

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：32692

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870191

研究課題名(和文) 太陽励起レーザーのため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 high-efficient solar cavity for solar-pumped laser

研究代表者

大久保 友雅 (OHKUBO, Tomomasa)

東京工科大学・工学部・講師

研究者番号：50431995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光パワーを出来るだけレーザー媒質へと効率的に吸収させ、かつ熱負荷を下げるために、光線追跡を用いた太陽光キャビティを設計するための数値計算コードの開発を行った。計算では、一次集光系であるフレネルレンズを含み、一次集光系によって集光された入力光を元に、光線追跡を行う。レーザー媒質への吸収パワーを最大化しつつ、それによる熱負荷を最小化するために、太陽光キャビティの形状についての非線形最適化を行って設計出来るコードの開発を行った。そこから得られた知見を基に、従来のシステムの問題であった過剰な熱負荷を下げるため、従来よりも小型の太陽光励起レーザーシステムを作成した。

研究成果の概要(英文)：I developed simulation code for designing solar cavity to realize effective absorption of solar energy into laser medium with less thermal effect. The code is based on ray-tracing and the calculation model include a Fresnel lens of the 1st concentrator. The code has a function of non-linear optimization for designing the shape of the solar cavity with maximum absorption efficiency and minimum thermal effect. Considering the simulation results, I developed new solar-pumped laser system which is smaller than previous one to reduce thermal effect inside laser medium and laser cavity.

研究分野：太陽光励起レーザー

キーワード：太陽光励起レーザー 太陽光キャビティ Cr:Nd:YAGセラミックス

1. 研究開始当初の背景

化石燃料や原子力エネルギーの消費を減らし、自然エネルギーの有効利用についての検討が現代では欠かせない。中でも特に、無尽蔵とも言うべき膨大なエネルギー源である、太陽光エネルギーの有効利用についての研究は喫緊の課題である。

太陽光エネルギーの利用手段の一つとして、電気等を介さずに太陽光を直接レーザーへと変換する太陽光励起レーザーがある。これは、エネルギーの伝送手段としてや、エネルギーキャリアを生成するためのドライバースとして期待されている。

また、太陽光励起レーザーは光から光への変換方法として、サイエンスの分野でも材料開発等が活発である。特に Cr^{3+} をドープした Cr:Nd:YAG セラミックス等のレーザー媒質は日本独自の技術である。

研究開発当初において、研究代表者らは太陽光励起レーザーの一次集光系の面積に対するレーザー出力を考えた効率において $30\text{W}/\text{m}^2$ という世界最高の効率を記録していた。この効率を更に向上させ、日本発の新しいエネルギー利用方法の提案が期待されている。

2. 研究の目的

小規模なフレネルレンズを用いた新しい太陽光励起レーザー装置を作成し、熱負荷を低減した状態で、レーザー媒質への太陽光の吸収分布や、共振器内でのビームのモード等の最適化について検討するための基礎の確立が本研究の目的である。

従来の太陽光励起レーザー装置に用いていた一次集光系であるフレネルレンズは、 $2\text{m} \times 2\text{m}$ と巨大であった。その結果、レーザー媒質への熱負荷が大きく、レーザーの出力の低減やレーザー媒質の破壊と言った問題があった。

熱負荷があまりに大きく、このままでは最適化を検討することが極めて困難であったため、本研究では従来よりも小規模なフレネルレンズを搭載した太陽追尾装置・太陽光励起レーザーシステムを開発するとともに、それに合わせた太陽光キャビティ等を設計するためのプログラムコードを開発し、太陽光励起レーザーの高効率化、特に、太陽光の有効スペクトルのレーザー媒質への吸収率の向上についての研究の基礎を確立する。

3. 研究の方法

(1) 太陽光励起レーザーシステムの作成
まず初めに、天体観測用の経緯台をベースとした、 $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ のフレネルレンズを搭載した太陽追尾装置のプロトタイプを作成を行った。四象限センサーにより太陽の位置をとらえ、経度方向もしくは仰角方向にフィードバック制御をする太陽追尾装置を作成した。

次に、 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 程度のフレネルレンズを搭載した太陽光励起レーザーシステムの基本

部分を作成した。追尾装置については、前述の小型の物と同様に、経度方向、仰角方向にそれぞれ4象限センサーからの信号を用いたフィードバック制御を行うものである。そこに、太陽光キャビティやレーザー媒質を含むレーザー共振器、計測器等を載せることにより、太陽光励起レーザーシステムとなる。以上の新しい装置の開発により、小型のフレネルレンズを搭載し、熱負荷を低減した新しい太陽光励起レーザーシステムの基礎が出来上がる。

