

高効率太陽光励起レーザーの特性

Characteristics of Efficient Solar Pumped Laser

今崎 一夫 *¹
Kazuo IMASAKI佐伯 拓 *²
Taku SAIKI本越 伸二 *³
Shinji MOTOKOSI中塚 正大 *⁴
Masahiro NAKATSUKA

Abstract

Laser oscillations of rod-type Nd/Cr:YAG ceramics pumped by an arc-metal-halide lamp, which has similar spectrum to the solar light, had been observed experimentally as a basic technology for solar laser. The obtained maximum output power was 240 mW with an input lamp power of 640mW in ceramic laser which implied an optical-optical conversion efficiency of 38 %. The conversion efficiency was nearly close to the limit of the theoretical one. One of applications of such efficient solar pumped laser may be a production of integrated energy material of hydrogen.

キーワード：太陽光励起レーザー、多重ドーピング、セラミックレーザー

Key Words : Solar Pumped Laser, Multi-component Doping ,Ceramic laser

1. はじめに

インコヒーレントな太陽光の収束性は悪い。そのためこれに起因して実用的規模における太陽光の工業的熱源としての利用性は低い。われわれは太陽光をレーザー的に集約照射し、これによるレーザー光を誘起し、このレーザー光を集積し高温を作り出す方式を提案している。レーザー溶接や加工をみればレーザーによる高熱生成は容易に理解できる。

この太陽光励起レーザーは予想以上に高効率であることが研究により判明してきた。また一般にレーザーは高収束性を持ち、かつ極めて長距離伝搬が可能である。これを延長すれば、大面積 (10000m²以上) の太陽エネルギーをレーザー光に高効率変換し、これを小さな熱絶縁体に集約すれば容易に10¹⁰J/Hrcm²以上のエネルギー密度が達成でき、温度も1000~2000Kを上回ることができる。これは化石燃料エネルギー密度の10~100倍以上に達し、この熱源を用いた高効率の水素発生への応用は十分実用化が可能であると予想される。

この方式の特徴は熱を伝搬する必要がないことである。光が熱伝搬の役目を担うという特徴がある点も特色である。またレーザー自

体は結晶体が必要でなく、セラミックタイプで比較的安価である。レーザーは集中性が高いため高温化できることによりエネルギーを水素などの積分蓄積媒体に変換することが可能となる。このため将来的には経済性も高く取れると予測でき、この水素は経済的に家庭燃料電池発電や燃料電池自動車などの分散エネルギーへの利用が可能であると期待される。

この方式はレーザーの本質的な特性から、屋根置方式ではなく大面積の太陽エネルギー利用に適していると予想している。そのため太陽電池-電力発生方式とは相補的であると考えられる。将来的に本方式による経済性の高い再生可能クリーンエネルギー生成の可能性があると期待している。

現在まだ実験室内で小規模レベルであるが、われわれは太陽光励起レーザーの効率がおよそ40%であることを見いだした。これにより上記のような太陽光励起レーザーによるエネルギー利用の可能性が認識される。太陽光 (模擬) エネルギーからレーザーエネルギーへの変換率は理論的には50%前後まで可能であると予想される。いままでの太陽光励起レーザーの効率は10%程度と考えられていたが、YAGセラミックレーザーにおいてCr及びNdを適切にドーブすることにより、極めて高い発振効率が実現することを実験的に示した。本論文はこれについて報告する。

*1 レーザー技術総合研究所主席研究員 (〒565-0871 吹田市山田丘2-6) e-mail : kzoimsk@ile.osaka-u.ac.jp

*2 レーザー技術総合研究所研究員

*3 レーザー技術総合研究所副主任研究員

*4 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心教授
(原稿受付：2006年3月21日)

