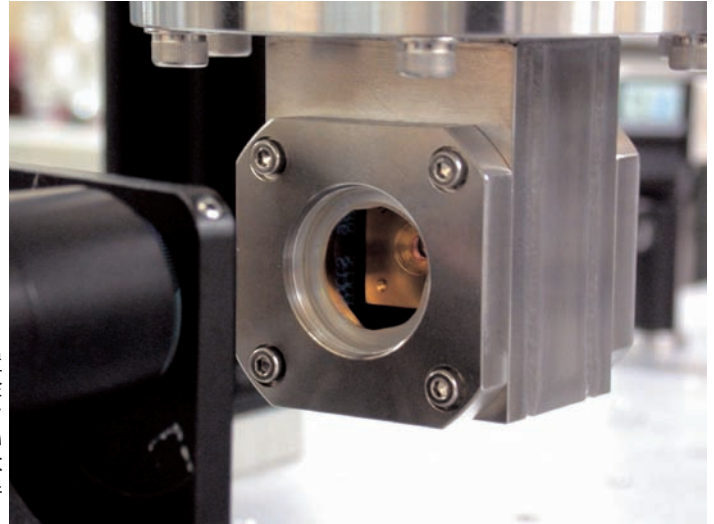


CONTENTS

- 冷却型Yb:YAGレーザーでスロープ効率90%を実証
- 最先端のレーザーアブレーション、SPIE に参加
International Conference on High Power Laser Ablation V
- 『光と蔭』技術者のモラルを高めるには
- “LASER EXPO 2004” 報告

【表紙図】冷却装置の中に置かれたYb:YAG結晶(金コートした銅のヒートシンクにマウントされている)。左に見える黒い筒はファイバー出力の励起用半導体レーザー集光光学系。



冷却型Yb:YAGレーザーでスロープ効率90%を実証

レーザー加工計測研究チーム チームリーダー 藤田雅之

産業用超短パルスレーザーの実現を目指して

超短パルスを用いたレーザー加工が産業界の注目を集めており、当研究所でもコントロールアブレーションやナノ構造形成など産業応用に有用な現象を明らかにしてきた。しかし、現状の超短パルスレーザー装置はチタンサファイアレーザーが主流であり、その構造の複雑さから生産現場への導入が敬遠されている。一方、Yb(イットリウム)系固体レーザーは半導体レーザー直接励起で超短パルス発生・増幅が可能であるという性質を有しているため、産業用レーザーとして注目を集めている。当研究所では、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心並びに日本原子力研究所量子科学研究センターと共同で冷却型超短パルスYb:YAGレーザーの開発を進めている。

Ybを使うメリットは

Ybドープ固体レーザーの優位な点は、レーザー遷移に伴う量子欠損が小さい(励起波長と発振波長が近接している)ことである。励起と発振の光子エネルギー差が小さいため高効率動作が期待できる。また、Ybイオンの長い蛍光寿命(約1ms)はエネルギー蓄積の点で有利であり、高出力パルス増幅にとって利点となる。さらに、Ndドープ固体レーザーと比較して広い吸収を持つためバンド幅が広い半導体レーザーで励起しやすく、蛍光スペクトルも広いため超短パルス増幅に用いることができる。さらに、ホスト結晶として熱伝導の良いYAG結晶を用いることで高平均出力時の熱負荷を緩和させることが期待できる。

