



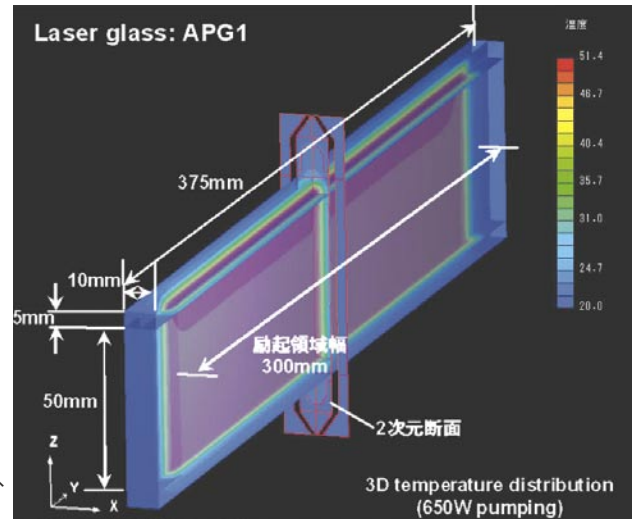
2006, Aug.

No. 221

## CONTENTS

- 高密度フォトン発生技術を支える  
～ハイパワーレーザー実現のための基盤技術開発～
- 平成17年度研究成果報告会(ILT2006)開催
- 【光と蔭】人脈について
- 高密度フォトン産業創出に向けた  
LD励起大出力スラブレーザーの開発

【表紙図】3次元流体解析により求めたス  
ラブ型レーザー媒質の3次元温度分布



## 高密度フォトン発生技術を支える ～ハイパワーレーザー実現のための基盤技術開発～

主任研究員 藤田雅之

### ◆平成14年度から4年間にわたり

レーザー技術総合研究所は、浜松ホトニクス(株)からの再委託を受けNEDO委託事業「新産業創出のための高密度フォトン発生基盤技術の研究」(平成17年度終了)の一部として、ハイパワーレーザー実現のための基盤技術開発研究を進めてきた。当研究所に課せられたテーマは、(1)レーザー増幅器の設計研究における熱解析、(2)レーザー光学素子の耐力評価、(3)新固体レーザー材料の特性評価である。いずれも、次世代のハイパワーレーザー実現のためには必要不可欠であり、当研究所が得意とする要素技術開発である。

### ◆レーザーの高出力化を阻む壁

レーザーの高出力化を工学的に制限する大きな壁として“熱”と“ダメージ”の問題がある。これらを克服することにより、レーザー媒質が本来持つ特性を最大限に生かすことが期待できる。また、“熱”と“ダメージ”を十分考慮した設計をしなければ、ハイパワーレーザーは瞬時にして瓦礫と化す可能性すらある。地味ではあるが重要なテーマに臨んだ4年間の成果を以下にまとめて紹介する。

### ◆レーザー増幅器の熱解析

プロジェクトが目指したのは、ジグザグスラブ方式での半導体レーザー励起ハイパワーレーザーの実証である。対称軸がなく光線がジグザグに進むために3次元の数値解析が必要となる。どのようなサイズのスラブが最適であるのか、その指針を設計時に与えることは予算と時間が限られたプロジェクトにおいては極

めて重要である。本テーマには理論・シミュレーションチームの古河副主任研究員が取り組んだ。彼は、プロジェクト開始以前から阪大レーザー研と協力してジグザグスラブ方式に着目し3次元のレイトレースコードの開発を進めていた。(1998年「レーザークロス」No.124)

### ◆レーザー設計の水先案内人として

3次元ジグザグスラブ熱効果解析コード「THESLAC」を用いて、高出力、高繰り返しジグザグスラブ固体レーザーの熱複屈折効果を3次元的に定量的に評価した。計算では、励起LD光の発散角も考慮されており、熱レンズ焦点距離等の結果から、スラブの高さとして最適値を導き出すという定量的な提案を行うことができた。また、スラブ内の温度分布の均一性や、スラブの変形計算を行い、熱複屈折損失量分布の計算においては、中心部ではほとんど熱複屈折損失は無く熱複屈折損失量の全面積での平均は約6.2%であることが評価された。

### ◆実験データをフィードバック

プロジェクト後半では、実験で得られたデータを計算にフィードバックし詳細な熱レンズ効果解析の3次元定量的評価を進めた。解析技術の向上とレーザー媒質周りの発熱要因をほぼすべて計算に取り込むことで、実験結果を再現しさらに測定結果を予測するレベルまで到達した。THESLACのポストプロセッサとして集光特性解析コードを開発し、遠視野像(FFP)の詳細を予測可能とした。

