

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560037

研究課題名(和文) 太陽光励起レーザー用Cr共ドープNd:YAGセラミックの高品質化

研究課題名(英文) Improvement of Cr:Nd:YAG ceramics for solar pumped laser

研究代表者

金邊 忠 (KANABE, Tadashi)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10201427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,400,000円、(間接経費) 1,320,000円

研究成果の概要(和文)：現在宇宙太陽光利用レーザーの地上実証用100W級システムの開発を進めている。地上実証機の開発は、従来のレーザー技術では達成できなかった20%以上の太陽光からレーザーの変換効率の太陽光励起レーザーを実現することである。宇宙太陽光利用レーザー用のレーザー媒質として選択されたCrを共ドープしたNd:YAGセラミックの散乱係数の低減と、長期的な発光安定性の確保するため、Crドープと焼結条件と散乱係数の最適化や発光劣化の機構解明を行い、高品質なCr:Nd:YAGセラミックの製造技術を確立し、その宇宙太陽光利用レーザーに適合したCr:Nd:YAGセラミック母材の開発を目的とした。

研究成果の概要(英文)：Space Solar Power Systems (SSPS) is the energy supply plants which collect solar energy and to ground by converting into the laser. This system needs broad absorption spectrum which can absorb solar energy efficiently. It excels in the heat durability. It is enlargeable. Penetration in the atmosphere of the oscillating laser is good. There is Cr/Nd:YAG ceramic in the medium that meets these requirements. The Cr/Nd:YAG ceramic can achieve the laser efficiency 20%. However, since there is luminescence by Cr when changing, a changes loss arises. It was investigated how much it would change this time. Nd, Cr-codoped transparent YAG ceramics with excellent optical properties were fabricated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：太陽光レーザー 固体レーザー Nd:YAGレーザー Cr:Nd:YAGセラミック 宇宙太陽光レーザー 太陽光励起レーザー 光エネルギー伝送 宇宙太陽光発電

1. 研究開始当初の背景

太陽光励起レーザーの利用に関する検討は、当初 1968 年に NASA から始まり、近年、欧州宇宙機関 (ESA) で提案されている。東工大矢部教授らは 2005 年程度からマグネシウム還元を目的として太陽光励起レーザーの開発を始めレーザー出力 78W、レーザー効率は 3~4% を得ている。レーザー総研・阪大では、2007 年に模擬太陽光ランプ励起アクティブミラー型増幅器でレーザー出力 180W を達成している。太陽光励起レーザーの開発は、現在いずれも数百ワットの高いレーザー出力は得られているが、レーザー効率は数% 程度で、宇宙太陽光利用システムに繋がるものは無い。また一方、Nd:YAG セラミックは、1960 年に開発され、光増幅およびレーザー発振できる Nd:YAG セラミックの開発は 1991 年 (公表は 1993 年) に池末らにより実現された。電通大植田教授らにより Nd:YAG セラミックでは散乱係数がレーザー単結晶並みの 0.1%/cm 程度の合成も可能となった。しかし、Cr:Nd:YAG セラミックに関しては散乱係数や発光特性は完全に未開拓の状態である。

2. 研究の目的

現在 JAXA (宇宙航空研究開発機構) で、2009 年 6 月に制定された宇宙基本法に基づいて、宇宙太陽光利用レーザーの地上実証用 100W 級システムの開発が精力的に進められている。地上実証機の全体構想は、従来では達成できなかった 20% 以上の太陽光からレーザーの変換効率の太陽光励起レーザーを実現することである。宇宙太陽光利用レーザー用のレーザー媒質として選択された Cr を共ドープした Cr:Nd:YAG セラミックの散乱係数の低減と、長期的な発光安定性の確保するため、Cr ドープと焼結条件と散乱係数の最適化や発光の機構解明を行い、高品質な Cr:Nd:YAG セラミックの製造技術を確立し、その宇宙太陽光利用レーザーに適合した Cr:Nd:YAG セラミック母材の開発を目的とした。

