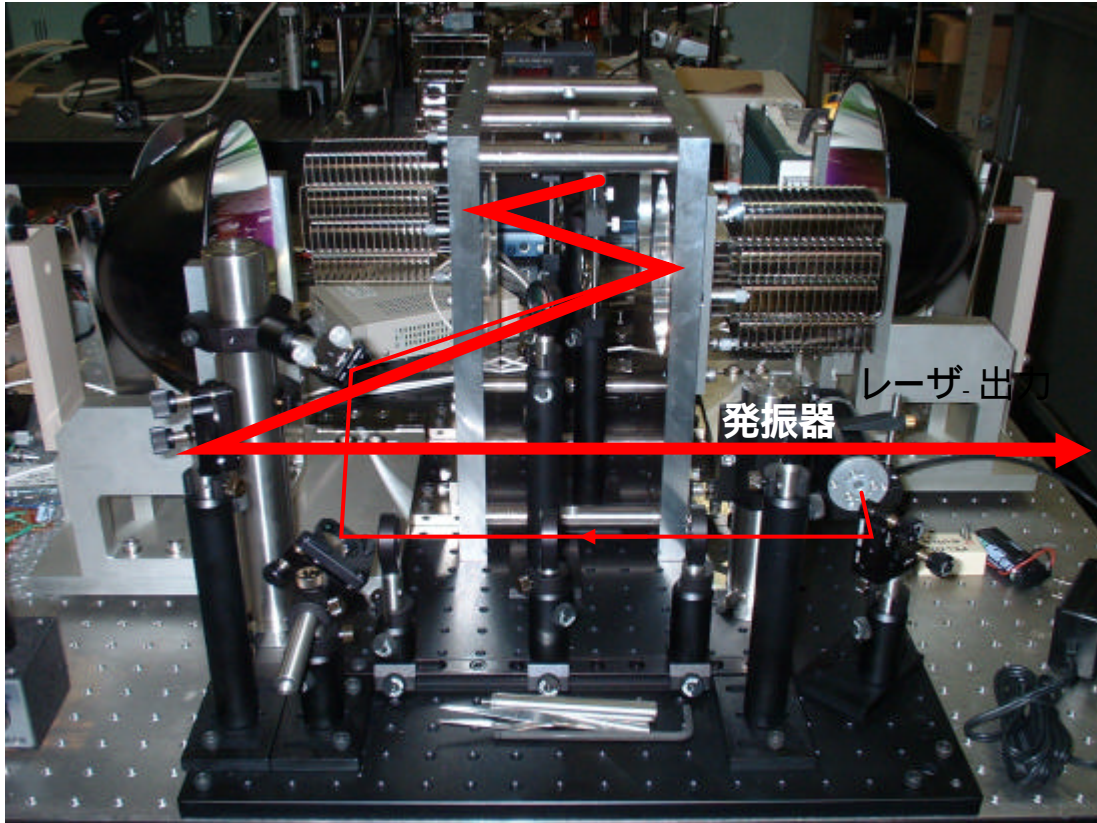


# 太陽光直接励起レーザーの開発

佐伯 拓、今崎一夫、藤岡加奈<sup>1</sup>、本越伸二、中塚正大<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究中心



高濃度 Cr ドープ Nd:YAG セラミックを用いた  
擬似太陽光励起アクティブミラーレーザー発生装置

## 研究の目的：

宇宙空間での太陽エネルギー有効利用のため、宇宙太陽光発電所（SPSS）の開発がアメリカ、ドイツ、イスラエル、日本等の各国で精力的に進められている。我々はレーザーを用いた伝送方式を検討中であり、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共に太陽光直接励起レーザーの開発を行っている。現在、3次元レイトレース法を用いた太陽光によるレーザー媒質の励起、発振の計算機シミュレーション、及び、セラミック、ファイバー等でのレーザー発振実験、レーザー媒質の温度分布計算機シミュレーション等を行っている。