次ページへつづく▶

◆レーザー光学素子の耐力評価

レーザー媒質から高エネルギーパルスを発生させても、外部へ取り出して使えなければ意味がない。レーザー光学素子の耐力は最後の大きな壁である。一般的にハイパワーレーザーの光学素子には誘電体多層膜が多く用いられる。高反射膜にしろ、無反射膜にしろ、偏光反射膜にしろ、低屈折率材料と高屈折率材料を交互に薄膜として積み重ねて形成されている。この多層膜が光学的にダメージを発生させるメカニズムはいまだに明らかとなっていない。どうすれば高耐力の光学素子を実現できるか、この課題に取り組んだのが技術開発室室長の本越副主任研究員である。国内でも数少ない光学素子ダメージ研究者の一人である。

◆レーザー光学素子の耐力を決めるのは

ダメージ発生のメカニズムは複雑でありさまざまな要因が関係していると考えられている。本研究では、自作や市販のさまざまな材料を用いた光学素子のダメージ閾値を実験的に求めデータベースを構築する地道な作業に取り組んだ。高反射膜の損傷閾値を決定するのは、構成する薄膜材料の吸収係数であり材料の選択は高耐力化に際して最も重要な要素であることが明らかとなった。

◆高繰り返しパルスの影響

繰り返し照射によるレーザー損傷耐力への影響に関しては、高反射膜の反射率が異なるため基板の影響が大きく表われる結果が得られた。高繰り返しレーザーによる薄膜の損傷機構は、繰り返し照射による熱の蓄積が原因であることが明らかとなった。高繰り返しレーザー用の光学薄膜は薄膜自身の吸収係数とともに、その熱伝導率が重要な要素である。光学素子の耐光パルス数、すなわち寿命についての評価においては、繰り返し周波数の増加に伴い対数で寿命は短くなる結果が得られた。市販の多層膜偏光子に対する繰り返し照射時の耐力を評価した際には、単一パルスの損傷耐力に比べて半分以下になることが明らかとなった。

◆偏光子には向きがある

偏光子(ポラライザー)は偏光によって光を反射したり透過したりする光学素子である。薄膜側と基板側の両方から光が入射するため、レーザー損傷閾値の入射方向依存性を評価した。その結果、基板側からの入射光に対するレーザー損傷閾値は、薄膜側のそれに比べて、1/3～1/2の耐力であることが分かった。偏光子を構成する誘電体材料の選択と合わせて、システム設計

時に考慮すべき点であることが明らかとなった。

◆新固体レーザー材料の評価

本プロジェクトで採用されたレーザー媒質はNdドープリン酸ガラスであるが、将来的可能性を考慮して新たなレーザー媒質の評価を並行して進めた。今回取り上げた材料は低温冷却により性能が向上できると期待されるYb:YAGである。本課題は、レーザー加工計測研究チームの藤田主任研究員が担当した。Yb:YAG結晶の分光特性の温度依存性を評価し、100K以下に冷却することにより高効率動作が可能であることが明らかとなった。

◆ハイパワーレーザーとしての可能性

低温動作のYb:YAGレーザーにおいて量子欠損で制限されるほぼ理論限界のスローブ効率90%が得られたことから、短パルスレーザー発振実験へと研究を展開した。SESAM(半導体可飽和吸収ミラー)による受動モードロックによりパルス幅6.8psが得られ、低温でのピコ秒動作を実証した。次いで、室温動作のモードロック発振器と液体窒素冷却の再生増幅器からなるMOPA構成のピコ秒レーザーシステムを開発し、その動作特性を評価した。増幅出力として、エネルギー3.4mJ、パルス幅12.5psが得られ、抽出効率は31%であった。10ピコ秒再生増幅器としては高いエネルギーが得られ、産業応用などに利用可能なレベルである。パルスエネルギーはクライオスタット窓のARコート光損傷により制限され、繰り返し周波数はポッケルスセル中で生じる熱効果により500Hzに制限された。高耐力・低吸収損失の光学素子を導入することにより、平均出力の増大が図れると期待される。

◆レーザーのハイパワー化を強力にサポート

高密度フォトンプロジェクトにおいて当研究所は十分にその責務を果たせたと言えるのではなかろうか。プロジェクト期間中は目標達成を支援し、プロジェクト後は得られた成果をさらに発展・普及させるべく努力することがわれわれの使命である。今後も、3次元熱解析コードの改良、高耐力光学素子の開発、低温冷却レーザー開発を進め、ハイパワーレーザー開発に貢献すべく努力していく所存である。特に、光学素子の高耐力化に関しては、国内でも異彩を放つレーザー技術開発室を立ち上げたところである。いつでも気兼ねなく、技術相談のドアをノックしていただきたい。

