努力の結晶が存在している。

この40年を回顧すると研究センターは大阪大学工学部と密接に協力し、新設のレーザー学会と組んで、全国から人材を集約し、研究メンバーのベクトルをエネルギー開発の一点に集中することに成功したのである。各人の努力はもとより、互いの緊密な協力態勢は全世界に誇るべきものがあった。まさに日本の強力な研究軍団である。時移り、人変われど、この大和と不屈の精神が失われぬ限り、いかなる逆境にも耐えて、邦家のため未来エネルギー開発への旗印を降ろすことはないと確信している。今こそ新エネルギーが希求されている秋である。

創立40年の記念行事が粛々と展開され、関係者のインセンティブが益々高揚し、レーザー核融合の研究への精進を内外に宣明したい。温故知新40年の歴史の重みの上に立ってさらなる一大飛躍を心から望むものである。

【研究名誉所長】

響を受けないために、単層膜よりも高い閾値を示すと考えられる。逆に、単層膜と高反射膜で損傷閾値が変わらなかった100fsの場合では、基板表面の状態は損傷閾値に影響を及ぼさないと言える。ロングパルスでは、欠陥や不純物準位から生成される初期電子が、衝突電離を繰返し、電子雪崩、絶縁破壊に至ると説明される。しかし、100fsパルスでは、電子雪崩に至る繰返し衝突電離をする時間がない。そのため、絶縁破壊に必要な臨界電子密度に到達するには、誘電体材料自身から多量の初期電子を生成することが要求される。この結果、100fsパルスでは、多層膜を構成する膜材料の選択が高耐力化には最も重要であることが判った。

今後、更に異なった誘電体材料に対する評価を進め、超短パルスレーザー用高耐力光学素子の開発を行いたい。

REPORT

第５回全米非破壊試験会議に参加
(5th Pan-American Conference for Nondestructive Testing)

レーザー計測研究チーム　オレグ コチャエフ

【写真】会場と研究発表時の様子

2011年10月１日～７日にメキシコのカンクンで開催された第５回全米非破壊試験会議に参加し研究発表を行った。本会議の目的は、材料や構造物の非破壊検査手法の土木分野への応用に関する公開討論の場を設けることであり、世界20カ国からレーザー応用を含む非破壊試験に関連する様々な研究分野を牽引する研究者、技術者達約500人が参加した。期間中には「製造設備」「検査サービス」「検査技術実試験」および「新検査技術研究・開発」等の分野をカバーする多くの招待講演、学術講演が行われ、活発な議論が交わされた。

筆者は10月２日の土木特性評価(civil characterization)のセッションにて、「Laser-based system for remote non-destructive inspection of concrete structures. Laboratory and field tests.(レーザーリモートセンシング装置を用いたコンクリート欠陥検出の研究)」をテーマに研究発表を行った。発表内容が実フィールドでの実証試験に関するものであったため参加者の関心は高く、発表時には多くの質問を受けた。特に米国、ドイツ、メキシコ、ベネズエラ、シンガポール、ウルグアイの科学者、技術者の関心が高く、発表終了後にも彼らとの詳細なディスカッションを行った。最も多く聞かれた質問は市販できるシステムかどうかということであったが、現時点での答えは「No」ではある。今後は最近行った新幹線トンネルでの実験結果を踏まえ、工業デザインや市販可能なシステムの検討をしていくことが至近の課題である。一方で、彼らとの討論や他の研究発表内容のチェック等から我々の技術は他機関に比べ依然として優れており、最先端の技術であるという強い印象を与えることができたように感じた。

本会議に参加して世界中の非破壊試験分野のリーダー達とのディスカッションや情報交換を行うことができ、非常に有益な機会であった。

主な学会等報告予定

3月15日(木)～18日(日)　応用物理学会春季講演会(東京・早稲田大学他)
- 李　大治　「負の屈折率媒質によるスミス・パーセル放射」
- 古河　裕之「レーザーアブレーション生成衝撃を用いたレーザーピーニングのシミュレーション」
- 古河　裕之「大気中及び水中のレーザーピーニングのシミュレーション」
- ハイク　コスロービアン「大出力多チャンネルレーザー増幅器のための新規コヒーレントビーム結合技術」
- 染川　智弘「ナノ秒白色光レーザーを用いた大気中CO2の長光路差分吸収分光測定」

3月24日(土)～27日(火)　日本物理学会　第６７回年次大会(関西学院大学)
- 城崎　知至「自己生成磁場による高速電子ビームガイディング」

3月25日(日)～28日(水)　日本化学会第92春季年会(慶應大学日吉キャンパス)
- 谷口　誠治「ピロリ菌由来フラボドキシンの超高速光誘起反応ダイナミクス」
- ハイク　コスロービアン「Experimental and Theoretical Analyses of Photoinduced Electron Transfer in Medium Chain Acyl-CoA Dehydrogenase (MCAD): Electron Transfer in the Normal Region

発行／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・谷口誠治までお願いいたします。
(TEL:06-6879-8761, FAX:06-6877-0900, E-mail:taniguchi@ilt.or.jp)