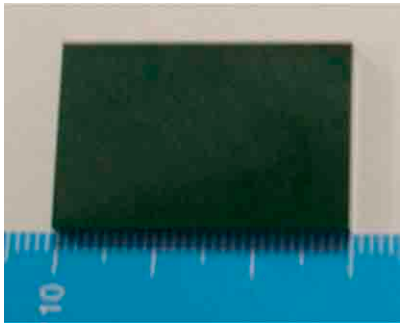
ISSN 0914-9805
Institute for Laser Technology
LASER CROSS レーザー・クロス
2010, Mar.
No. 264

CONTENTS

▌高効率太陽光直接励起レーザーの開発
▌太陽光励起レーザー開発の現状
▌【光と蔭】Operations Research
▌EUV光源開発の現状
▌主な学会等報告予定



【表紙写真】Nd/Cr:YAG セラミック 20×30×3 mm Cr3%,Nd1% 神島化学工業(株)焼成

高効率太陽光直接励起レーザーの開発

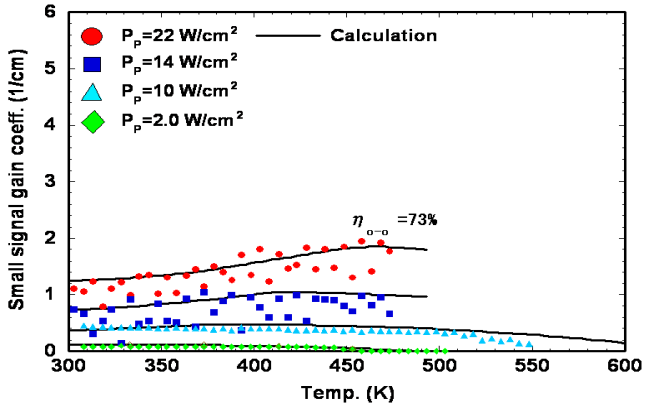
レーザーエネルギー研究チーム 佐伯 拓

■新物質創成のためのレーザー

太陽光励起レーザーとして有望であるNd/Cr:YAGセラミックを用いて宇宙太陽光発電用太陽光直接励起連続波レーザーと併行して新物質創成のための高温発生用太陽光励起パルスレーザーを開発している[1,2]。ここでのNd/Cr:YAGセラミック(表紙写真)とは、Cr^{4+}でなくCr^{3+}を純粋に含んだセラミックYAGを指す。

■変換効率43%

実用化のために最も重要なことは太陽光からレーザーへの変換効率である。我々は、2003年ロッド型Nd/Cr:YAGセラミックレーザーと擬似太陽光(ランプ光源)を用い光－光変換効率43%(世界最高)を得た[3]。しかしながら、この変換効率に関して従来の1フォトン注入1フォトン励起を仮定したレーザー発生理論を構築する場合、40%の変換効率が限界である。しかしながら、前に示した実験では、発振実験でのスロープ効率は最大で50%であった。実験で計測されたレーザー利得から計算される変換効率も同様に高い。さらに、レーザー高温動作実験で、励起光強度が低い場合、温度上昇に対しレーザー利得がある値まで維持され、その後減少するのに対し、励起光強度がある値を超えると200℃の高温領域でレーザー小信号利得が指数関数的に増大する現象を確認している(図1)。誘導放出断面積や蛍光寿命が温度上昇によって増大しないことは明らかなので、単純に反転分布の増加ということになる。様々な教科書や論文等の調査の結果、励起光強度、媒質温度、Nd濃度の条件が重なりクロス緩和効果が生じているのではないか？という結論の手前まで来ている。クロス緩和では1フォトンの励起光注入に対して2フォトンの励起が生ずる。この場合、Crにおけるフォノンと電子エネルギー準位が結合し、Ndの高エネルギー準位との間でエネルギー移譲が生ずるためである。熱により基底準位から下準位に励起されたNdがクロス緩和により上準位に励起され、反転分布密度が通常よりも増大する。我々は、クロス緩和を考慮した計算コードを構築してレーザー利得の計算を行った。その結果、図1に示すように実験結果が計算結果と良く一致することが明らかとなった。さらに、クロス緩和が起こるとフォノンがエネルギー遷移を媒介しているため、出力フォトンエネルギーが入力フォトンエネルギーを上回り、熱エネルギーがレーザー光に変換されることも理論的に予測される。



【図1】レーザー利得係数の実験と計算との比較(点は実験データで実線は計算結果。両者は良く一致)