最後に、本研究に際してご支援・ご協力をいただいた浜松ホトニクス(株)、阪大レーザー研の方々に感謝の意を表します。

REPORT

平成17年度研究成果報告会(ILT2006)開催

■大阪、東京でレーザー技術の最新の成果を報告

当研究所は、産業界への応用、新規プロジェクトへの展開に対する提言等を目的に毎年7月に大阪、東京の2会場で前年度の研究成果報告会を開催しています。本報告会では、当研究所が取り組んでいる、レーザー技術を応用した研究(フェムト秒レーザーを用いた加工お

よび計測、レーザー光学部品開発、レーザー損傷試験、レーザー超音波法を用いたコンクリート探傷、X線医療応用、生体バイオ関連など)に加え、文部科学省のリーディングプロジェクトの一環である



極端紫外(EUV)光源開発について、最新の成果、国内外の動向を詳細に報告しています。

### ■企業からの積極的な要望に実りある成果で対応

今年も7月4日に大阪府豊中市の千里ライフサイエンスセンター、7月19日に東京都港区の虎ノ門パストラルで平成17年度の研究成果報告会を開催致しました。大阪会場では60名、東京会場では65名の参加があり、熱心なご質問やご意見を頂き、活発な議論が行われました。

また、ポスター発表(大阪会場)やレーザー技術に関する相談窓口も設け、積極的に企業からの要望をお受けし、実りある成果を生み出すよう迅速に対応させて頂いております。おかげさまで、今年度も日本全国の企業から多数の技術相談が寄せられており、当研究所への期待、関心の高さが窺われます。今後もぜひ当研究所の研究動向および成果に注目して頂きたいと思っております。

#### (主な講演発表)大阪会場

「フェムト秒レーザーが見た加工の謎を探る」主任研究員 藤田雅之

金属でもないガラスでもない産業的に重要な材料である半導体。超高速時間分解計測や結晶格子の直接観察から、フェムト秒パルスが見た半導体とはどんな加工材料であるかを詳細に報告した。

「高出力EUV光源をシミュレーションで設計」研究員 砂原淳

1次元および2次元放射流シミュレーションコードを駆使してレーザー生成プラズマからの極端紫外光(EUV)の発生と、プラズマの挙動、レーザー照射条件との関係を明らかにし、高効率、高出力の光源を得るための指針を報告した。

「レーザープラズマX線を用いた生体医用応用-新しいレーザー医用応用の可能性に向けて-」主席研究員 今崎一夫

レーザープラズマから発生する低エネルギーX線を細胞除去に用いることができる可能性がある。このような医用応用の課題および細

胞除去のための諸条件について詳細に報告を行った。

「環境有害物質処理は、カーボンナノチューブ(CNT)電子源にお任せ」

研究員 山浦道照

CNTから放出される多数の電子およびこれらの加速を利用して、ダイオキシン類、クロロフェノール、PCBなどの化学有害物質の高効率還元反応処理技術の紹介。講演では、大気汚染物質、水中有害物質処理への応用も併せて詳細な報告を行った。

「シミュレーションが拓くレーザーアブレーションの薄膜生成、剥離への応用」

副主任研究員 古河裕之

「1 レーザーアブレーションによる薄膜生成」「2 レーザーアブレーションによる薄膜の剥離」に関して詳細な報告を行った。

「レーザー超音波リモートセンシング -あらゆる構造物の劣化を診断-」

副主任研究員 島田義則

レーザー超音波リモートセンシングの産業応用とモバイルシステムの構築など実用化に向けた最先端研究の紹介を行った。

「無限の太陽光から直接レーザーをつくる -宇宙/地上での応用を目指して-」

研究員 佐伯拓

太陽光からレーザー光の高効率直接発生が可能であることが最近明らかになった。講演では、このレーザーを用いた宇宙太陽光発電所、太陽光スペクトル利用率の高いレーザー材料、レーザー光発生実験について紹介し、今後の展望を述べた。

「レーザー計測と光学顕微鏡 -顕微フェムト秒蛍光計測システムの開発と応用-」

研究員 谷口誠治

微小領域における光計測技術は、生体関連分野等で現在急速な発展を見せている。報告では、われわれが開発を進める光学顕微鏡とfs時間分解蛍光計測法を組み合わせた新手法と、生体関連物質への応用について詳細に述べた。