2. 太陽励起レーザー

太陽励起レーザー自体の研究は古い。世界的にはYoungによる研究が既に1969年に始められている。[1] 日本では東北大学湯上嵐 [2] や電気通信大学の植田による研究がある。[3] これらの研究は結晶性の既存のレーザー材料を用い、これに太陽光を集約照射しており、太陽光—レーザーエネルギー変換効率はおおよそ10%程度であった。このためこのようなレーザーを用いた実用的な太陽エネルギー応用は困難であると考えられてきており、これら研究では効率や励起メカニズムの効率化は十分探求されてこなかった。太陽レーザー光をエネルギー応用に利用する方向性は実際的には試行されてこなかった。

太陽の表面温度はよく知られているようにほぼ6000Kであり、これに相当する黒体放射を仮定した場合の太陽光発光スペクトルは紫外線領域から急激に立ち上がり500nm付近にピークがあり、その後なだらかに赤外領域まで減衰する。

この太陽光スペクトルの広領域における吸収性を持った複合高濃度ドープが可能となってきた。今までは小型の結晶性GSGGを用いたものがあつたがセラミックのNd/Cr:YAGが製作可能となってきた。この場合形状が大型化でき同時に高濃度が可能であるので太陽光からのレーザー光への変換が高く取れ、かつ材料は安価であるのでこの太陽レーザーはエネルギー源として実用性の可能性がある。この点に着目しセラミック太陽励起レーザーの研究を行っている。

一般に光励起レーザーの効率は低い。この原因は電源から電気エネルギーをとり、電圧を上げ放電を起こし、この放電エネルギーの一部の発光を励起に使うためである。しかし太陽光励起方式はこの過程が全く無く直接太陽光を励起に使うため高励起効率が見込まれる。この説明を図1に示す。

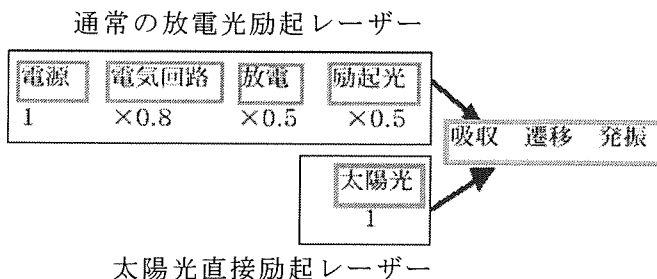


Fig. 1. Comparison between pumping of laser by solar energy and discharge light

図1 太陽光直接励起と光直接励起と通常の放電励起との比較

このような一般の放電励起レーザーでは最初のエネルギー(電力)から励起までのプロセスで既に20%程度になる。しかし太陽励起ではこのプロセスが100%であると考えてよい。

放電光は4πに拡散するが太陽光ははるかに拡散角度が小さい。本質的には大気の散乱を除けば10mradのレベルである。これを考慮すると吸収率は太陽光の方がより一般的な放電励起に比べて高く取れる。実際には太陽光の集光効率やその強度などが密接に関連してくる。これらは今後の解明すべき点であり実際の太陽光とレーザー体の空間的な結合性や集光性をより詳しく調べる必要がある。

一般の結晶の波長に対する吸収係数はよく知られておりこれを図2に示す。Nd及びCrのYAG結晶中での吸収はこの領域において互いに相補的であり吸収波長領域が微妙にずれている。そのため両者を合わせると可視-近赤外領域を幅広く吸収することはよく知られている。図2に示されるようにこれは太陽光エネルギーの大きな領域全般を網羅する。