■高効率発振実験の結果

これらの効果のため40%の変換効率が限界ではなくさらに高い変換効率が実際の限界であると思われる。新規理論を用いた計算結果で前述のロッドでの高効率発振実験のスロープ効率も説明できている。太陽光からレーザーへの変換効率の限界が40%であっても実用上何ら問題ないが高ければ高いほど良い。学問上の疑問点を明らかにするため今後さらに研究を進めていく。

参考文献

1. 佐伯 拓、今崎一夫、中塚正大、“太陽光直接励起レーザーの現状と将来”、レーザー研究 37 (2009) 120.
2. D. Graham-Rowe, “Solar-Powered Lasers”, Nature Photonics **4** (2010) 64.
3. T. Saiki, et. al., "Nd/Cr:YAG Ceramic Rod Laser pumped by arc-metal-halide-lamp", Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) 156.

太陽光励起レーザー開発の現状

プロジェクトアドバイザー　中塚正大

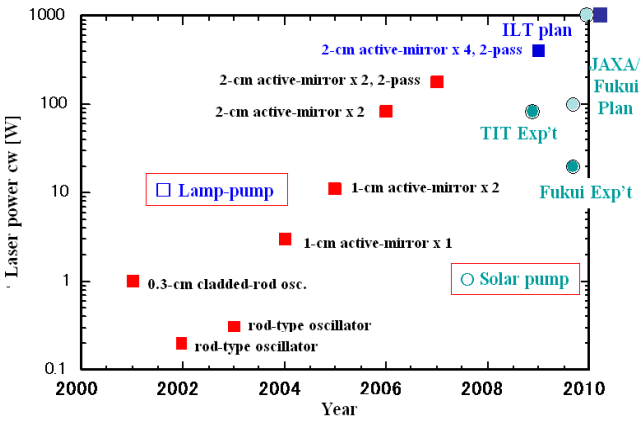
太陽光のコヒーレント変換が高効率で実施できると、応用先は広く環境・エネルギー問題への対応と同時に新しい低コスト新産業創成につながる可能性を持っている。レーザー総研では４年ほど前からプロジェクトテーマとして取り上げ、本誌でも研究成果(183, 194, 195, 210, 222, 232, 242号:佐伯拓研究員)を報告してきた。プロジェクトとしての取り組みは本年度で終了するのでレーザー技術開発の現状と今後について短信する。

地上に降り注ぐ太陽エネルギーは170PWと人類の化石エネルギー消費13TWに比してとてつもなく大きい。地球温暖化は地球のエネルギー収支バランスの崩れで生じており、発生エネルギーの大きさではない。温暖化を進めている要因を無くさなければならない。

太陽光利用は従来からバイオマスの育成、光電変換での電気エネルギー化、高温水の直接利用や蒸気発電などで進められているが、コヒーレンスの利用には達していない。光のコヒーレンスの特徴はビーム拡散がなく長距離伝送が可能で狭い領域へのエネルギー集中が可能、単色であってスペクトル上で取り扱いが容易、パルス化ができて高いピーク出力が得られるなどである。

太陽励起レーザーでは効率的太陽電池の研究と同様に、太陽光の広いスペクトルをくまなく利用し尽くすことが高効率システム開発に要求される。すでに報告してきたようにCrイオンをNd:YAGセラミックスに高濃度で共ドープすることにより、900nm以下の太陽スペクトルの80%以上をレーザー媒質に投入できる。CrからNdへのエネルギー移譲率は極めて高く、量子デフェクトをも考慮して50%がレーザー励起に寄与する。Ndの量子効率は元々高く85%程度である。結果として効率30%以上の変換可能性を持っている。

すでに太陽模擬ランプ励起アクティブミラー(AM型)増幅器システムで200W連続出力を実現した。経時的発展を図１に示したが、高濃度ドープセラミックス(Nd１%, Cr３%)ではじめて実現できるものである。材料研究は大阪大学レーザー研と協力してきたが、その他の効率的増感イオンなどの調査を続けている。