3. 研究の方法

研究の方法としては、

(1) Cr:Nd:YAG セラミックの発光機構解明

Cr 濃度-エネルギー伝達効率と伝達時間

Cr 濃度に対する量子効率依存性

(2) Cr:Nd:YAG セラミックの散乱係数の低減 (3 段階を 3 年間で順次手法を確立して改善した。)

- 散乱係数 0.5 %/cm 以下
- 散乱係数 0.3 %/cm 以下
- 散乱係数 0.1 %/cm 以下

を並行して行った。

本研究は 3 年計画で実験を計画し、(1) - と (2) - は平成 23 年度、(1) - と (2) - は 24 年度に、(2) - は 25 年度に実施した。必要な散乱係数等の設定パラメーターは宇宙太陽光レーザーの概念設計に基づいた値を目標値として設定した。

4. 研究成果

(1) Cr:Nd:YAG セラミックの発光機構解明

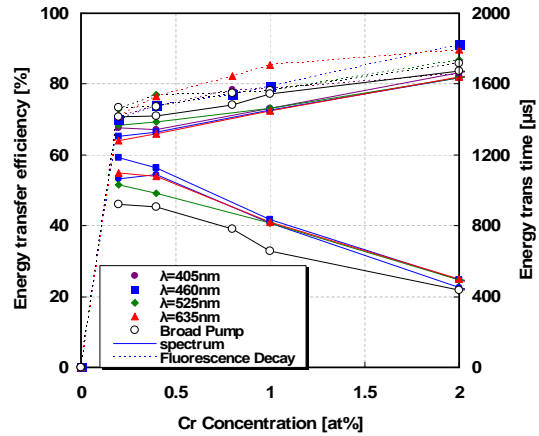


図 1. Cr 濃度-エネルギー伝達効率と伝達時間

Cr 濃度に対する蛍光スペクトルより求めたエネルギー伝達効率  $\eta_{ET}$  と時間減衰波形から求めた  $\eta_{ET}$  を図 1 に示す。Cr 濃度が増加することで Cr-Nd エネルギー伝達時間  $\tau_{ET}$  が減少しており Cr-Nd エネルギー伝達効率  $\eta_{ET}$  は増加している。これは Cr-Nd のイオン間距離が短くなったためと考えられる。Cr2.0% で 89% の高効率を測定した。さらに各励起波長による依存性は見られないことが分かった。

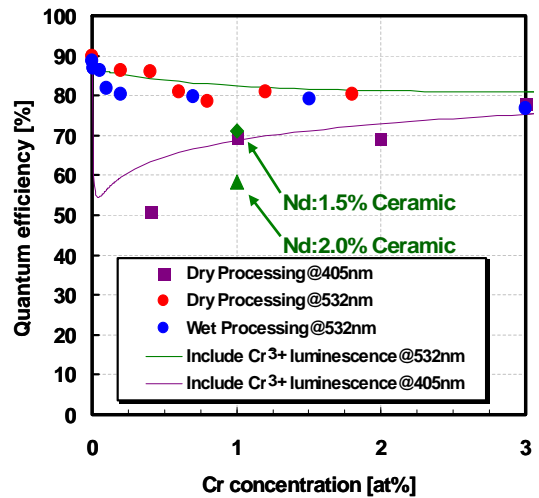


図 2. Cr 濃度に対する量子効率依存性

図 2 に励起光源波長 532nm のパルスレーザーと 405nmLED を用いた Cr 濃度に対する量子効

率依存性を示す。Nd:1.5[at%],Cr:1.0[at%]の時 $\eta_q=70.2\%$ , Nd:2.0[at%] Cr:1.0[at%]の時 $\eta_q=56.2\%$ と顕著に量子効率が落ちる。これは濃度消光によるものである。しかし, Cr濃度を増加した時は量子効率の低下は少ない。低下の主な要因として Cr 準位での輻射の影響や濃度消光が考えられる。そこで低下原因を探るべく, Cr 準位での輻射をロスとした場合の量子効率 $\eta'_q$ を式(1)で示す。

$$\eta'_q = \frac{\int E_{abs} \frac{\lambda_{abs}}{\lambda_{flu}} (A \cdot \eta_{ET} + B) d\lambda \cdot 0.88}{\int E_{abs} \frac{\lambda_{abs}}{\lambda_{flu}} d\lambda} \quad (1)$$