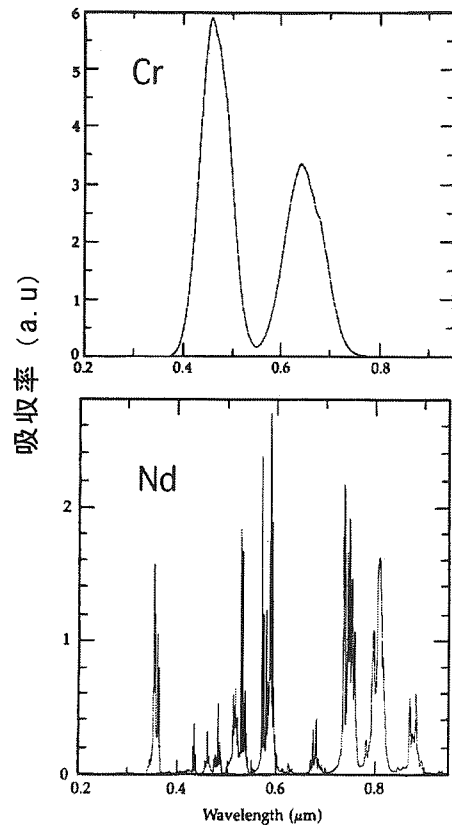


Fig. 2 Absorption spectrum of Cr³⁺ and Nd³⁺.
図2 Cr³⁺及びNd³⁺の可視波長を中心とした吸収スペクトル

一方、ある程度ドープ量が高い条件ではCr(3+価のイオン)に吸収された光は量子遷移を通じてNdに移る。このような場合Nd及びCrのYAG結晶中での励起による遷移は図3に示されるようになる。Crに吸収されたエネルギーは量子遷移をへてNdの励起準位に移行しNd発振が集中的に起こる。この結果、太陽光スペクトルの広領域を吸収し、このエネルギーを集めて集中発振する。これにより高効率発振が可能となる。

このような量子遷移の機構は GSGG で調べられてきたがセラミックで起こるかは不明であった。しかし実際に実験を行なうと十分高い変換効率を得た。むしろ結晶性材料以上にセラミックの方が高い結果を示した。

この考えに基づき、高効率モデルを考案しシミュレーション設計を行った。[4] これにより 20~40%の効率が予想された。現在室内模擬太陽光による小型実験ではあるがこれによく合う変換効率を得ている。[5, 6] 我々はこの励起メカニズムに関する研究を進め、より高効率の可能性もあることも理論結果として得ている。[7]

これらは Cr や Nd などの太陽光スペクトルの広領域において吸収する複数物質を高濃度ドープすることにより得られた結果である。このレーザーの野外での太陽光励起発振も確認している。

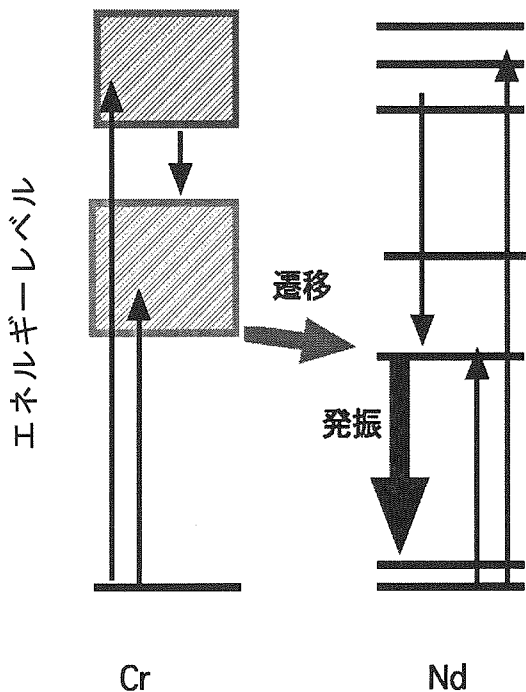


Fig. 3 Quantum transition mechanism of Cr and Nd
図3 Cr 及びNdの励起と量子遷移のメカニズム, Crに吸収されたエネルギーは量子遷移をへてNdの励起準位に移行しNd発振が集中的に起こる。

3. 模擬太陽光励起レーザー実験

3.1 レーザー材料

前記概念に基づいた典型例としてロッド型セラミックNd/Cr:YAG レーザーを用いて模擬太陽光を用い実験を行なった。このNd/Cr:YAG セラミックはNdとCrを共添加したYAGのセラミック化に世界で初めて成功した新規のレーザー材料である。Nd/Cr:YAG セラミックのレーザー発振波長はNd:YAG結晶と同じ1064nmであり、光学的特性も結晶性のレーザー材とほぼ同じである。異なる点は、結晶と比較

