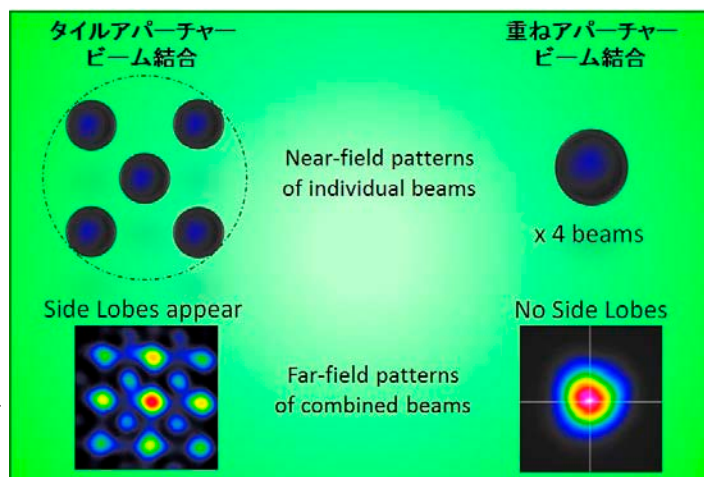


CONTENTS

- 高出力、高品質レーザー開発に向けた新しいコヒーレントビーム結合技術
- ロチェスター大学滞在記
- 【光と蔭】光と蔭のあや
- 主な学会等報告予定

【表紙図】コヒーレントビーム結合における近視野での各ビーム配置((左)タイルアパーチャー、(右)重ねアパーチャー)と各配置における遠視野での結合ビーム強度パターン



高出力、高品質レーザー開発に向けた新しいコヒーレントビーム結合技術

レーザープロセス研究チーム ハイク コスロービアン

◆ はじめに

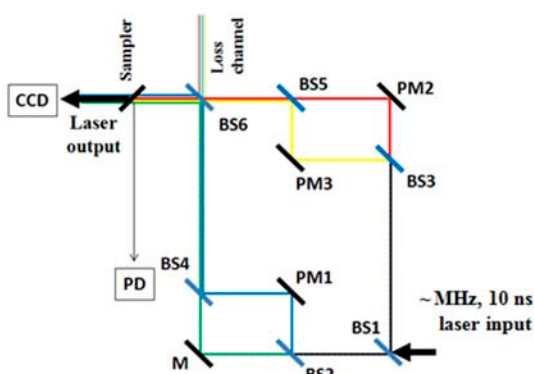
高出力かつ高いビーム品質を持つレーザーの開発は、さまざまな応用に向けその重要性がますます高まっている。複数の数kW級レーザーを結合して超高強度光を得るビーム結合の概念はその現実的な選択肢の1つであり、コヒーレント、インコヒーレント、スペクトル結合等多くの手法が提案されてきた¹⁾。これらに対し当研究所ではこれまで、単一の光検出器を用いた新しいコヒーレントビーム結合(CBC)技術の開発を行い、5本のレーザーを開口部(近視野)でタイル状に配置した場合(tiled aperture (TA))でのビーム結合に成功した(Laser Cross No.311, 2014 Feb.)。TAでのCBCは、結合ビーム中心にある突出部(central lobe)の強度がビームチャンネル数の2乗に比例するため高強度が得やすく、一般的な応用には有利である。しかし一方、この配置では結合ビームの充実因子(fill-factor)が損なわれるケースが多い。表紙図左に示すように、TAでは充実因子が1よりも小さく結合ビームにサイドローブ(side lobe)が現れるため、炭素繊維(CFRP)やMEMS等の精密加工への応用に際し、その精度に影響

をおよぼす可能性がある。そのようなケースには、複数ビームを開口部で同軸上に配置する重ねアパーチャー(filled aperture, FA)が有利である(表紙図右)。FAのCBCはサイドローブが現れることはなく、より精密な加工への応用に適している。本稿では、単一光検出器によるCBC技術を用いてFAでの4ビーム結合実験を行い、結合ビームの特性評価を行った結果について報告する。