#### (主な講演発表)東京会場

「高平均出力レーザーの実用化へ -高耐力光学部品の開発-」

副主任研究員 本越伸二

ピーク強度、熱負荷共に大きいEUV光源用ドライバレーザー。

山中千代衛



## 人脈について

山脈とか水脈などの言葉をもじって社会内部で一定の関係のある人と人とのつながりを言うのが人脈である。

人間の社会という時、まさに人間がきわめて重要な意味合いを持ってくる。人は人間において仕事を成し遂げ、はじめて成果をあげることができる。孤立して生存するのはまさにロビンソンクルーソの孤島における生活のようなもので、せいぜい生き長らえることにしか目標がない状態だ。

研究者、技術者の立場に立つと人間活動としていかに人脈を構築していくかが大きなポイントとなる。そのためまず推奨したいのが学会活動である。年次大会、研究会、委員会など研究上の人脈を拡大する機会はいくらでもある。ただ当人がその気になるか否かで結果は天と地の開きがある。小は国内学会から大は国際学会まで、自らの研究成果を公開して同好の士と連帯を重ねることは学者冥利に尽きると言わねばならない。

さらにもっと広く世間に人脈を広げることを考えても悪くはない。まさに産・学・官の連携をすすめ、研究成果の社会への還元を図ることは時代の要請でもある。科学は科学のためだけに捧げるべしというピューリタンもそれなりに評価したいが、そもそも国民の税金を使う研究には国民へのフィードバックが必要とされている。端的に言うと説明責任ということになるだろう。

人脈が出来るといろいろの問題について教示や忠告が受けられ、相談に預かってもらえるから、仕事の推進には絶大な寄与が生まれる。もちろん同業者とは競争関係にあるとしても、それでも人脈により友情が働くのでそのメリットは計り知れない。人生すべてまわりは敵という勇敢無知な人達にはなりたくない。

かつて尊敬する山村雄一学長の「人脈会」によべられたことがある。さる料亭で200人を超すいろいろの職業の人達が集まり、天下国家を論じる有様に山村先生の人脈の豪華絢爛たる姿に感嘆したものだ。その時の先生から頂いたレッスンは「むやみに人と喧嘩するな」ということだった。研究上の自己主張はどんどん発言していいが、それで人と諍いをおこすことはないのである。むしろ連帯が生まれるのである。

幸いレーザー核融合ではパイオニアの一人として世界中に人脈を築き上げることが出来た。米、英、仏、独、露、スペイン、中国、オーストラリア、カナダその他世界のどの国に行ってもIE Osaka Universityが通用するのは何と言っても大きな喜びである。

人脈の意義を知り、人脈を大切にしたい。人脈はEネットのように簡単には構築出来ない。

使用される光学素子、コーティングは、繰り返しが増加するとどうなるか？ 高耐力の条件は？ さまざまな課題に対して開発を進めている光学部品について詳細な報告を行った。

#### 「2009年、リソグラフィ露光技術の大本命—EUV(13.5nm)光源」

研究員 山浦道照

EUV光源には、高効率、クリーンかつ高速供給可能なターゲットが要求される。講演では、ターゲットを用いたEUV光放射特性、高速供給方式パンチアウト法の紹介、世界のEUV光源開発の現状も併せて詳細な報告を行った。

#### 「スミスパーセル方式におけるテラヘルツ(THz)光源—新しい強力THz光源の可能性に向けて—」

主席研究員 今崎一夫

新しいTHz光源の可能性としてスミスパーセル超輻射方式に着目し、2次元、3次元計算コードの開発を行った。講演では、これらの計算結果と発展性について詳細な報告を行った。