して活性イオンの濃度消光を押さえ、高濃度で添加できることと、及び熱破壊限界が改善できることである。このことは熱ストレスを高くとることが出来る可能性を示しており、より強い太陽励起の可能性を示唆している。

さらに藤岡・中塚らによりNd/Cr:YAGセラミック材料に励起を行なった場合にCrがNdの反転分布形成を補助するためにNdの上準位寿命が増加する効果が確認されている[2]。この結果、従来からあるGSGG, GGG, GSAG等のNd, Cr添加された結晶と比較して2倍程度誘導放出断面積が高く、また、熱伝導率も2倍ほど高くなる可能性を示しておりセラミックが優れた太陽励起レーザーであることが期待される。

レーザー小信号利得は誘導放出断面積に比例しており、誘導放出断面積が高いとレーザー小信号利得も比例して大きくなるため、本セラミック材料でレーザーを構成した場合、太陽光からレーザーへの変換効率が改善される。また、熱伝導率が高くなれば、熱の放出能力が高まり、熱破壊限界が改善され、より励起太陽光の高密度集光が可能となる。この結果、装置は小型化される。

今回実験のために試作されたNd/Cr:YAGセラミックレーザーはロッドの側面を研磨して、内部で励起光とレーザー光を全反射により閉じ込めることを可能にした。ロッドの長さは約100mm、直径は3mmである。片面に誘電体多層膜の高反射膜(HRコート)を施した。反射率は99.9%、反対の面には反射防止膜(ARコート)を施した。

このセラミック体の透過率は99%以上であった。面同士はできる限り平行となるようにした。ロッドの径に対する入射光の伝播角度で定義づけられる開口数(NA)は1.2であり、空気とレーザー媒質の屈折率から求められる。NAが非常に大きいため、内部での光の全反射の臨界角は大変小さくなり、励起光とレーザー光のとじ込めが効率よく行われる。

Crの添加により、YAG母材料の損失に加え、さらに散乱によりレーザー発振波長での損失が増加する。これはCrの濃度が高濃度になればなるほど増加する傾向がある。散乱によるレーザー発振波長での損失の低減のため、Crの添加量は0.2%に抑えられた。ロッドの側面にNd:YAGのレーザーを用いて側面方向の透過率を計測した結果、目立った損失は観測されなかった。

図4に計測されたNd/Cr:YAGセラミック材料の吸収スペクトルを示す。透過は分光高度計により計測されたデータを元に吸収係数を求めた。

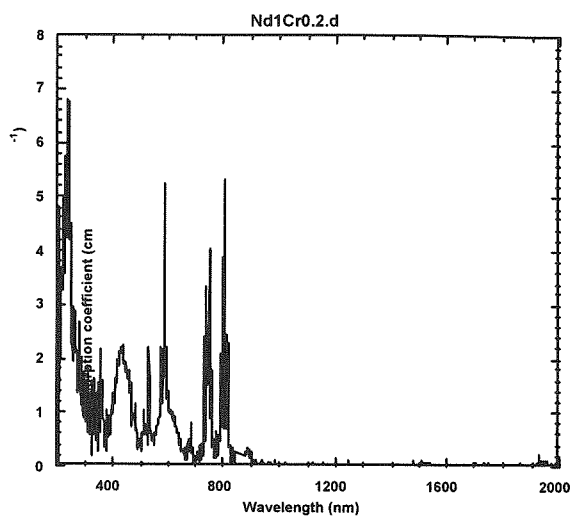


Fig. 4 Absorption spectrum of YAG Ceramics doped with Nd and Cr

図4 Nd及びCrの供ドーブYAGセラミック体吸収率

吸収スペクトルは、300-1800nmまで計測された。セラミックに添加されたイオン濃度は、Ndが1%、Crが0.1%であり、また、もう一方は、Ndが1%、Crが0.2%であった。ともに、可視領域で450nm、600nmでCr3価による吸収が増加していることが分かる。今回、このCr濃度が異なる2種類のNd/Cr:YAGセラミック材料でロッド型レーザーの試作を行い、模擬太陽ランプ光-レーザー光変換効率の確認を行った。