**今後の応用・発展：**太陽光直接励起レーザーの高出力化（? kW）、パルス化、レーザー媒質の温度分布計測、冷却装置の開発等

**連絡先：** TEL 06-6879 -8761      FAX 06-6877-0900

E-mail [tsaiki@ile.osaka-u.ac.jp](mailto:tsaiki@ile.osaka-u.ac.jp)

# 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、本越伸二、藤岡加奈<sup>1</sup>、今崎一夫、中塚正大<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

## 1. はじめに

宇宙太陽光発電システム(SSPS)のエネルギー伝送用レーザーとして我々は各種の太陽光直接励起固体レーザーの検討と開発を現在進めている。我々は、現在までに研究を進め、実験室ではロッド型セラミックレーザーを使用した発振実験を行い、40%近い変換効率を達成した[1]。長距離ビーム伝送にはガウスビームに近い空間モードのビーム品質が必要であり、我々はビーム品質改善を目的としたレーザー増幅システムの開発を行っている。検討を重ねた結果、宇宙用太陽光励起レーザーとして、アクティブミラー増幅器を試作、増幅実験を行い、ロッド型発振器と同等の抽出効率を得た[2,3]。

一方、今回試作したアクティブミラー増幅器には高濃度 Cr ドープの Nd:YAG セラミックレーザーを用いた。Nd/Cr:YAG レーザー結晶は、従来から熱伝導率にすぐれ、誘導放出断面積の大きいレーザー材料として知られている。優れた Nd:YAG にさらに Cr<sup>3+</sup>を添加することで吸収バンドが広がり、太陽光の広帯域な発光スペクトルを吸収することを目的として、米国で 1960 年代に開発された[4]。しかし、従来の技術ではレーザー結晶の構造上、Cr のイオン半径が大きく、結晶構造に Cr<sup>3+</sup>を組み込むことが困難であり、また、大型の結晶を製作することは不可能であった。最近、レーザー結晶のセラミック化技術が注目されている。このセラミック化技術により、大型の Nd/Cr:YAG セラミックの作成が可能となった。我々のグループは Nd と Cr を共添加した散乱損失、Cr 4 価イオンの極めて少ない YAG セラミックレーザー媒質の試作と発振に世界で初めて成功した[5]。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、光学的特性はほぼ同じである。セラミックと単結晶の異なる点は、可能な各種活性イオンによ

る結晶育成時の異常な偏析低下を避けられるので濃度消光を押さえ高濃度で添加できることと、熱破壊限界が単結晶と比較して改善されたことでの報告もある。1064nm の波長では、太陽光からレーザーへ変換する場合、太陽光エネルギーを有効に活用することができる。また、晴天時の大気の透過率は 95%前後と非常に高い。Cr 3 価のイオンを添加することで、可視領域の吸収が大幅に改善される。さらに、阪大の藤岡・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 の上準位寿命が実効的に増加する効果が確認されている[6]。従来からある、GSGG、GGG、GSAG 等の Nd,Cr 共添加された結晶と比較して 2 倍程度実効誘導放出断面積が高くなる。また熱伝導率も 2 倍ほど高くなる。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り、結局、レーザー媒質が軽量化され、ペイロードの低減へとつながる。

レーザー増幅において重要なパラメータとして飽和強度が挙げられる。この飽和強度を確定するため、Cr ドープ Nd:YAG セラミックの CW レーザー増幅特性の評価を行った。

