

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760688

研究課題名（和文）太陽励起レーザーの高効率な太陽光キャビティの開発

研究課題名（英文）

Development of effective solar light cavity for solar-pumped laser

研究代表者

大久保 友雅（OHKUBO TOMOMASA）

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：50431995

研究成果の概要（和文）：

フレネルレンズを太陽光の主集光系として、また Nd:YAG 結晶をレーザー媒質として用いた太陽励起レーザーの開発を行った。特に、これまでに用いてきた太陽光の二次集光系に新しく三次集光系を考案、設計、製作、実験および数値計算による解析を行った。従来レーザー媒質の破壊等が起り定常的なレーザー出力が得られていなかったが、本研究の成果により 120W の定常出力に成功した。これにより太陽励起レーザーの世界最高の効率を 1.5 倍にも更新し、 $30\text{W}/\text{m}^2$ を実現した。

研究成果の概要（英文）：

Solar-pumped laser system is enhanced by developing a new solar light cavity. A 3rd concentrator of solar power is adapted to the previous 2nd solar concentrator. This 3rd concentrator is newly developed and 120W of stable output is realized although laser medium was broken and stable laser output was impossible in previous study. $30\text{W}/\text{m}^2$ of efficiency is realized because of this study. This is the new world record which is 1.5 times larger than previous record of efficiency of solar-pumped laser system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：自然エネルギーの利用，太陽励起レーザー

1. 研究開始当初の背景

太陽励起レーザーはレーザーが初めて実現されてからほぼすぐに 1W クラスの出力までは実現された歴史自体は古い技術である。しかし、その後の研究においてはその使用目的自体が明確ではなく、通常の電力から励起光を発生させ、それをを用いて発振させるレ

ザーと比較して優位性が特に見いだされず、あまり活発な研究がなされて来なかったのが実情であった。

しかし、近年 JAXA による LSSPS プロジェクトなどにより実用的な応用が提案されはじめ、更には、この太陽励起レーザーの持つ集光性能を生かした新しいマグネシウム

を用いたエネルギーサイクルまでもが提案されるようになった。

特に、このマグネシウムを用いたエネルギーサイクルについては、太陽光のエネルギーを太陽励起レーザーを通してマグネシウムという形態に蓄える事をコンセプトとしており、年間平均日照量が一日平均4～5時間しか無い我が国にとっては快晴時のみならず曇天時や雨天時、更には夜間に消費するエネルギーを賄うための技術として今後必須のコンセプトであると言える。

従来の太陽励起レーザー装置では、巨大な反射鏡により太陽光を集め、小さなレーザー媒質にまでそのパワーを集光するため、極めてロスが大きく、全体の効率はわずか0.7%程度であった。研究代表者らはこれを、太陽光の主集光系にはフレネルレンズを用いる事にし、さらにそこで集められたパワーを集める二次集光系の開発、更にはCr:Nd:YAGセラミックをレーザー媒質に用いる事により、効率の向上を行ってきた。

具体的には4 m²のフレネルレンズを搭載した太陽追尾装置の焦点に反射型のコーン形状の太陽光キャビティを二次集光系として設置し、その中に9x100mmのCr:Nd:YAGセラミックをレーザー媒質として設置する事により、ピークパワーで80Wのレーザー出力に成功し、単位集光面積あたりのレーザー出力では20W/m²と、従来の研究の6.7倍もの効率の向上に成功していた。

しかしながら、そのレーザー出力はピークパワーこそ80Wであったが、長時間のレーザー発振においては30W程度までレーザー出力が低減してしまい、更には熱ショックによるレーザー媒質の破損も起こり、定常的な動作には課題が残されていた。更に、実際のエネルギーサイクルの実現に向けては更なる効率の向上が必要であると考えられ、効率の向上も課題であった。

2. 研究の目的

上記課題の解決のために、

- (1) レーザー媒質の品質調査
- (2) レーザー媒質の冷却性能の向上
- (3) 太陽光集光系の改良による効率の向上が必要である。

(1)については、レーザー媒質に吸収された太陽光パワーが実際にレーザーに変換されず、レーザー媒質内部での損失によりロスとして効率の低減に寄与している事が考えられる。そのため、他の媒質をも視野に入ると同時に、レーザー媒質の損失についての計測、検討が必要である。