図5に典型的なレーザー本体を示す。直径が3mm、長さが100mmである。このドーブ率は上からそれぞれNd 1.0 Cr 0.2% (重量比) 及びNd 1.0 Cr 0.1% (重量比) である。これ以外にも数種、作成しているが実験的にも理論的にも最も効率の良いものを絞ってその特性を述べている。

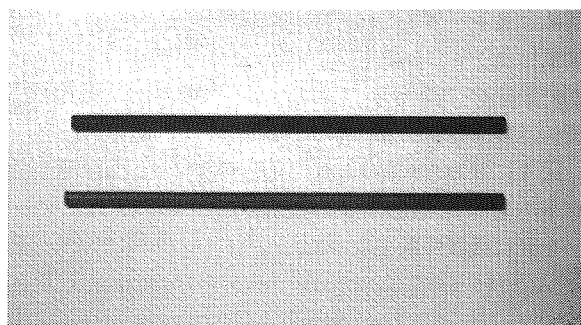


Fig. 5 Picture of Nd-Cr ;YAG ceramics laser
図5 Nd及びCrの供ドーブYAGセラミックレーザー本体写真

3.2 実験装置

図6に今回用いたレーザー発振の実験装置を示す。励起

光源には、模擬太陽光源としてアークメタルハライドランプを用いた。ランプ光を定常的に点灯してロッドの励起を行った。このランプは小型であり、この反射光を用いると励起に有害な900nm付近の輝線は減衰でき、ほとんどこの影響がないことがカタログ値よりわかる。一方、一般的なXeランプでは放電部が大きくこの波長付近での輝線がレーザー部に直接かかり励起に影響を及ぼす。このため反射型メタルハライドランプを励起光源として採用した。

アークメタルハライドランプの色温度は5600Kである。ランプ光は放物面ミラーで前方へ出力される。ミラー直後に出力光の強度コントロールのためにアルミ製の固定型空間チョッパーを用いた。ミラーで集光されたランプ光は、2次集光ミラーでさらに集光される。ロッドの前に3mm径の穴を持つアパチャーがロッドの前に配置され、このアパチャーを通じてロッドへとランプ光は直接注入される。ロッドに注入された励起ランプ光は、レーザー媒質の内部を全反射しながら伝播して吸収される。ロッドの出口にはその後1mmに平面の部分反射ミラーが配置された。その後に出カビームコリメート用のレンズを配置した。レーザーのスペクトルは近赤外用のスペクトルメータにより計測を行った。

レーザー出力パワーは吸収されずにミラーコートを透過してくる可視領域での光を除去するため発振波長だけを透過するIRフィルターを通しパワーメータにより計測を行った。また入力パワーの計測もアパチャー後でパワーメータにより行った。太陽レーザーロッドにメタルハライド光が集光しレーザー出力をパワーメーターとスペクトルメーターで確認している。

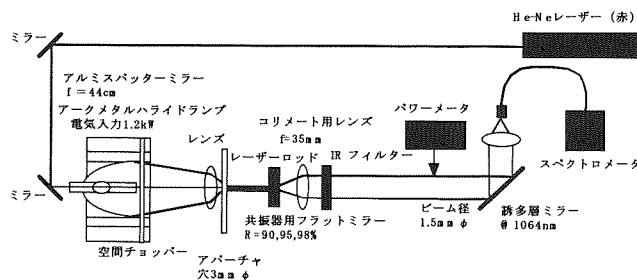


Fig. 6 Experimental arrangement of Solar pumped Laser with simulated solar light

図6 模擬太陽光源を用いた太陽励起レーザー実験配置

3.3 スペクトル計測

図7に計測された励起ランプ光出力スペクトルを示す。完全に太陽光スペクトルとは一致していないが、太陽光の特徴である400nm付近からの立ち上がりや近赤外領域の減衰などはほぼ一致している。