上記に加え、下記3件の成果報告(概要は大阪講演参照)も行った。

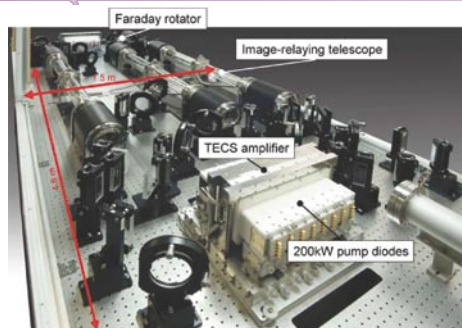
#### 「フェムト秒レーザーが見た加工の謎を探る」主任研究員 藤田雅之

副主任研究員 島田義則

#### 「無限の太陽光から直接レーザーをつくる—宇宙/地上での応用を目指して—」

研究員 佐伯拓

## INFORMATION



## 高密度フォトン産業創出に向けたLD励起大出力スラブレザーの開発

浜松ホトニクス株式会社 中央研究所 川嶋利幸

ジウム)をドープしたリン酸ガラスから成るレーザー slab を光励起するもので、slab のエッジ部に温度調節機構を設け slab 内部の温度分布を均一化する機能を持たせている。本TECS技術により、通常3 $\lambda$ 以上の熱収差が発生するところを0.6 $\lambda$ 以下、1/5に低減させることが可能となった。この新型レーザー増幅器を2台搭載した多重パス型MOPA(Master Oscillator and Power Amplifier)システムにより、ピーク出力2.4GW、平均出力217W(21.7Jx10Hz)を回折限界の5倍のビーム品質で得ることに成功した。この結果は、slab 幅の拡張による100J出力へのスケール拡大則を実証したことを示し、これをもってプロジェクトの最終目標を達成した。

### ■高密度フォトンを利用した新規産業の創出

今後、位相共役鏡や可変鏡等により高次の波面収差成分も含めた高精度な収差補正を行うことにより、さらなる大出力を回折限界近いビーム品質で実現しながら、同時に制御性や安定性および信頼性が求められる産業用レーザーのための基礎技術についても開発を進めていく予定である。

本プロジェクトで開発された大出力レーザー光を集光すると、 $10^{12} \sim 10^{15} \text{W/cm}^2$ の光強度が得られる。このような高密度フォトンによるアブレーション、衝撃波、プラズマ等を利用することにより、物質・材料にさまざまな形態・性質・機能を与える新しい加工・改質が進展している。今後、これらを自動車・半導体等の分野における新しい製造技術や、医療・バイオ・ナノテクノロジー等の新分野へ応用することにより、高密度フォトンを利用した新規産業の創出につなげていくことが重要である。

### ■レーザー核融合発電炉のための第一の候補

最後に、LD励起大出力パルス固体レーザーは、将来のレーザー核融合発電炉のためのメガジュール級レーザードライバーの第一の候補でもある。本プロジェクトの研究成果が、究極の高密度フォトン産業であるレーザー核融合発電の実現に向けた一つの試金石になれば幸いである。

【写真】開発された20J、10Hz出力LD励起スラブレザーシステム。今後、slab の大口径化により100J、10Hz出力までスケールアップされる計画である。

### ■半導体レーザー励起固体レーザーの実証

新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)基盤技術研究促進事業(民間基盤技術研究支援制度)委託事業「新産業創出のための高密度フォトン発生基盤技術の研究」プロジェクトが、平成18年3月をもって終了した。本プロジェクトは、高いフォトン密度により、大面積を高スループットで加工・処理できる産業用大出力レーザーの基盤技術の確立を目的とした大出力レーザー開発プロジェクトであり、浜松ホトニクス(株)(統括責任者・晝馬輝夫代表取締役社長、プロジェクトリーダー・川嶋利幸)が委託し、(財)レーザー技術総合研究所と大阪大学が研究の一部を再委託する体制で、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心(以下、阪大レーザー研)を主たる研究場所として、平成14年2月より実質4年2ヵ月の間行われてきた。その間平成15年12月の中間評価(技術評価S、事業化評価A)を経て、最終目標である100J出力にスケール拡大が可能な、大パルスエネルギー(20J)、高ピーク出力(2GW)、高繰り返し率(10Hz)で動作する半導体レーザー(以下LD)励起固体レーザーの実証を達成することができた。

### ■回折限界の5倍のビーム品質の実現

固体レーザーの大出力化における最大の課題は、固体レーザー媒体中に発生する熱による波面歪みや複屈折等の熱効果をいかに制御するかということであった。これについては、レーザー総研研究員・古河裕之博士が開発した固体レーザー熱解析コードが活躍した。高平均出力で動作するジグザグslab方式の固体レーザー増幅器に生ずる温度分布や波面収差等をシミュレーションで評価することにより、温度分布能動制御型のスラブレザー増幅器(TECS:thermally -edge-controlled slab)の開発に成功した。このレーザー増幅器は、当社が開発した世界最大級のピーク出力400kW励起用LDモジュールを用いて、阪大レーザー研における核融合用大出力レーザーとして実績のあるNd(ネオ

Laser Cross No.221 2006, Aug.

<http://www.ilt.or.jp>

発行/財団法人レーザー技術総合研究所 編集者代表/古河裕之 〒550-0004 大阪府西区靱本町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・古河裕之 (TEL:06-6879-8789, FAX:06-6878-1568, Email:ran@ile.osaka-u.ac.jp) まで、お願いいたします。