A,Bはそれぞれ吸収波長に対するNd吸収割合とCr吸収割合である。特に532nm励起では $\eta'_q$ は実験値と誤差2.7%となり良い一致を示した。つまりCr濃度増加による濃度消光の影響は小さい。従って量子効率のCr濃度依存性はCr準位の輻射ロスによる影響が大きく,濃度消光の影響は非常に小さいことが示された。また,励起波長依存性は非常に少ないことが分かった。

### (2) Cr:Nd:YAGセラミックの散乱係数の低減

レーザー媒質の内部損失や屈折率不均一性はレーザー発振閾値,出力などに影響を与える。レーザー媒質の損失係数をレーザーの発振波長である1064nmで測定した。測定手法は,透過率から表面反射ロスを考慮し,その減衰率を散乱ロスとしてランベルト・ベールの法則より散乱係数を求めた。

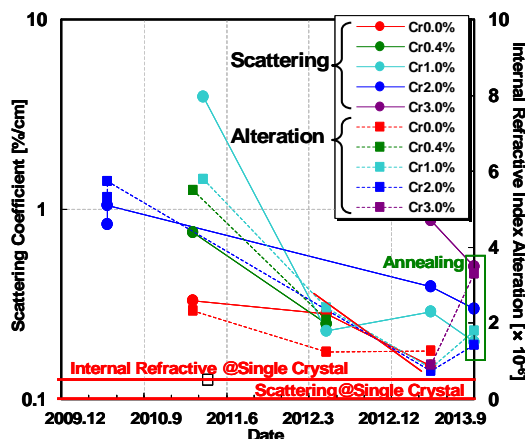


図3. 製造時期に対する散乱係数と内部屈折率不均一性の性能向上

屈折率不均一性はCr/Nd:YAGに吸収されない1064nmレーザーを用いたマッハツェンダー干渉計を構成し,媒質内部の干渉縞を観測することで屈折率不均一性を求めた。製造時

期に対する散乱係数依存性を図3に示す。従来,散乱係数はCrのドーパント濃度に伴い増加傾向があると見られていたが,媒質の製造工程時の影響が支配的であることが分かる。目標散乱係数は0.1[%/cm],目標測定精度<0.1[%/cm]であるのに対し,従来までの媒質の散乱係数は0.2~1.2[%/cm]の値をとった。しかし,製造工程の改善により散乱係数が減少しており,最新の媒質では,Nd:1.0[at%]セラミックで0.16[%/cm]の値を示した。これは従来のセラミックの中で最も良い値であり目標値に限りなく近づいている。測定精度は $\pm 5.24 \times 10^{-3}$ [%/cm]となり要求精度を満たしている。屈折率不均一性は製造工程の改善により顕著に改善している。最新の媒質ではNd:1.0[at%],Cr:1.0[at%]セラミックで $0.75 \times 10^{-6}$ の値を示した。

### (3) 今後の展望 レーザー効率

今回求めたCr-Ndのエネルギー伝達効率 $\eta_{ET}$ を用いて,より精度の高い太陽光吸収遷移効率を求めた。図4にCr濃度に対する吸収効率 $\eta_{abs}$ ,吸収遷移効率 $\eta_{abs-trans}$ , $\eta_L$ を示す。AirMass 1.5は地上での平均太陽光強度である。Cr濃度が増加するに従い各効率は増加する。また,Cr濃度1.0%以上でレーザー効率20%以上達成の見込みであることが示された。