実際に太陽光を用いた発振実験を試みたが、太陽光の揺動が大きいため定量的な実験が出来ず、この模擬太陽ランプを用いて実験した。

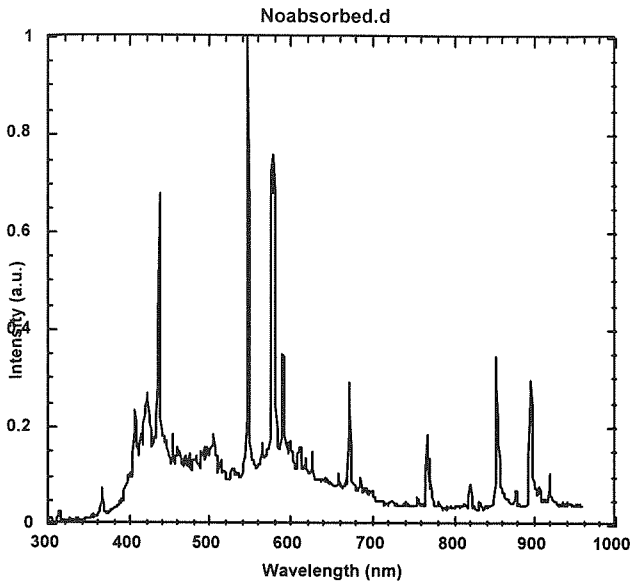


Fig. 7 Spectrum of pseudo solar light for the experiments

図7 模擬太陽光ランプのスペクトル、短波長域立上がり及び長波長域での減衰が傾向は一致

レーザーにより放射される光は発振により狭帯域になり発振波長1.06 μm に一致する。これは前述のパワーメーター及びスペクトルメーターで確認している。図8にロッド型Nd/Cr:YAGの発振スペクトルを示す。発振の特徴的なスペクトル及びパワーを示している。この発振のパターンが調べられた。これによるとレーザー発振の縦横モードは、マルチモードであった。

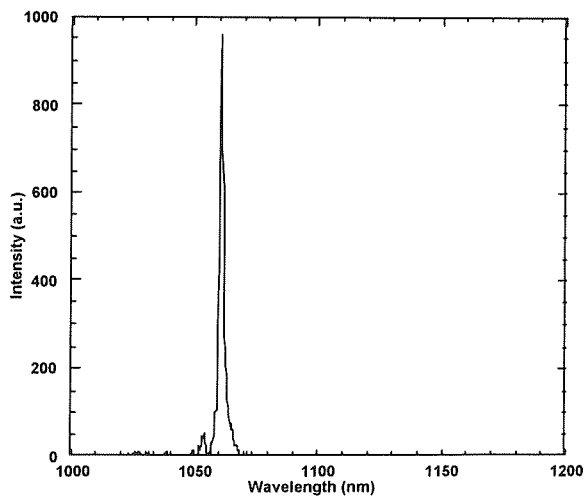


Fig. 8 Spectrum of the output of pseudo solar pumped laser

図8 模擬太陽光励起レーザーの発振スペクトル

3.4 出力特性

図9にランプ光入力に対するレーザー光の出力特性の計測結果を示す。この励起パワー密度の範囲では、出力ミラーの反射率が90%の場合でNd/Cr:YAGセラミックは最大のレーザー出力パワーが得られた。入力パワー640mW(太陽常数の70倍)に対してレーザー出力は240mW、模擬太陽光-レーザー光変換効率は最大38%が得られた。この場合、無反射膜は付加していない。このため実際に付加すると2-3%は上がる可能性がある。

比較のため全く同一形状での通常のNd:YAG(結晶)Nd:Cr:GSGG(結晶)Nd:Cr:YAGセラミック(Cr 0.1%/0.2%)における励起光エネルギーに対するする実験を行なった。各々のレーザー出力-光エネルギーの効率を図9にプロットしている。これより際立ってセラミックの結果が、高効率であることを示している。