【図１】レーザー総研のレーザー開発の歴史と他機関の成果

Nd/Cr:YAGセラミックス媒質を用いたレーザー増幅器システムの解析にはレーザー物性パラメーターを知ることが重要である。6,000度の黒体輻射スペクトルを励起源とする場合、励起量の計算にスペクトル積分が必要となる。Crの濃度によって決まる励起スペクトルを積分データベース化することでレーザー特性の計算が簡単化される。実用ではNdイオンの濃度はいろいろ変えることはなく濃度消光の検討からその最適値は１%である。CrとNdの結合は極めて大きく、Crの存在がNdのレーザー特性に与える影響は次の通りである。Crのエネルギー蓄積を表わす準位からの蛍光寿命はmsオーダーで、Ndレーザー寿命の0.2msに比べて長い。Crからのエネルギー移動が継続するためにNdのレーザー蛍光寿命は見かけ上大きく増加する。エネルギー移動のためにNdのレーザー上準位粒子密度はCrの入っていない場合に比べて当然増加する。ランプ励起ロッドレーザーでは出力は３倍にもなる。さらにレーザー増幅度が大きくなり飽和増幅領域に入ると、増幅特性は増幅飽和エネルギー係数で左右される。

これまでの研究では、Crの効果をNdのレーザーパラメーターに繰り込むことによってレーザー計算を簡単化する手法を提案した。濃度の定まったCrの効果によるNdの見かけの寿命、および見かけの誘導放出断面積を定義することとした。その結果高出力レーザー増幅器で重要なパラメーターである増幅飽和係数が、Ndレーザーでは約３kW/cm^{2}程度であるが、Cr３%ドープでは80W/cm^{2}程度と激減し、エネルギー抽出効率が格段に増加することを明らかにした。

高濃度Crのドーピングには光散乱係数の増加という問題点が残っている。YAG中でNdイオンは同じ希土類のY(イットリウム)のサイトに入るがCrイオンはAlのサイトに入る。Crのイオン半径が大きいために高濃度化の際のYAG結晶粒界の制御に困難がある。製造過程のばらつきもあって安定なセラミックス製造法は未だ研究途上である。レーザー総研ではたまたま性能の良いセラミックス材料を選択して用いているに過ぎない。

Cr以外の増感作用元素について阪大レーザー研と共同研究中であり、次期候補としてCeイオンが見いだされている。１%程度のCeを追加共ドープすることで、短波長領域の励起ではCrの２倍程度の効果が得られている。レーザー作用上の有効性の検討が進められている。

紫外線領域スペクトルの照射で一部の材料にカラーセンターが生じることがセラミックYAGの不純物効果としての欠点である。400度程度の熱アニーリングで消失することがレーザー総研の研究で明らかとなり、高温動作による効果除去法が提案された(本越伸二副主任研究員)。

YAGセラミックスの製造に関してはレーザー総研ではすべて神島化学工業(株)に依頼し共同研究している。最近、ファインセラミックスセンター関連企業でもいい結果を出しはじめた。前者ではセラミックス材料は30cm角程度までの板状セラミックスが製造可能で、将来

を見越しても技術限界とはならない。5mm厚アクティブミラー増幅器では強励起で50W/cm²程度の取り出しが期待されるので、30cm角では出力は50kWに達するからである。後者のCr/Nd:YAG材料はJAXA/福井大(金邊忠准教授)で試験中である。いずれにしても高濃度での散乱低減が期待されるが、ビーム径が大きく薄いアクティブミラー形式では大きな問題とならない。

意外とむずかしいのは効率的で低コストの太陽光集光装置である。自然太陽光密度(約0.1W/cm²)の何倍の励起密度が必要かはレーザー媒質の形状と排熱技術で決まる。通常は500倍から1,000倍くらいが望ましい。集光素子は価格から見ると、プラスティックフレネルレンズか高反射コートをしたプラスティックフィルムが使える。フレネルレンズでは70%程度の利用率で、屈折率分散から生じる色収差で集光度に限度があるが低価格性に優れている。フィルムの反射率は全スペクトルで95%を越えるものが市販されている。フィルムを貼付ける凹面基礎構造が価格を決めている。低価格化のためには多分割小平面からなる集光素子を製作する技術研究が必要であり、これはレーザーが大型化するほど容易である。レーザー素子としてはアクティブミラー形式が集光光学系との整合性が高い。

排熱技術とレーザー素子の高温動作の可能性が将来の太陽励起レーザーの効率的運用の鍵である。平面形状のレーザー素子の排熱技術はすでにマイクロチップレーザーなどで研究が進んでいる。レーザー総研のアクティブミラー増幅器ではヒートパイプを応用している。Nd/Cr:YAGの高温動作の可能性については現在研究中であるが250度程度まで利用可能との示唆を得ている。

太陽励起レーザーの応用では、このレーザーの特徴を生かす必要がある。太陽光からの変換ということではビーム広がりが小さいことからくる1)長距離伝播が可能、2)エネルギー集中から高温発生が可能、3)単一波長であるなど、また何よりも励起源コストが極端に低いことから4)エネルギー単価の低減、5)運転コストの低減などがある。欠点としては宇宙空間利用を除いて日照時間により動作時間の制限がある。