(2) 太陽光キャビティ設計のためのコード開発

太陽光励起レーザーの効率の向上のためには、一次集光系であるフレネルレンズで集光された太陽光エネルギーを出来るだけ多くかつ均一にレーザー媒質へと吸収させる必要がある。そのためには、レーザー媒質を取り囲む二次集光系である太陽光キャビティの最適化が不可欠である。これまでに行ってきた単純な形状の最適化だけでなく、新しい工夫を付加した太陽光キャビティの最適化のために、誘電体多層膜による光線の反射等を取り入れた、新しい太陽光キャビティの設計コードの開発を行った。また、従来のレーザー媒質よりも広範囲のスペクトルを有効に吸収する Cr:Nd:YAG セラミックスについて、その Cr^{3+} 濃度の違いも考慮するコードの作成を行った。

4. 研究成果

研究期間全体を通じて実施した研究の成果は下記の3点にまとめることができる。

(1) 太陽追尾装置のプロトタイプ及び、 1m^2 級のフレネルレンズを搭載した新しい太陽光励起レーザーシステムの作成

太陽追尾装置を新しく開発するにあたり、まずは $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ のフレネルレンズを搭載した太陽追尾装置のプロトタイプを作成を行った。ベースとしては、市販の天体望遠鏡用の経緯台を用い、各回転軸にモーターを取り付けた。4象限センサーから得られた太陽の方向にフレネルレンズが正対するように、各モーターに対してフィードバック制御を行った。実際に作成した装置を図1に示す。この装置を用いた追尾精度を確認したところ、 ± 0.2 度以内での追尾精度で太陽追尾ができていたことを確認した。



図 1. 25cm×25cm のフレネルレンズを搭載した太陽追尾装置プロトタイプ

更に、前述の通り、従来の過剰な熱負荷を下げるため、1 m²級のフレネルレンズを搭載した、太陽光励起レーザーのための新しい太陽追尾装置を作成し、フレネルレンズの焦点付近に太陽光キャビティや計測器等を取り付ける部分を付けて太陽光励起レーザーシステムとした。追尾精度は正確に測定出来ないが、計算上は上記プロトタイプと比較して誤差は1/10以下となる。作成した太陽光励起レーザーシステムの外観を図2に示す。



図 2. 1 m²級のフレネルレンズを搭載した、太陽励起レーザーシステム（外観）

以上の成果から、小型のフレネルレンズを用いた、高精度に太陽追尾が可能なシステムが完成したことで、従来の4 m²級のフレネルレンズを搭載した装置と比べ、熱負荷を下げた、より本質的なレーザー開発が可能となった。また、それに付随して、これまでにレーザー発振実績の無い、高濃度にCr³⁺がコドープされた、Cr:Nd:YAGセラミックスレーザー媒質を作成した。具体的にはNd³⁺の濃度は1at%

で、Cr³⁺の濃度は0.5at%と1at%の二種類のレーザー媒質を作成した。Cr³⁺の濃度を増すことにより、太陽光の持つ広いスペクトルに対する吸収率を向上し、レーザーへの変換効率の向上が期待できる。

以上の設備・材料を用いることにより、従来の装置では熱負荷が高く、熱破壊を起こしてしまっていた高濃度Cr³⁺コドープのCr:Nd:YAGセラミックスレーザー媒質での高効率なレーザー発振が今後期待できる。

(2) 誘電体多層膜の反射計算コードの作成

任意の層数の誘電体多層膜の反射率を計算し、指定した波長域・入射角度で反射率を最大化するための最適化コードの開発を行った。また、複数の誘電体多層膜の組み合わせにより、指定した波長域で望む反射率を得るための最適化コードの作成も行った。

これまでは、太陽光キャビティの設計に波長選択性を考慮できなかったが、このコードの開発により、任意の波長を必要な方向に反射する設計が可能となった。

また、計算コードの最適化・並列化を行うことにより、当初の約40倍の速さで計算することが可能となった。

設計例として、800nm~1300nmの帯域幅において、反射率(R)を90%以上に保ちつつ、群遅延分散(GDD)が可能な限り小さくなるような誘電体多層膜ミラーを設計した際の結果を図3に示す。