◆ 重ねアパーチャー(FA)でのCBC実験

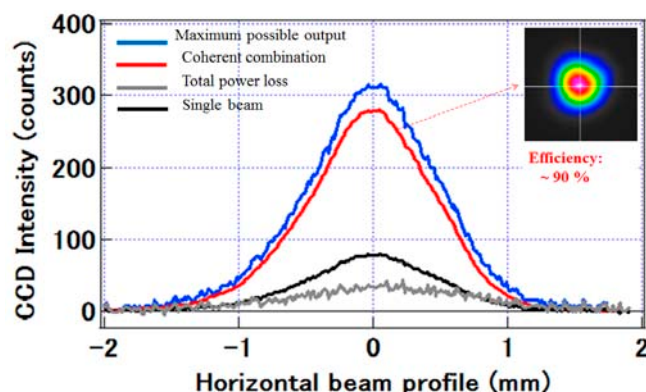
図1にFAでの4ビーム結合システムの配置図を示す。主発振器からのレーザー光(1064nm, cw)は4つのビームチャンネルに分割され、再び結合される。1つのビームチャンネルは参照光として用いられる。各ビーム間の位相差を制御あるいはロックするため、結合ビームをサンプラーで分割(強度 <<1%)し、単一の光検出器(フォトダイオード, PD)により検知する。PDからの信号は、簡単な制御アルゴリズムにより各ビーム経路に配置したピエゾアクチュエーター(PM)にフィードバックされ、結合ビーム強度が最大化される。結合ビームの空間プロファイルはCCDカメラによ

次ページへつづく▶



【図1】4ビームCBC実験配置図(BS:ビームスプリッター、PM: ピエゾミラー、PD:フォトダイオード)

り観測した。位相制御のため我々は、ゼロ平均にディザリングした確率的並列勾配降下法(SPGD)を離散的ベルヌーイ試行に応用したアルゴリズムと、強度-位相マップ上での擬2次対角クライムヒル法に基づくアルゴリズムの2つの制御方式をテストした。その結果、結合ビームはともに単一のコヒーレント光と同等のふるまいを示すことがわかった。このCBCシステムと制御アルゴリズムは、高繰り返し(>500kHz)、時間幅サブナノ秒(あるいはそれ以上)のパルスレーザーにも適用できるが、これには各パルスの一時的なオーバーラップ、繰り返し周波数下でのPDバンド幅の保持、多くのパルスに渡る捕捉信号の平均化および最大化を行うことが重要となる。また我々は、位相制御の高速化のためkHzでの信号処理が可能なFPGA(field programmable gate array)を採用した。これにより位相制御速度の制限は piezoelectric transducer の応答速度のみとなる。図2に4ビーム結合実験の主な結果を示す。4ビームCBCの結合効率はcw光で90%、パルスでは85%と見積もられた。また結合ビームの位相の2乗平均偏差は



【図2】結合前の単一ビーム(黒)、4ビーム結合後(赤)、最大結合効率の予測値(青)、ビーム結合時の全損失(灰色)の強度分布(遠視野)

レーザー波長の1/25よりも良い値であった。この場合CBC効率の低下は約4%以下に抑制される。CBC効率低下の他の要因には各ビームの強度のアンバランスや、分散、ポインティング、オーバーラップのミスマッチ等が考えられ、これらの要因を改善することにより、さらに高効率のCBCを達成することが可能である。

◆ まとめ

精密加工等への応用が可能な高平均出力、高品質レーザーの開発に向け、単一光検出器を用いた重ねアパーチャー配置のコヒーレントビーム結合技術を提案し、cwおよび高繰り返しナノ秒パルスレーザーを光源に用いた4ビーム結合実験を行った。その結果、現在のレーザー装置でのCBC効率は最大約90%(cw光)と見積もられた。本技術は基本的にkW級のレーザー光源にも適用可能であり、今後MOPA等さまざまなレーザー光のCBCへの応用が期待できる。

◆ 参考文献

[1] A. Brignon (Ed.), Coherent Laser Beam Comb.,

ロチェスター大学滞在記

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 三上勝大
日本学術振興会 特別研究員(PD)

米国ニューヨーク州ロチェスター大学(University of Rochester、以下U of R)にある研究施設 Laboratory for Laser Energetics (LLE) は、OMEGAレーザーおよびOMEGA-EPLレーザーという世界屈指の大型高出力レーザー装置を有している。

OMEGAレーザーは60本のビームラインからなり、40 kJ以上の出力を誇るナノ秒パルスレーザーである。一方で、OMEGA-EPLレーザーは4ビームラインで構成され、パルス幅は最短1 ps、出力1 kJ、その強度は1 PWになる。現在は、OMEGA-EPLレーザーに光パラメトリッ