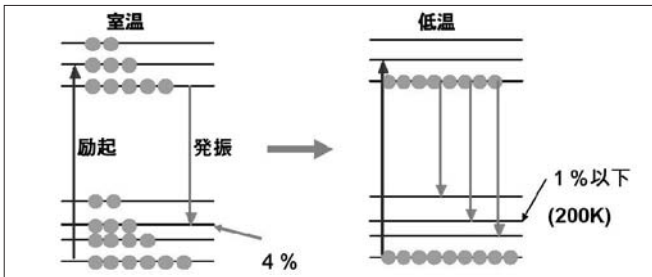
高効率Yb系レーザー実現の課題は

Ybドープレーザー媒質は、エネルギー準位が準3準位系である。そのため、発振には強励起を必要とし吸収飽和を起こさなければならない。図1にYbの準3準位エネルギーレベルを模式的に示す。上準位、下準位ともにマニホールドを形成しており、マニホールド内のエネルギーレベルを用いてレーザー遷移を起こさせている。下位マニホールド内の基底状態から上位マニホールド内にYb原子を励起し、上位マニホールド内の基底レベルと下位マニホールド内のレベル間でレーザー遷移が起きる。室温(図1左)では下位マニホールド内の各エネルギーレベルに原子が熱分布しており、反転分布を実現するためには、より多くの原子を励起しなければならない。(Ndなどの4準位レーザーの場合は、レーザー上準位、下準位ともに原子が存在せず、励起した原子がそのまま反転分布に寄与する)また、レーザー発振に至るまでには、誘導放出の繰り返しによって光の指数関数的増幅が起きなければならないが、下位マニホールド内の原子による光の再吸収により、利得が著しく低下してしまう。これを防ぐには、下位マニホールド内の余分な原子を上準位へ励起し吸収飽和を起こさせる必要がある。(励起すればするほど、吸収に関与する原子が減り、吸収係数が低下し励起光率が悪くなるというジレンマがある)準位レーザーに比べて、一気により多くの原子を励起するためには、集光強度が高い励起光源を用意しなければならない。

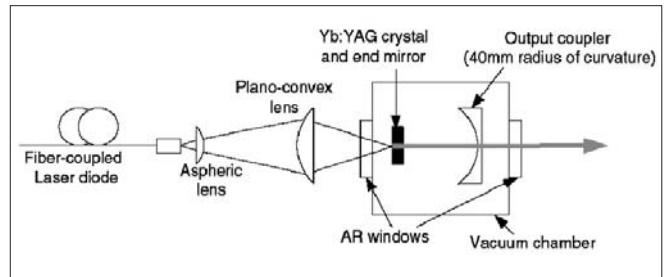
次ページへつづく▶



冷却型Yb:YAGレーザーでスロープ効率90%を実証



【図1】Yb:YAGのエネルギー準位図



【図2】Yb:YAGレーザー発振実験配置図

冷やせば解決

高い励起強度が半導体レーザー(LD)で実現可能となり、LD励起Yb:YAGレーザーの開発が盛んになってきているが、励起強度の向上に加えてYb:YAGの性能を改善する手法としてレーザー結晶の冷却が有望である。冷却することにより、マニホールド内の複数のエネルギーレベルに分布する原子が基底状態に集中し(図1右)前に述べた吸収飽和が不要となる。また、エネルギーレベル的には4準位レーザーと同等となり励起条件の緩和、利得の向上が期待できる。さらに、低温ではYAG結晶の熱伝導率が向上するというメリットも得られる。

低温でのレーザー発振特性

低温時におけるYb:YAGレーザーの高効率動作を実証するために実験を行った。図2に冷却Yb:YAGレーザー発振実験の配置図を示す。Yb:YAG結晶は1mm厚のものをを用い、直径2mmの穴を開けた銅板にマウントした。励起光源として波長940nmのファイバー出力半導体レーザーを用いた。図3にレーザー出力の励起強度依存性を示す。結晶温度を10Kから180Kに変化させ、アウトプットカプラーは85%を用いている。ヒートシンク温度が180K以上では、レーザー発振が得られなかった。これは励起強度が不十分であったためと考えられる。この実験では、温度10Kで最大出力430mWが得られた。

理論限界値を達成

図4にスロープ効率と発振閾値のヒートシンク温度依存性を示す。ヒートシンク温度を下げると、再吸収が減少するため発振閾値は低下した。温度100K以下では、発振閾値はほぼ一定である。この領域においては再吸収がなくなっていると考えられる。結果として、Yb:YAG結晶は4準位レーザーとして動作していると言える。スロープ効率は結晶温度の低下とともに向上した。温度70Kで最大スロープ効率90%を達成した。Yb:YAGレーザー遷移の量子欠損は8.7%であるので今回達成された90%のスロープ効率は理論限界に近いものとなる。また、最大の光-光変換効率は74%であり、比較的低い励起強度2.3kW/cm²に対して高い値が達成できた。

高出力レーザーとしての期待

このような高効率動作においては結晶中での熱発生は入力パワーの約10%にしかならない。それに加えて、温度70KでのYAG結晶の熱伝導率は103mW/Kと室温時(13mW/K)に比べて格段に向上する。少ない熱発生と高い熱伝導率を活かすことで、高繰り返し高平均出力レーザーの実現が可能となる。