(2)については、定常的なレーザー出力が低減してしまう事、更にはレーザー媒質自身が破損してしまう事については、吸収された太陽光の内レーザーに変換されず熱として

レーザー媒質内に蓄積されてしまったパワーが原因であると考えられる。そのため、これを除去する仕組みの検討を行った。

(3)については、太陽励起レーザーの効率が目標値の1/5である事の最大の原因は、フレネルレンズで集光した太陽光を二次集光系で閉じ込めきれず、そのためにレーザー媒質にも吸収されないために効率が得られていない事が原因であると考えられる。そのため、フレネルレンズで集光した太陽光パワーを効率良く閉じ込める集光系の開発が必要である。

3. 研究の方法

上記目的(1)の解決に関しては、実際にレーザー媒質の品質調査を行った。従来の研究ではCr:Nd:YAGセラミックがレーザー媒質として用いられてきた。これはCr³⁺をコドープする事により、太陽光の幅広いスペクトルをNd³⁺のレーザー上準位へと遷移させるのに適していると考えられていたからである。しかし、レーザー媒質用セラミックの技術は日々進化しているものの、制作過程において結晶よりは不純物や脈理などが生じやすい。そのため、本研究では市販のNd:YAG結晶を比較対象とし、レーザー発振波長である1064nmでの損失係数の計測を行った。

計測手法としては、積分球内に資料を設置し、資料に対して1064nmのレーザーを通過させる事により、媒質で散乱された光を積分球で計測する事により、散乱係数を事実上の損失係数として求める方法と、実際にレーザー発振させた上で出力ミラーを変えてスロープ効率と発振閾値を計測する事により、一様励起のレーザー発振モデルから損失係数を求める方法と二種類の計測を行った。

上記目的(2)の解決に関しては、レーザー媒質の形状、レーザー媒質を冷却するための冷媒の流路を実験、計算により検討し、冷却効率が高くかつレーザーの効率が低減しない形状について検討を行った。レーザー媒質を小さくする事により、廃熱性能は当然向上するが、太陽光を吸収できる体積が小さくなるためにレーザー出力が低減する。そのため、下記(3)と合わせて、冷却能力と太陽光パワーの吸収効率との両方を考慮して形状の決定を行った。

上記目的(3)の解決に関しては、光線追跡の数値計算により、フレネルレンズによって集光され、二次集光系で閉じ込めきれない太陽光パワーを閉じ込められる形状について検討、計算を行った。特に本研究においてはレーザー媒質冷却のための冷媒として水を用いているため、その屈折率を利用し、太陽光をレーザー媒質の方向へと集光させる仕組みを考案し、その設計検討を行った。

最終的には以上の研究によって得られた知見から新しくレーザーヘッドの設計、試作を行い、実験によってその性能検証を行った。

4. 研究成果

本研究で得られた成果は最終的には水の屈折率を利用した三次集光系の開発を行い、そこに 6x100mm の Nd:YAG 結晶をレーザー媒質として用いる事により定常的に 120 W の定常出力を得る事に成功した事である。具体的な内容を以下に示す。

(1) レーザー媒質の品質調査

3. で述べた方法により, Cr:Nd:YAG セラミックと市販の Nd:YAG 結晶との計測を行った。その結果どちらの計測でもほぼ同じ値が得られ, Cr:Nd:YAG セラミックが 0.4 [1/m] であったのに対し, Nd:YAG 結晶については 0.2 [1/m] であった。この結果から, Cr:Nd:YAG セラミックは Nd:YAG 結晶に対して二倍の損失係数を持っている事がわかる。これは光線追跡による数値計算で得られた Cr:Nd:YAG セラミックの太陽光の吸収効率の向上の影響よりも損失の寄与の方が大きい。そのため、本研究では Nd:YAG 結晶をレーザー媒質として用いる事とした。

この事により, Cr:Nd:YAG セラミックのように確かに吸収はするものの、レーザー波長への変換効率が低く、残りを熱として蓄えてしまうスペクトルの割合が減るため、冷却負荷の低減も可能となる。

(2) 三次集光系による冷却効果及び集光効率の向上

従来の研究では図 1(a) に示すコーン型の反射型太陽光キャビティを、フレネルレンズで集光した太陽光をレーザー媒質へと再集光する二次集光系として用いていた。しかし、これは