ク増幅法を加えたOMEGA-EP OPALが検討され、パルス幅20 fs、出力2 kJ（強度100 PW）を目指している。

筆者は2013年9月～2014年8月の約1年間、LLEのStephen D Jacobs教授がリーダーを務めるOptical Materials Technology Group（OMTグループ）にVisiting Research Associateとして在籍し、レーザー損傷およびその評価技術に関する研究に取り組んだ。研究成果の紹介は別に譲り、本稿ではLLEのOMTグループの取り組みについて紹介する。

5つの研究キーワード

OMTグループ内の研究キーワードは大きく分けて5つである。“Glancing Angle Deposition（以下、GLAD）”、“液晶素子”、“光学素子洗浄”、“材料研磨”、そして“レーザー損傷”である。光学材料に施す光学薄膜の製膜はAmy Rigatti教授がリーダーを務めるOptical Manufacturing Shop Groupが担当し、OMTグループと連携を取りながら研究が進められている。

GLADは蒸着法的一种であり、和訳すると「斜め蒸着」である。偏光素子製作を目的とし、電子ビーム蒸着時の製膜基板を大きく傾けることにより基板面に対して斜め方向に柱状構造を形成する。製作された膜は複屈折

を有する。現在、直径2 inchまで製作され、最終的に大型レーザースystemに導入することを目指している。LLE内での偏光素子研究は、液晶素子の研究が先行している。直径100 mmの液晶素子の偏光状態を、波長355 nm光を用いて68時間かけて空間分解能0.5 mmでマッピングする評価系が構築されている。

光学素子洗浄の研究では、特徴的な表面構造により拭き取り洗浄が難しい回折格子の洗浄が主要なテーマとなっている。2013年には濃硫酸と過酸化水素水溶液の酸混合液（通称、ピラニア溶液 Piranha solution）洗浄により、光学素子のレーザー耐性が向上したことが報告された[1]。また別手法として、プラズマクリーニングについての研究も進められている。

LLEでは、直径300 mmの材料を面精度20分の1波長で研磨可能な大型研磨機を2台有している。この研磨手法はウェット研磨であるが、磁気流体研磨にも取り組んでいる。現在の磁気流体研磨の研究では、磁性体を変化させながら最適な研磨条件について検討を行っている。

レーザー損傷の研究では、光熱ヘテロダイニメーシング法による微少吸収測定を空間分解能50 μ mで

山中千代衛



光と蔭のあや

去年の暮、OELキャンペーンが600号を迎えた。二、三の方のお勧めもあり、卒寿記念に上梓することになった。

OELキャンペーンの1号は2004年1月5日にネットで発行したのであるが、それ以来月曜日を定例日として続けてきた。この前身はILEキャンペーンとして2年間に108号を出したが、図に乗って橋本龍太郎総理大臣の威張り型を揶揄した所、その筋からクレームがきた。ということで、改めてOELキャンペーンを始めることになった。

OELキャンペーンは発行元オプトエレクトロニクスラボラトリのホームページで全号ご覧頂けるのであるが、2000年の「光と蔭」、2005年の「光と蔭のはざま」、2010年の「光と蔭の綾」CD版、2012年の「レーザー総研25年の進歩」CD版に続く出版となった。

旧年中に校正を終え印刷にかけたいと努力したが、思った様にすまず、片岡紀子さんの手をわずらわせて、今度どうやら刊行の運びになった。公益財団法人レーザー技術総合研究所からの出版ということで関係者には厚く御礼申し上げる次第である。

OELキャンペーンの内容はその時、その場で感じたこと、反省したこと、その他希望の類を書き連ねたもので、まさに洛陽の紙価を下げる代物である。それでも筆者にとっては思い出の記を中心に若かりし頃の行状が縷々綴られているので、反省の材料にはなっている。