飽和フルーエンスは温度で変化する

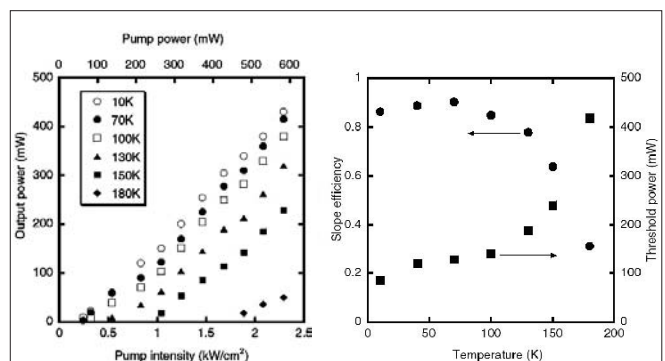
低温でのレーザー発振実験を行って、興味深いことが見いだされた。共同研究者の河仲氏が最初に気付いたことであるが、飽和フルーエンスは温度によって変化する、あるいは温度によって制御できることが分かったのである。飽和フルーエンス(J/cm²)はレーザー媒質の特徴を表すパラメーターの一つであり、飽和フルーエンスまで増幅を行えば、効率よくエネルギーを抽出できる。室温でのYb:YAGの飽和フルーエンスは10J/cm²であり、光学素子のダメージ閾値(2-5J/cm²)を超えてしまう。言い換えれば、効率よくエネルギー増幅を行う前にミラー等にダメージが発生してしまうことになる。今回の実験では、低温冷却により飽和フルーエンスが下がり、効率の良いエネルギー抽出が可能となったのである。

今後の課題は

低温でYb:YAGレーザーを動作させる際のデメリットは、増幅帯域の狭帯域化である。帯域が狭くなると超短パルスの増幅が困難となる。効率(動作温度)と帯域のバランスをいかに最適化していくかが重要となってくる。

新たなタイプのレーザー

極低温で動作させるレーザーは“クライオジェニックレーザー”として今後注目を集めることになるであろう。産業界ではクライオ装置をレーザーに組み込むことに抵抗があるかもしれないが、技術開発が進めばその先入観も薄れるものと期待する。冷却水のチャームもクライオ装置も見た目はただの箱である。高平均出力レーザーとしての“クライオジェニックレーザー”が生産ラインで活躍することも夢ではない。



【図3:左】冷却Yb:YAGレーザーの発振特性(CW発振、発振波長1030nm)

【図3:右】冷却Yb:YAGレーザーの発振閾値とスロープ効率の温度依存性

最先端のレーザーアブレーション、SPIE に参加

International Conference on High Power Laser Ablation V

理論・シミュレーショングループ 副主任研究員 古河裕之

SPIE International Conference on High Power Laser Ablation V開催される

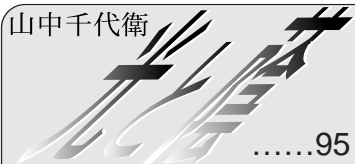
2004年4月25日から30日まで、U.S.A. New Mexico 州のTAOSにて、標記国際会議が開催され、当研究所からは古河、内田、山浦の3人が参加し、発表を行った。古河のポスター発表タイトルは「Simulation on Laser ablation and its applications」、内田の口頭発表タイトルは「Laser propulsion characterization for orbital transfer vehicle」、山浦のポスター発表タイトルは「Dependence of EUV emission properties on laser wavelength」であった。発表件数は、口頭発表が全部で90件、ポスター発表が63件、参加者数は約120名、U.S.A. からの参加者が多く、日本人は20名程度であった。

本国際会議は大きく分けて「レーザーアブレーションの理論・シミュレーション」、「レーザー推進」、「EUV Lithography」、「その他」のセッションで構成された。レーザーアブレーションの分野はその現象の複雑性から、理論・シミュレーションの研究が実験に比較してやや遅れがちであるが、本会議では最先端のレーザーアブレーションの理論・シミュレーション研究の成果が多数報告された。