すでに良く知られた応用先の一つは、長年JAXAにおいて取り上げられてきた宇宙における太陽発電・地上へのエネルギー伝送の研究がある。もともとエネルギー形態は数GHz帯のマイクロ波生成を想定していたが数年前から、システム効率、軽量性、コンパクト性、地上での小規模基地などからレーザー利用が並行した課題として取りあげられるようになった。現在、JAXAでは「1kWレーザーシステム開発検討会議」(主査:金邊忠准教授)を立ち上げ産官学連携で設計し、福井大学に100W級試作レーザーが完成しつつある。ジグザグディスク型発振器であり、集光にはプラスティックフィルム大型カセグレン反射鏡を用いている。この冬に福井のつかの間の晴間で20W出力を確認している。春からの良い実験結果が期待される。

太陽光で高温を実現してエネルギー応用を進める方法があるが、その多くは500度程度までの熱水利用、もしくは1,000度程度までの水素生成化学反応などである。2,000度を超す温度は太陽光の直接集光では困難であって、レーザー光への変換で4,000度～数万度が実現される。

東工大(矢部孝教授、内田成明教授)では金属Mgをエネルギー蓄積源とした新しいエネルギーサイクルを提案している。高温水と反応したMgはエネルギーを放出してMgOとなる。MgOの還元過程に4,000度を越す高温環境が必要で、低コスト熱源として太陽励起レーザーの利用

山中千代衛

Operations Research ……157

第二次世界大戦において米英軍が作戦上の手法として開発したのがORの起源である。ロンドン防空作戦のため物理学者P. Blackettのグループがレーダーを用いドイツの空襲に対するスピッツファイヤー戦闘機と高射砲部隊の運用に成果を上げた。またF. Lanchesterは戦闘に関しランチェスターの法則を導いた。兵力x(t)とy(t)が戦った時その兵力の変化はdy/dx=Ex/yで表され、その解は2乗則$y_0^2-y^2=E(x_0^2-x^2)$になる。ここにx_0、y_0は両軍の初期兵力、Eは武器の質、訓練度を表す定数である。ドイツUボートの脅威に対抗するため、米・英海軍はORを適用して輸送船団の組織的防衛を研究し、また日本の神風特攻隊の命中率を低下させることに成功した。

このORは現在社会システムの計画と運用を科学的な方法で解析し、有用な情報をうるため広く利用されている。問題はシステムに内含された構造を解明しそこに一定の法則性を発見し、それに基づき最適化した対策を展開することである。システムの持つパラメーターには制御可能なものと制御不可能なものがある。確定的なものと確率的なものが存在する。その中から制御可能なパラメーターを合目的に決定することが求められる。従って何を目的にORするかが改めて問われるのである。

民主党代表、鳩山由紀夫総理大臣はわが国ではめずらしく理科系の出身で、東大、スタンフォード大学でORを専攻、博士号を取得した。大いに期待したいところである。戦闘の場合は勝利が明白な目的だし、企業の場合は利益最大が明快な目的となるが、国家となれば国益、国民の幸福の最大化というような莫とした目的になり勝ちである。成長戦略にしても利害を異にする集団が対象となるから首相には幅広い経験と政策の本質に充分通暁し、未来を鋭く洞察する力が求められる。しかも問題を取り巻く国際環境は時々刻々変動する。机上の空論では役立たない。直近の処、普天間の移設問題がある。ORの最適問題と思われ腕の見せどころである。

けっして甘く見て河童の川流れにならないようご用心ご用心。　【研究名誉所長】

を考えている。千歳の地に２m角の大型フレネルレンズを集光器とし、主にロッド型レーザーを研究し、100W出力まで達成している。

レーザー総研では高温利用の応用研究として酸化反応で実現する高付加価値のTiO_2ナノ粉体製造の研究に取りかかっている（谷口誠治研究員）。水中で金属チタンをレーザーアブレーションで酸化させ、水中にナノ粉体を放出させる。サブミクロンサイズ100～600nm程度のTiO_2球体が観測されはじめた。高温発生部の多相状態のシミュレーションを駆使して、TiO_2の結晶形式選択性や粒径制御、また低コスト生産性などの研究に取り組む。物質様態の異なる相を含めて熱輸送と原子分子反応を解くには各種物質の状態方程式の確定が重要で、今までにない基礎科学の隙間を埋める新たな研究領域である。