## 2. 実験装置

今回用いたアクティブミラーレーザー増幅実験装置の構成を図 1 に示す[3]。アクティブミラー 2 枚で増幅され、以下、各構成要素について以下に示す。

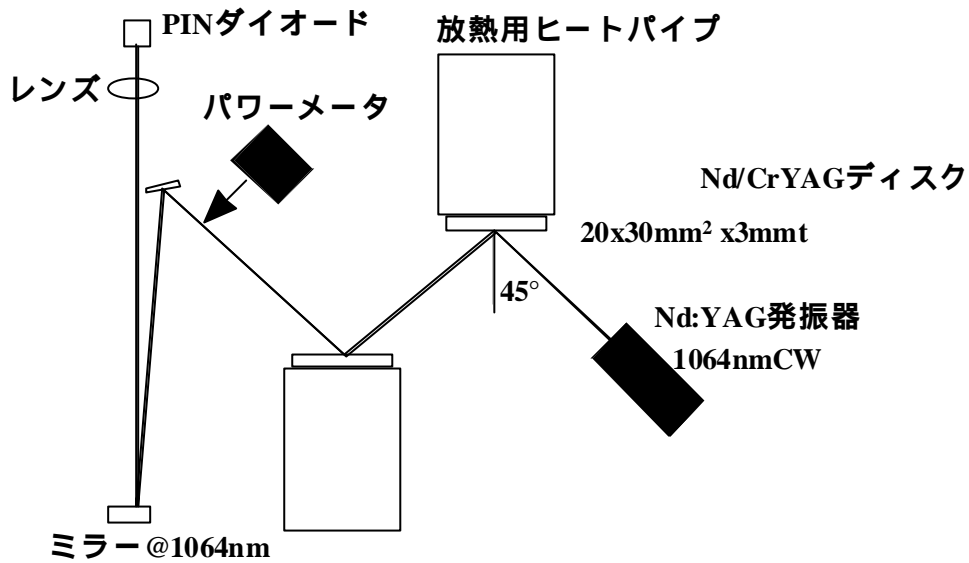


図1 アクティブミラーレーザー? 増幅実験装置

レーザーハウス本体は、アクティブミラーと放熱用ヒートシンク1対が2組配置されている。アクティブミラー増幅器にはディスク型セラミックレーザー材料が使用されている。2枚のアルミ板に1対ずつ、反転した形の配置となっており、励起光は左右の反対側から照射入力される。アルミ平面の板の間隔は15cmであり、アクティブミラー増幅器の間隔は13cmである。集光ミラーのサイズの制限のためにこの長さとなり短縮できなかったが、太陽光を光源とする場合は制限がないため、さらなるアクティブミラーの近接配置が可能である。

ランプ光源として、アークメタルハライドランプ、電気入力1.2kWを用いている。ランプ光の出力スペクトルを図2に示す。電気から光への発光効率、連続発光であるため、60%程度と高い。総出力光パワーは600Wと見積もられるが、一部ミラーに当たらない成分と反射鏡でスペクトル的にカットされる部分があるため、前方で集光される光パワーは400W程度である。ランプ光出力スペクトルの色温度は太陽光に近く、アークランプの効率

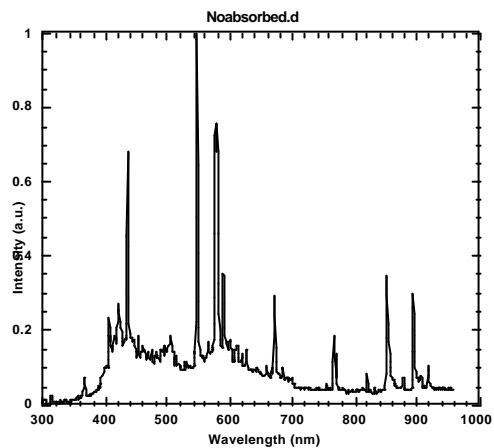


図2 ランプ光出力スペクトル

は他のランプと比較して効率が高いため今回用いた。

ランプ光源から出た光は出力光スペクトルを太陽光に近づけるため紫外線と赤外線領域を低減させるフィルタリング機能を持つ放物面ミラーで前方へ反射され、ディスク表面上に集光される。ランプ光の集光パワー密度を高めるため、2次集光レンズをさらに配置している。励起入力光は左右から互い違いにディスクへ入