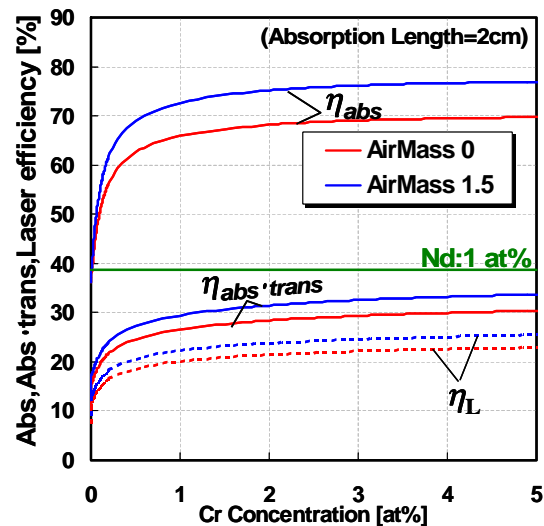


図4. Cr濃度と吸収,遷移,レーザー効率

### (4) 総合評価と結論

本研究ではCrで吸収された光がNd準位で発光するまでの光遷移過程に着目し,CrからNdへ89%と高効率で遷移することを示し,励起波長によるCr-Ndエネルギー伝達効率,量子効率の波長依存性は非常に少ないことが得られた。また,製造工程の改善により散乱係数や内部屈折率不均一性の性能向上がなされており要求値を達成しつつあることを示した。そしてCr濃度1.0%以上のCr/Nd:YAG

セラミックを用いることでレーザー効率 20%以上達成の見込みがあることを示した。

本研究では新規固体レーザー材料である Cr/Nd:YAG セラミックの特性評価を行い L-SSPS の目標値であるレーザー効率 20%以上達成の可能性を示せ、材料としての成立性を証明した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

金邊 忠

レーザーによる宇宙太陽光発電システム  
OPTRONICS、査読有 32 巻 11 号、2013、  
141-147.

〔学会発表〕(計 5 件)

永坂宗一郎、竹内裕貴、内田雅人、杉本太樹、中島岳志、吉田裕之、木皿且人、福室康行、佐々木進、仁木秀明、金邊 忠、第 74 回応用物理学会学術講演会、2013 年 9 月 19 日、同志社大学 京田辺キャンパス

内田雅人、竹内裕貴、永坂宗一郎、杉本太樹、中島岳志、鈴木拓明、吉田裕之、木皿且人、福室康行、佐々木進、金邊 忠、宇宙太陽光励起レーザーの要素開発とシミュレーションコード開発、レーザー学会研究会、2013 年 7 月 16 日、大阪千里 阪急エキスポパーク

金邊 忠、レーザー宇宙太陽光発電の可能性追究、レーザー学会年次大会：シンポジウム、2013 年 01 月 20 日、姫路商工会議所

永坂宗一郎、田邊貴之、田上竜彦、竹内裕貴、内田雅人、鈴木拓明、吉田裕之、木皿且人、福室康行、佐々木進、金邊 忠、宇宙太陽光励起レーザーのシステム要素開発と Cr/Nd:YAG セラミックの高性能化、レーザー学会研究会、2012 年 07 月 13 日、大阪千里 阪急エキスポパーク

田上竜彦、大前 清、田邊貴之、岡田翔太、永坂宗一郎、鈴木拓明、吉田裕之、森谷信一、木皿且人、谷島正信、福室康行、佐々木進、仁木秀明、金邊 忠、宇宙太陽光エネルギー利用レーザーの地上実証用システムの開発、レーザー学会研究会、2011 年 7 月 8 日、大阪千里 阪急エキスポパーク

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ:

<http://fuee.u-fukui.ac.jp/~qe1e/index.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

金邊 忠 (KANABE TADASHI)

福井大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：10201427

(2) 研究分担者 無し

(3) 連携研究者 無し