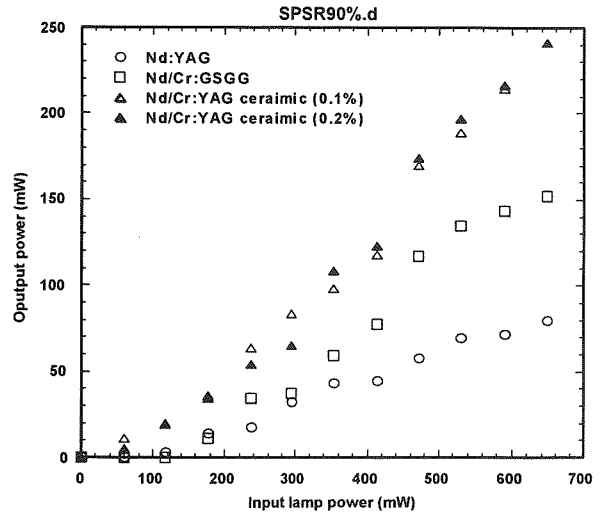


Fig. 9 Output power of Nd-YAG and Nd-Cr GSGG laser with Nd-Cr YAG Ceramics in a same configuration.

図9 Nd及びCr供ドープYAGセラミック体出力とYAG、及びGSGG結晶における実験結果の比較

レーザー結晶のドーパント量は、濃度消光により制限されているが、セラミックの場合は、レーザー結晶の場合よりも濃度消光が小さくドーパント量を増加させることができる。

Nd:YAG結晶の場合、レーザー出力は最大70mW、Nd/Cr:GSGG結晶の場合、レーザー出力は最大で152mWであった。レーザーの発振しきい値は、Nd:YAGの場合ランプ光入力パワーは100mW、Nd/Cr:GSGG結晶の場合は、110mWであった。

Nd/Cr:YAGセラミックの場合は、40-60mWでNd:YAG結晶の場合の約半分であった。

将来的にはドーパ率をより高くすることは技術的に可能であるのでより強収束の太陽励起が可能である。このことは実用化においてより小型化できることを意味しており、この方向での発展によりコンパクトな装置が期待できる。

この時熱の問題が誘起される可能性がある。温度におけるレーザー材料の利得減少の問題や冷却などに関する問題は今後の重要な課題となると考えられる。

3.5 光-光エネルギー変換効率

図10にレーザー出力側ミラーの反射率に対する総合変換効率(レーザー出力/模擬太陽光)の変化について示す。Nd:YAG結晶では、出力ミラーの反射率98%, Nd/Cr:GSGG結晶では、出力ミラーの反射率が95%, Nd/Cr:YAGセラミックでは出力ミラーの反射率が90%の場合、最大の変換効率が得られた。この時、Nd:YAG結晶の変換効率は27%であった。レーザー出力パワーの最適反射率がNd/Cr:YAGセラミック、Nd/Cr:GSGG結晶、Nd:YAG結晶の順に大きくなるのは、レーザー小信号利得がこの順番で高いためであると考えられる。

励起ランプ光の吸収率は、Nd/Cr:GSGGとNd/Cr:YAGセラミックは同等で非常に高く、300nmから1000nmの波長に対して90%以上である。Nd:YAG結晶の場合は、狭い吸収バンド幅しかなく、50%程度である。レーザー利得に直接影響する誘導放出断面積は、Nd/Cr:GSGGはNd:YAG結晶、及び、Nd/Cr:YAGセラミックの半分である。従って、最もレーザー利得の高いものはNd/Cr:YAGセラミックであり、Nd/Cr:GSGG、Nd:YAG結晶の順となる。セラミックの場合、散乱によるレーザー発振波長での損失が大きくなるが、Crのドーピング量が低いため、大きな問題とならない。