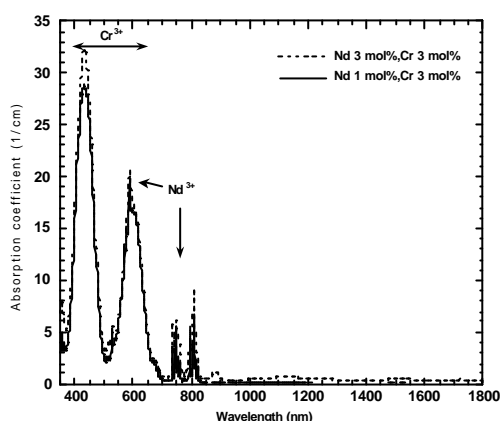


図3 Nd/Cr:YAG セラミックの吸収スペクトル

力されるディスク型レーザーの構造について述べる。レーザー媒質として、太陽光の広帯域スペクトルを吸収可能なディスク型高濃度 Nd/Cr:YAG セラミックレーザーを用いた。今回、実際に使用する Nd/Cr:YAG セラミックの吸収スペクトルを図3に示す。透過率は分光光度計により計測されたデータを元に吸収係数を求めた。吸収スペクトルは、300-1800 nmまで計測された。セラミック試料に添加されたイオン濃度は、Nd が 1mol%、Cr が 3mol%であり、また、もう一枚の方は、Nd が 3mol%、Cr が 3mol%であった。ともに、可視領域で 450nm、600nm で Cr<sup>3+</sup> による吸収が増加していることが分かる。ただし、Nd が 3mol%の高濃度添加のセラミックでは、Cr<sup>3+</sup> と考えられる吸収が 1060nm 付近に観測された。高濃度ドープ時に Cr の価数制御が完全でないと思われる。この吸収はレーザー発振波長にかかっているため、レーザー発振波長で損失となる。Cr イオンのクラスター化による散乱の増加が観測されている。しかし、今回の材料は厚みが 2mm と薄いため顕著な散乱効果は観測されなかった。吸収スペクトルから分かるように励起ランプ光はNdではなく大部分はCrにより吸収されることがわかる。ただし、850nm 付近の吸収係数は計測器の影響で正確な値は得られていない。今回、レーザー発振波長の損失の少ない Nd1mol%、Cr3mol%のイオン濃度の YAG セラミックをレーザー材料として用いられた。

このディスクは銅板のホルダーにセットされ、放熱の

ためのヒートパイプに直接張り付けられている。ディスク形状は、直径が 9.5mm の円形である。厚みは、3%高濃度 Cr ドープの吸収効率を考慮した結果 2mm に決定された。励起光の吸収率はスペクトル全体に対して 60%と見積もられる。アクティブミラー方式のため、ヒートパイプと接している面はレーザー波長に対して高反射である誘電体多層コートが施されている。その上にアルミコートを施し、入射された励起光を再度レーザー媒質に吸収させる。ヒートパイプとディスクの間には熱伝導ペースト塗布が施されている。励起光の吸収長は実質 4mm となる。ディスクの入射面には 1064nm での反射防止膜蒸着が施されている。レーザー光はディスク面垂直方向に対して 45° で入射される。

この試作器に対するレーザー発振器の光源として、Nd:YAG レーザーを使用した。発振波長は基本波の 1064.1nm であり、Nd/Cr:YAG セラミックの蛍光中心波長とほぼ一致している。レーザー出力の空間モードは TEM<sub>00</sub> のガウスモードである。

### 3. 実験結果

この増幅実験では入力ビームの直径は 8mm であった。アクティブミラーは 2 台励起で運転を行った。レーザービームは、セラミックの中心を通過させた。ビーム直径が大きいため、レーザー強度の飽和は基本的に生じなかった。

レーザー小信号利得と出力パワー計測を行った。その結果を図4に示す。前回、 $f = 10\text{cm}$  の焦点距離のレンズを用いて集光を行った結果、レーザーの利得は、Nd1%Cr0.1%の場合、1.95、であり、単焦点レンズ  $f=3.5\text{cm}$  の場合は、レーザー利得が 2.5 まで改善された。 $f = 3.5\text{cm}$  のレンズと  $f=10\text{cm}$  のレンズを用いた場合では、レーザー小信号利得が 3.4 まで改善された。Nd1%Cr3%の場合、2.5、であり、単焦点レンズ  $f=3.5\text{cm}$  の場合は、レーザー利得が 3.6 まで改善された。 $f=3.5\text{cm}$  のレンズと  $f=10\text{cm}$  のレンズを用いた場合では、レーザー小信号利得が 4.4 まで改善された。レーザー出力は、Nd1%Cr0.1%の場合最大で、2 W、Nd1%Cr0.1%の場合最大