- ・冷却水によるレーザー媒質周辺での効率的な冷却効果が得られていない。
- ・励起分布に偏りが生じる
- ・太陽光キャビティに閉じ込められずにそのまま外部へと出ていく太陽光パワーが大きく、集光効率が低い

という問題点があった。そこで、図 1(b)(c) に示す、新しい三次集光系 (Liquid Light Guide Lens=LLGL) を二次集光系の中に設置する事により、これらの欠点を解消する事に成功した。

三次集光系はガラス管と水のみから形成されており、ガラス管内の水は従来のレーザー媒質の冷媒としての役割の他に、図 1(c) の断面図に示すように、その外側の空気層との屈折率差によってこれまではレーザー媒質に当たらなかった光線も屈折して当たるようにする役割をも担っている。

この三次集光系について光線追跡による数値計算により、レーザー媒質での太陽光の

総吸収パワーを計算したところ、それぞれの媒質サイズについて向上を確認した。その効果から、レーザー媒質の体積を減少させる事が可能となり、6x100mm のレーザー媒質を選択した。

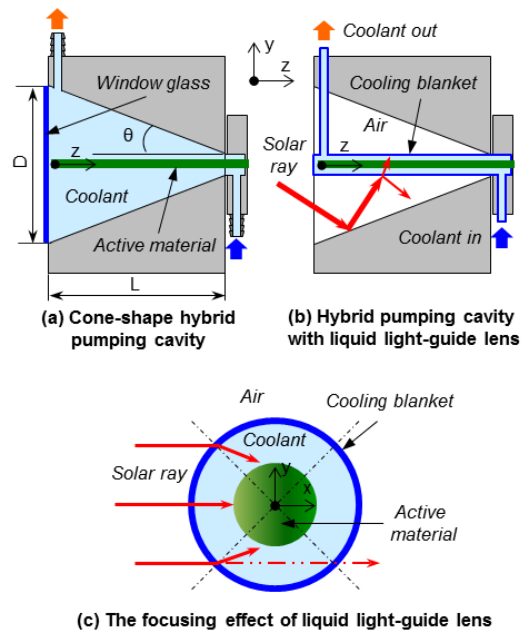


図 1(a)従来の太陽光キャビティ (b)本研究で提案した三次集光系。水とガラス管から構成される (c)三次集光系の断面図。水の屈折率を利用して、従来レーザー媒質に当たらなかった太陽光線をレーザー媒質へと集光する効果が期待出来る。

更に、この三次集光系により、従来二次集光系の奥まで行かなければレーザー媒質に吸収されなかった太陽光線の一部は手前でレーザー媒質に吸収される事になり、結果として励起分布の向上が確認された。6x100mm の Nd:YAG 結晶について、LLGL を用いた場合と用いなかった場合についての光線追跡による計算結果をを図 2 に示す。点線で示した LLGL の無い場合の鋭いピークは LLGL を用いる事によってかなり解消された。

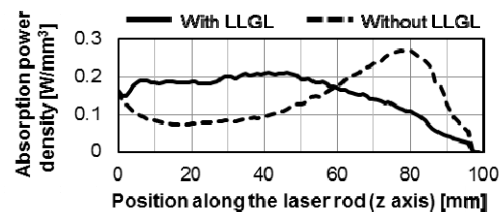


図 2 LLGL がある場合と無い場合とのレーザー媒質内での励起光吸収分布の計算結果。LLGL を用いる事により、分布の偏りが小さくなり、また総吸収パワーも増える事を確認した。

また、このようにガラス管内のみを冷却水が通過する事により、冷却水のレーザー媒質周りでの流速が増加し、結果として冷却効果の向上が見られた。

これらの結果を総合し、実際に 6x100mm の Nd:YAG 結晶と三次集光系とを組み合わせた新しいレーザーヘッドを作成し、実際に太陽光を集光して発振をさせる事により定常的に 120W 程度の出力を得る事に成功した。以前の研究との比較を図 3 に示す。従来の研究では 80W のレーザー出力が一時的に得られるもののすぐに大幅に出力が低下してしまっていたが、本研究の結果では 120W と以前の 1.5 倍のレーザー出力が持続的に得られる事を確認した。