本研究テーマは技術開発室とバイオ研究チームに引き継がれ継続するが、これまで阪大レーザー研からは研究支援を、JAXAや関西電力からは研究資金の支援をいただいた。ここに深く感謝します。

REPORT

EUV光源開発の現状

理論・シミュレーションチーム　砂原　淳

より高速で動作するCPUや大容量のメモリの需要はとどまる所を知らず、半導体は年々、その回路線幅をより狭くして高密度実装化することにより動作の高速化、大容量化が図られている。この高密度化はムーアの法則と呼ばれるペースで1960年代から現在に至るまで続いており、今後もしばらくは維持されるだろうといわれている。

回路パターンをシリコンウエハ上に転写する半導体露光技術は高密度化のキーテクノロジーである。回路線幅は現在45nmで量産されており、これは192nmの波長を持つArFレーザーが露光光源として使われている。しかし、2016年から計画されている回路線幅22nmの半導体露光に対して現在の技術を用いることは出来ない。多重露光技術を駆使すれば露光自体は不可能ではないものの、コストがかかりすぎる。そのため、より短波長の13.5nmの波長を持つ極端紫外光源(EUV)が注目されており、2016年の22nm回路線幅の半導体量産開始にEUV光を用いた半導体露光を間に合わせるため、2012年頃の量産試作機開発に向けた努力が精力的になされているところである。レーザー技術総合研究所では2003～2008に阪大を中心とした文科省リーディングプロジェクト以来、EUV光源開発研究に取り組んできており、本稿ではEUV光源の開発の現状を述べる。

EUV光源はレーザー方式、放電方式の２方式が提案され、共に研究開発が進められている。レーザー方式は米国CYMER社と日本のコマツ、ギガフォトンの３社がしのぎを削っており、放電方式はPhilips、Xtreme、ウシオ電機のグループが推進している。(PhilipsはEUV光源開発からは撤退し、Xtreme、ウシオグループに引き継がれるとのことである）レーザー方式か放電方式か？という光源方式間の競争も長年注目されてきたが、両方式とも量産機開発に向けてさらに資金、人材を投入する勢いで研究開発が行われており、どちらか一方の方式に選択されるという状況にはなっていない。レーザー光源は装置が高いがパワースケーラビリティに優れ、放電光源は装置は安いが電極等の熱の問題が深刻であった。しかし放電方式はレーザーアシスト放電方式という形に進化し、入力エネルギーからEUV光への変換効率が従来の１％からレーザー方式と同等の２～３％台が出せるようになった。さらに、回転電極等の技術により熱の問題を低減した。実際に筆者は昨年秋にレーザーアシスト放電のβ機を見る機会があったが、少し大きな乾燥洗濯機を想像させるボディにちょこんとレーザーがついていて、そのシンプルさに驚かされ、熱の問題をクリアし、量産化が可能だとの思いを強く抱いた。昨年秋のEUVリソグラフィ国際シンポジウムにおいて、目標の180Wに対し、レーザー方式で60W、放電方式で30W程度のEUV出力が報告され、まだ目標までファクターの違いはあるにしても光源としての目処がたってきたとの思いを研究者一同共有することとなった。そのため、EUV露光実現に向けた課題としては光源のハイパワー化は依然課題ではあるが、パターン欠陥検出、低減化技術の課題がより注目される状態になっている。これまでのEUV研究者の努力が実を結びつつある。

今後、レーザー方式、放電方式ともに、より高効率化を図ることが重要であり、レーザー総研としても放射流体シミュレーションによるプラズマ物理としての側面からの貢献を続けて行く計画である。ひと昔前はEUV光源などどうなるか判らない、といわれたが、今は目の前の2012年に量産機に近い試作機を開発出来るか否か、量産を前提とした研究開発の正念場を迎えている。

主な学会等報告予定

5月11日（火）～15日（土）　APLS2010（韓国・済州島）
本越　伸二「Competition of Damage thresholds for HR and AR coatings at 1064nm in Japan」
5月16日（日）～21日（金）　CLEO ／ QELS 2010（San Jose, CA USA）
古瀬　裕章「Feasibility Study of Cryogenic Yb:YAG Zig-Zag Active-Mirror Laser for Ten-Kilowatts」

発行／財団法人レーザー技術総合研究所　編集者代表／島田義則　〒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・島田義則までお願いいたします。
（TEL:06-6879-8737, FAX:06-6878-1568, Email:shimada@ile.osaka-u.ac.jp）