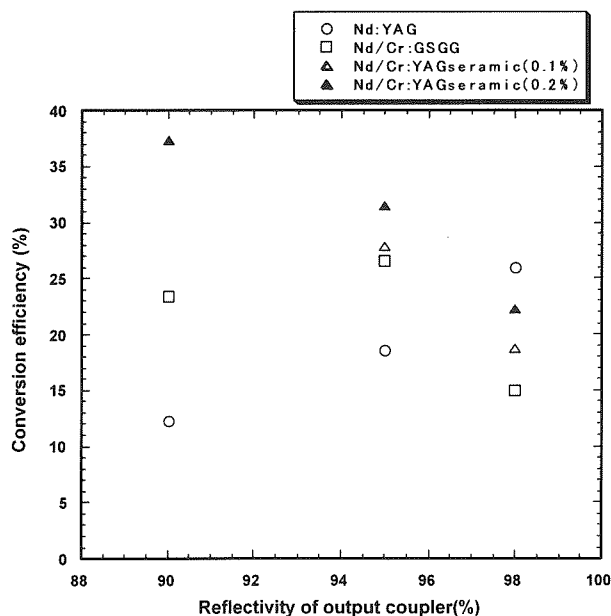


Fig. 10 Conversion efficiency to the reflectivity of output coupler of Nd-Cr in YAG Ceramics

図10 Nd-Cr-YAGセラミックレーザーにおける出力カップラー反射率に対する変換率

レーザー出力が最も高くなる出力ミラーの反射率は、励起状態にあるレーザー媒質の利得に依存する。レーザー利得

が高ければ高いほど、レーザー出力に対して最適となるミラーの反射率は低くなる。実験結果はこの傾向を良く示している。

4. まとめ

Nd系の固体レーザーが、励起太陽光の300-1000nmの波長領域で吸収率が100%であると仮定し、量子効率等を考慮すると、変換効率の理論限界は40%前後と考えられる。今回のNd/Cr:YAGセラミックレーザーの発振実験では、ランプ光からレーザー光へ理論効率の限界に近い光-光変換効率は38%が実現できたこととなる。アークメタルハライドランプの出力スペクトル形状は実際の太陽光と完全に一致していないため単純に比較はできないが、太陽光を励起光源に用いた場合でも、同様に高効率でレーザー光へと変換が可能であると考えられる。

将来的にはドーピング率をより高くすることは技術的に可能であるので、より強収束の太陽励起が可能である。このことは実用においてより小型化を意味しており、この方向での発展によりコンパクトな高効率レーザー装置が期待できる。

また、このようなセラミックレーザーはコストも量産で安価になってくると考えられる。結晶であれば製品のサイズや性能は決まってしまうが、セラミックでは自由に選ぶことが可能であるため太陽励起レーザーのエネルギー利用についての展望が伸展するものと期待できる。特にこの方式は大規模システム的应用が可能であり1-100haを超える大面積太陽エネルギーを集約できると考えられる。このエネルギーは電力に変換するのではなく化学的なエネルギーへの変換が可能である。

この方式により経済的なクリーン再生エネルギーを生成する可能性に期待が持たれる。これに対しここで述べた研究結果は極めて重大な結果となると予想される。このため引き続きこの装置の特性検証に努めこの結果を確定する必要がある。

なお、この研究の一部はJAXA委託研究、調達仕様書番号JX-PPSPC-133730により行なわれた。

参考文献

1. C. G. YOUNG; Appl. Opt. 5 pp549 1969)
2. 湯上他、レーザー研究 24 pp1308 1995
3. 植田、レーザー研究 29 pp79 2000
4. 佐伯他、レーザー研究 30 pp133 2002
5. 佐伯他、レーザー研究 32 pp48 2004、T. SAIKI et al. CLEO-05. 24 2005、USA
6. TAKU SAIKI, et al. proceedings of 2nd International Symposium on Beam Energy Propulsion, pp378 2004 American Institute of Physics 0-7354-0175-6/04