EUV 光源の最適化のためのレーザーアブレーションのシミュレーション～デブリの評価～

古河はEUV 光源の実用化を念頭に置き、「Simulation on Laser ablation and its applications」に関して報告を行った。EUV 光源に関して最適なレーザー強度は $0.5 \sim 1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ 程度であることが、平成15年度の本研究所等の研究から分かっている。この程度のレーザー強度では固体、液体から気体、部分電離プラズマへの相転移効果が重要となる。しかもアブレーションにより生成されたプラズマは10価程度まで電離しており、部分プラズマの電離度、状態方程式、詳細なレーザー吸収の評価が重要となる。上記効果を考慮して、レーザーアブレーションEUV プラズマ統合シミュレーションコードを開発した。図1は、開発した統合シミュレーションコードの概要図である。本会議では、開発したシミュレーションコードにより評価したデブリ(特に中性のデブリ)に関して詳しく報告した。図2は、シミュレーションより得られたアブレート物質の空間プロファイル、図3は、シミュレーションより得られたアブレート物質の数密度の時間発展である。本会議の全報告の中でも、部分プラズマの電離度、状態方程式、アブレート物質の空間プロファ

山中千代衛



技術者のモラルを高めるには

科学技術立国ニッポンのスローガンが科学技術会議で叫ばれているが、現状では技術者の士気低下は60%に及ぶという。人は何のために働くのかが問われているとも言える。

とくに企業の技術者について見れば、先の日亜化学工業(株)と中村修二氏との特許訴訟による東京地裁の判決、200億円の支払いを会社に命じた件が大きな波紋を生んでいる。

会社の方針に従い、忠誠心厚く、一丸となって我武者羅に働くかつての技術者像は、遠のきつつあるかに見える。

現在の技術者の心の中を正しく分析し理解しなければ、かつて世界に先んじた研究開発力も凋落の一途を辿り、技術立国日本の願いは空しく消えうせる心配がある。

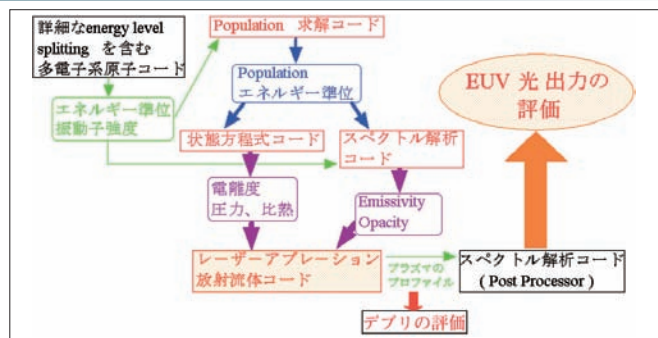
中村修二氏の場合、日亜化学工業(株)はその功績は認めていたようだが、研究者としての処遇をめくり溝が生じ、それが次第に拡大して、ついに両者が断絶したようだ。会社と技術者の絆のもとには金銭だけではないことに留意すべきである。中村氏にはわがレーザー学会はいち早く、平成9年にレーザー学会業績賞進歩賞を「室温CW青紫色InGaN系レーザーダイオード」の業績に対し進呈している。

昨今韓国のサムソン電子が日本の優秀な技術者にヘッドハンティングをかけ、すでに千人を超える人材が、一流企業から引き抜かれたという。その原因は、金銭上の条件もさることながら、わが国企業の経営者が技術評価の先見性に欠け、特に米国直輸入のMBA的数値管理を重視し過ぎるあまり、技術者の心を把握できなかったことなどがあるようだ。

技術者は金銭よりも本来の活躍の場があり、正当な評価を与えられ、君たちのアイデアと努力が会社の最大の武器だという名誉が与えられれば力を発揮する人たちである。

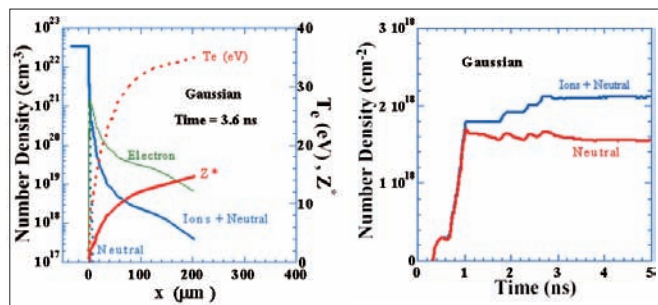
もともと一本気な人たちだから、技術者を志したと考えるべきなのである。

【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】



【図1】開発した統合シミュレーションコードの概要図

イルをおおやけに報告したものは他になく(企業秘密にしているのかもしれないが)大変重要な報告であった。多数の方から質問を受け、有意義な議論を行った。図4は、ポスターの前で質問に答えている執筆者(右)である。山浦からは、EUV光変換効率における波長依存性について詳細な報告があった。レーザーアブレーション、およびアブレートした物質の3次元的膨張、凝縮、クラスター化に関する解析および数値計算的モデルロシアのB. S. Luk'yanchuk教授から、上記モデルを用いた解析結果について報告があった。まず最も簡単な場合に関して、球対称にplumeが3次元的に膨張する場合の解析解を示した後、1方向にのみ初期速度を与え楕円球体的に膨張する場合の