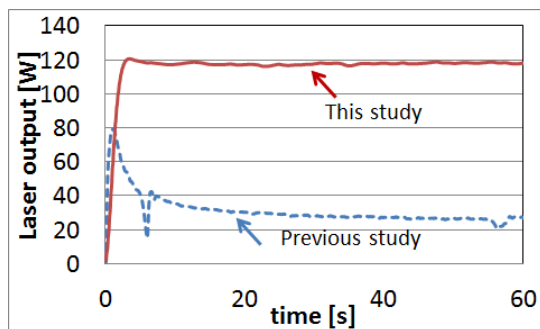


図 3 レーザー出力の時間変化の様子。従来の研究では一時的に出力が上がった後すぐに出力は低減していたが、本研究では以前のピークの 1.5 倍の出力が持続的に得られている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

- T.H.Dinh, T. Ohkubo, T.Yabe and H.Kuboyama, “120 W cw solar-pumped laser with liquid “light-guide lens and Nd:YAG rod”, Opt.Lett, (2012), 査読有り (Accepted)
- S. H. Liao, T. Yabe, M. S. Mohamed, C. Baasandash, Y. Sato, C. Fukushima, M. Ichikawa, M. Nakatsuka, S. Uchida, T. Ohkubo, “Laser-induced Mg production from magnesium oxide using Si-based agents and Si-based agents recycling”, Appl.Phys, 109, (2011), 査読有り
- Shi-Hua LIAO, Takashi YABE, Mohamed S. MOHAMED, Chojiil BAASANDASH, Yuji SATO, Chika FUKUSHIMA, Masashi ICHIKAWA, Masashi NAKATSUKA, Shigeaki UCHIDA, and Tomomasa OHKUBO, “Laser Induced Magnesium Production Using Silicon as A Reducing Agent towards Sustainable Energy Cycle”, レーザー研究, 38,

p202-206, (2010), 査読有り

[学会発表](計 7 件)

- Yabe Takashi, Ohkubo Tomomasa, Dinh Thanh Hung, Kuboyama Hiroki, Nakano Junichi, “Demonstration of Solar-Pumped Laser-Induced Magnesium Production from Magnesium Oxide”, TMS2012 141st Annual Meeting & Exhibition, 12, Mar. 2012, Orlando, USA
- 松島英理哉, 矢部孝, 内田成明, 大久保友雅, 中野潤一, 鶴瀨忠, 後藤萌, “クリーンエネルギーサイクル実現のためのレーザーによる酸化マグネシウムの還元”, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, 2012 年 2 月 1 日, 仙台
- 岡本康太, 矢部孝, 内田成明, 大久保友雅, Dinh Thanh Hung, 久保山裕己, 市川晃, 竹中泰亮, 丸川直起, 山田裕輔, “太陽光励起レーザーによる酸化マグネシウム還元率向上に関する研究”, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, 2012 年 1 月 30 日, 仙台
- Dinh Thanh Hung, 矢部孝, 大久保友雅, 内田成明, 田辺和慶, 久保山裕己, 岡本康太, 佐藤雄二, 吉田國雄, 岡本吉章, 柳谷高公, “太陽光励起レーザーにおける励起光集光系の高性能化に関する研究”, レーザー学会第 414 回研究会報告, 2011 年 7 月 8 日, 大阪
- タンフン デン, 矢部孝, 大久保友雅, 内田成明, 田辺和慶, 久保山裕己, 岡本康太, 佐藤雄二, 吉田國雄, 岡本吉章, 柳谷高公, “高効率・高出力太陽光励起レーザーのための励起光集光系の開発”, 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 2011 年 3 月 26 日, 神奈川
- 中野潤一, 矢部孝, 内田成明, Baasandash Chojiil, 佐藤雄二, 大久保友雅, 松永栄一, 福島知佳, 廖世華, 市川雅士, 中塚雅, 丸田裕典, 鶴瀨忠, “クリーンエネルギーサイクル実現のためのレーザーによる酸化マグネシウムの還元”, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 2011 年 1 月 9 日, 電気通信大学
- 久保山裕己, 矢部孝, 内田成明, 大久保友雅, 田辺和慶, Dinh Thanh Hung, 岡本康太, “MgO 還元のための太陽光励起レーザーのパルス化に関する研究”, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 2011 年 1 月 9 日, 電気通信大学

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大久保 友雅 (OHKUBO TOMOMASA)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：50431995

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：