「光と蔭のあや」は「エネルギー戦略の不毛(479)」に始まって「温故知新(600)」で終わっている。心は日の本の再生への願である。

もし皆様のご同感を得る所があれば誠に喜ばしい限りである。

【名誉所長】

評価できる装置を確立している。また近紫外光を用いたレーザーアニールによる光学素子の高耐力化について報告している [2]。

テーマは「全自動化」と「測定雰囲気制御」

レーザー損傷チームでは、Semyon Papernov博士が管理するナノ秒ダメージ評価レーザーシステム（波長1053nm/ 526nm/ 351 nm・パルス幅 1.4ns/ 1.2ns/ 0.9 ns）とAlexei Kozlov氏が管理するピコ秒ダメージ評価レーザーシステム（波長 1054 nm・パルス幅 0.5 ~10 ps（可変）もしくは100 ps）を保有している。チームとはいっても2台あるレーザー耐力評価用のレーザー装置に1名ずつ専任者がいるだけで、私を含めて3人であった(写真)。私が在籍している期間、両評価レーザーシステム共に大規模な改修プロジェクトが進められ、現在も継続している。LLEはソフトウェアや配線、ネットワーク、機械工作などの専門部署を有しているためプロジェクトチームが組織される。改修のテーマは2つ、「全自動化」と「測定雰囲気制御」である。「全自動化」はその名の通り、レーザー耐力評価に必要な照射レーザーエネルギー密度の決定、照射位置の制御、レーザー損傷発生有無の判定を自動で評価できる系の構築である。プロジェクトの中で、最も難しい課題であるのがレーザー損傷の検出である。一般に損傷の有無はレーザー照射前後の試料を光学顕微鏡で観察し、レーザー損傷の有無を肉眼で判断している。如何に定量的かつ高分解能、高精度に判定するのか、課題が山積して



【写真】LLEレーザー損傷チーム（左より、A. Kozlov氏、筆者、S. Papernov博士）

後の試料を光学顕微鏡で観察し、レーザー損傷の有無を肉眼で判断している。如何に定量的かつ高分解能、高精度に判定するのか、課題が山積して

いる(筆者のLLEでの研究は、この課題に関連したものであった)。

「測定雰囲気制御」は、ナノ秒ダメージ評価システムを用いた評価を乾燥窒素雰囲気下で行うことである。大阪大学では、真空容器内に設置された光学素子が気相不純物により汚染され、レーザー耐力が低下することが報告されている [3]。LLEのOMEGAレーザーも例外ではなく、従来の真空中で評価を行っているピコ秒ダメージ評価システムだけでなく、ナノ秒ダメージ評価システムでも評価試料周辺を囲い、湿度0%の条件下でレーザー耐力を評価する態勢を整えている。

OMEGA-EP OPALに関連して、筆者が帰国する直前にはパルス幅が数~数10フェムト秒の超短パルスレーザーによるレーザー損傷評価のプロジェクトが検討されていた。

おわりに

LLEのOMTグループは、非常に高いアクティビティを誇っており、それを支える経済的および人間的なサポートが非常に強固であった。その取り組みの大部分は大型レーザーシステムに関連した研究であり、成果公開よりも大型システムを用いた研究を下支えすることを最優先としている印象が強かった。今回の滞在で“アメリカらしい”発想を目の当たりにした。「測定雰囲気制御」では、ガス置換の小型容器を評価試料の設置位置に置けないと判ると、光学定盤の全てを覆って雰囲気を置換することに決定。筆者も“アメリカらしい”感覚も取り入れ、今後の研究に取り組んでいきたい。

[1] H. P. Howard, et al., Appl. Opt. 52 (2013) 1682

[2] S. Peparnov, et al., Proc. SPIE 8885 (2013) 888504

[3] H. Murakami, et al., Proc. SPIE 8530 (2012) 853024

主な学会等報告予定

3月11日(水)~14日(土) 第62回応用物理学会春季学術講演会 (東海大学湘南キャンパス)
ハイク コスロービアン 「Tiled Aperture Coherent Combining of Multiple Beams using Bernoulli Algorithm」

李 大治 「負の屈折率媒質による電子ビームからの電磁波放射」

谷口 誠治「液中レーザーアブレーションによるナノ粒子作成：溶融塩の効果」

染川 智弘「水中レーザーリモートセンシングに向けた海水溶存ガスのラマン分光」

3月24日(火)~26日(木) 電気学会全国大会 (東京都市大学世田谷キャンパス)

島田 義則「レーザーによるトンネル掘削コンクリートの健全性評価技術」

倉橋 慎理「レーザーを用いた環境振動下にある高架橋床版内部欠陥遠隔検出技術の開発」

3月26日(木)~29日(日) 日本化学会第95春季年会 (日本大学理工学部船橋キャンパス/薬学部)

谷口 誠治「D-アミノ酸酸化酵素の蛍光ダイナミクス：機能阻害効果の検討」