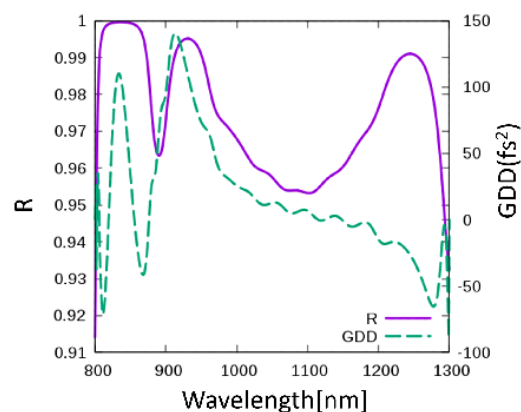


図 3. 誘電体多層膜ミラーの設計例

(3) 太陽光キャビティの設計コードの作成

太陽光キャビティの内部で太陽光がどのように反射、屈折し、レーザー媒質へと吸収されるかを、一次集光系であるフレネルレンズを含んだ系において計算できるコードの開発を行った。特に、太陽光キャビティの内側の形状においては、レーザー媒質への吸収パワー密度とそれによる熱負荷を考慮し、非線形最適化を行って設計出来るようにした。

また、設計コードを並列計算が可能なように拡張することにより、CPUのコアを4個用いた場合は、1個しか用いなかった場合に比べ

て、入出力にかかる部分を除くと、3.5倍以上の計算速度で計算することが可能となった。

以上の研究成果から、現在新しい太陽光キャビティの設計案がいくつか完了している。今後はそれらを作成、実装し、世界最高の効率を更新することを目指す。

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 7 件)

- ① Tomomasa Ohkubo, “Design of New Pumping Cavity with Compound Parabolic Concentrator for Solar-Pumped Laser”, 査読有, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 20, No. 7, 2016, pp. 1065-1069, doi:10.20965/jaciii.2016.p1065
- ② Tomomasa Ohkubo, “Design of New Pumping Cavity Combining Traditional Cavity and Compound Parabolic Concentrator for Solar-Pumped Laser”, 査読無, Proceedings of the Eleventh Japan-China International Workshop on Information Technology and Control Applications, 2016, pp.1-5
- ③ 大久保 友雅, “太陽光励起レーザーのための集光系の設計・評価について”, 査読無, レーザー学会第 491 回研究会報告, 2016, pp.7-11
- ④ 大久保 友雅, 松永 栄一, “高効率な太陽光励起レーザーのための集光系の設計について”, 査読無, レーザー学会第 476 回研究会報告, 2015, pp.7-11
- ⑤ 大久保 友雅, “高出力、高効率な太陽光励起レーザーの開発”, 査読無, レーザー学会第 466 回研究会報告, 2014, pp. 1-5
- ⑥ 大久保 友雅, ゼン タンフン, 伏見 総一郎, 中井 颯馬, 矢部 孝, “太陽光励起レーザーの集光系の形状に関する研究”, 査読無, レーザー学会第 462 回研究会報告, 2014, pp.1-5
- ⑦ 大久保 友雅, “100W 級太陽光励起レーザーの開発”, 査読無, 第 81 回レーザ加工学会講演論文集, 2014, p. 203

[学会発表] (計 7 件)

- ① Tomomasa Ohkubo, “Design of New Pumping Cavity Combining Traditional Cavity and Compound Parabolic Concentrator for Solar-Pumped Laser” The 11th Japan-China International Workshop on Information Technology and Control Applications, 2016/8/3, Tokyo

University of Technology · Tokyo, Hachioji

- ② 大久保友雅, “太陽光励起レーザーのための集光系の設計・評価について”, 2016/7/15, レーザー学会第 491 回研究会, 阪急エキスポパーク・大阪府吹田市
- ③ 大久保友雅, “高効率な太陽光励起レーザーのための集光系の設計について”, 2015/7/17, レーザー学会第 476 回研究会” 日亜化学工業横浜研究所・神奈川県横浜市
- ④ 大久保友雅, “太陽光励起レーザーの紹介” 2014/10/31, レーザー学会技術専門委員会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」, 宮古島マリンターミナル・沖縄県宮古島市
- ⑤ 大久保友雅, “高出力、高効率な太陽光励起レーザーの開発”, 2014/10/28, レーザー学会第 466 回研究会, 尼崎リサーチ・インキュベーションセンター・兵庫県尼崎市
- ⑥ 大久保 友雅, ゼン タンフン, 伏見 総一郎, 中井 颯馬, 矢部 孝, “太陽光励起レーザーの集光系の形状に関する研究”, 2014/7/18, レーザー学会第 462 回研究会, 阪急エキスポパーク・大阪府吹田市
- ⑦ 大久保友雅, “100W 級の太陽光励起レーザーの開発”, 2014/5/28, 第 81 回レーザ加工学会講演会, 大阪大学・大阪府吹田市

[その他]

ホームページ等

<http://www.o-kubo.org/~lab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 友雅 (OHKUBO, Tomomasa)
東京工科大学・工学部機械工学科・講師
研究者番号: 50431995