【図2:左】シミュレーションより得られたアブレート物質の空間プロファイル
【図3:右】シミュレーションより得られたアブレート物質の数密度の時間発展

計算結果について報告があった。凝縮、クラスター化に関する計算結果の報告もあった。いわゆるプラズマCVDについても計算結果の報告があった。真空中に膨張する場合だけでなく、雰囲気ガス中に膨張する場合についても結果が提示され、真空中の場合との対比がなされた。

フランスのTatiana E. Itina教授から、レーザーアブレーションおよびアブレートした物質の膨張に関する数値計算的モデルの報告があった。このモデルは古河のモデルと共通した部分が多く、非常に参考になった。状態方程式および電離度については詳細な説明はなかった。

東工大矢部教授から、様々なレーザーアブレーションのシミュレーションの結果について報告があった。新たなところでは、熱応力についての解析が目を引いた。Fokker plank 方程式を用いた非局所熱伝導解析の結果、熱伝導におけるフーリエの法則が破れることが示された。ただし流体運動が主となる時間帯では、古典的な熱伝導による取り扱いが成立することも示された。

レーザー推進に関する報告

内田から「デブリの軌道修正のためのレーザー推進の characterization」について報告があった。電気推進に比べレーザー推進の方が有利であることの説明があった。アブレートしたプラズマのエネルギーの計測結果、エネルギーバランスのレーザー強度依存性、噴出するイオンの角度分布、流体力学的効率などの説明があった。研究の結果、推力が大幅に向上した。

東工大矢部教授から「Proposal of Laser driven Automobile」に関して報告があった。「cannon target」を用いたレーザー推進の解析、「water droplet target」を用いたレーザー推進の解析等が紹介された。当研究所で開発中のsolar pumped ファイバーレーザーについても取り上げられ、当研究所の研究の幅広さをPRしていただいた。



【図4】ポスターの前で執筆者(右)

REPORT

“LASER EXPO 2004”報告



4月27日~28日の2日間にわたり、パシフィコ横浜で「LASER EXPO 2004(主催:(社)レーザー学会)」が開催された。例年通り特別技術セミナーと展示会で構成され、今年は16コース(2日間)のセミナーと61コマのブース展示が開設された。

特別技術セミナーでは、当研究所の藤田主任研究員がフェムト秒加工に関するセミナーの座長や講師を務め、一方、展示会では島田副主任研究員が当研究所のブースへ訪れた来場者からの質問に対応した。

主な質問内容としては、レーザーで物質の表面温度を上げる方法、レーザーでマイナスイオンが出せないか等々があった。また、今回は特に当研究所と共同で開発を進め、実用化に至った東洋精密工業(株)のレジスト剥離装置のパンフレットも用意したの

で、販売時期や価格、剥離スピードはどのくらいか、ライン状に剥離できないか...等々、これに関する質問も多かった。

ブースではパネルやパンフレットの他に、過去1年間のレーザークロスも並べて自由に持って帰っていただいたが、特にNo.181号「フェムト秒加工によるナノ構造物形成」とNo.193号「フェムト秒レーザーを用いたダイオキシン類検出研究」がよく出て、企業の関心のありかの一端が伺えた。

展示会は2日間で約3,500名の来場者があり、当研究所もそれなりのPR活動を展開することができた。特に、最近、当研究所へ寄せられた技術相談の中に、きっかけが「先日のレーザーエキスポで研究所のことを知って...」というものがあり、改めてこうした活動(さまざまな場を活用して当研究所の存在や活動を積極的に知っていただくこと)の大切さを痛感している。(報告:総務部 駒田)

<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/今崎一夫 〒550-0004 大阪市西区鞠本町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 今崎一夫(Tel&Fax: 06-6879-8739, e-mail:kzoimsk@ile.osaka-u.ac.jp)までお願いいたします。