で 2.5W が得られた。図 5 にランプ光密度入力パワーに対するレーザー小信号利得とレーザー小信号利得係数の計算結果を示す。計測されたレーザー小信号利得と利得係数を示す。励起パワー密度は計測の結果励起入力パワー密度は  $40\text{W}/\text{cm}^2$  であった。励起パワー密度に対して指数関数のようにのびているように見えるが、ASE により、蓄積エネルギーの損失が大きくなり、一番の高励起密度の場合は、レーザー利得が指数関数に乗らず減衰している。Cr 濃度の高いほど励起吸収量は多くなるが、ASE による利得の低下も顕著となる。

レーザー小信号利得は、蓄積エネルギー密度に比例する、アクティブミラー 1 枚で、0.8 が得られた。線形に励起密度に対してのびている。

次に、レーザーの飽和増幅実験を行うため、細いビーム出力の Nd:YAG レーザーで実験をおこなった。入力ビームの直径は、1mm であった。アクティブミラーは 2 台励起で運転を行った。レーザービームは、セラミックの中心を通過させた。レーザー強度の飽和が観測された。

図 6 に実験により得られたレーザー入出力特性を示す。飽和パワーは  $100\text{W}/\text{cm}^2$  と置き [7]、Frantz-Nodvik の式を用いてレーザー出力計算を行った [8]。入力パワーが 0.1W の時レーザー出力パワーの飽和が開始するのがわかる。レーザーの利得が飽和せずに大きくなっているのは、ディスク内部で ASE が反転分布を部分的に消化しているのが解消されたためと考えられる。励起入力パワーが大きくなり、小信号利得が大きくなるとその傾向が一段と強くなる。レーザー利得が 1.9 の場合は、レーザー出力が飽和し、利得 1.9 の飽和曲線に乗る。計算ではビーム直径を 1mm として計算を行った。実験結果と計算結果が程よい一致を示した。図 7 に Cr 3% の高濃度の場合の実験により得られたレーザー入出力特性を示す。飽和パワーは  $80\text{W}/\text{cm}^2$  と置いて計算を行った。

レーザー小信号利得が 2.5 の時、ビーム直径を 1.5mm、利得が 4.4 の時は直径が熱レンズの凹レンズが生じてビーム直径が大きくなり、計算から外れている。これは、熱レンズによる影響であると考えられる。3% の高濃度の場合、レーザー入力パワーが 0.2W までの場合は、良い一

致を示すが、レーザー利得が 4.4 倍のときは、熱レンズ効果等でビーム直径が広がり、飽和が生じなくなると考えられる。ビーム直径は、励起密度が大きくなるほど熱レンズの凹面効果により 1.0mm-1.5mm-3mm と変化したと考えられる。

現時点ではディスクの温度は 100 以下であると考えられるが、飽和パワーの上昇はほとんど観測されなかった。これらの実験結果からは、正確に Cr 濃度による飽和強度の違いは特定できない。

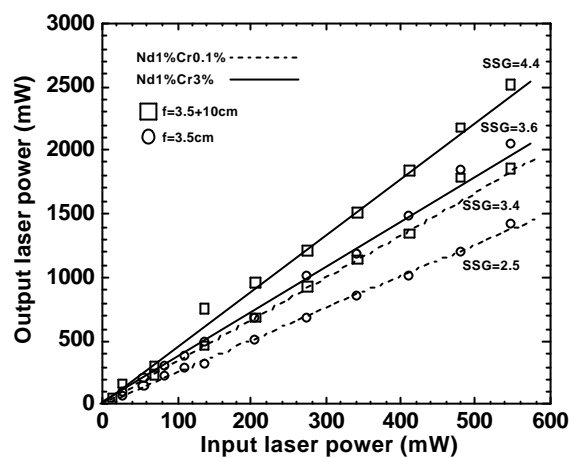


図 4 1パス1アンプレーザー増幅特性

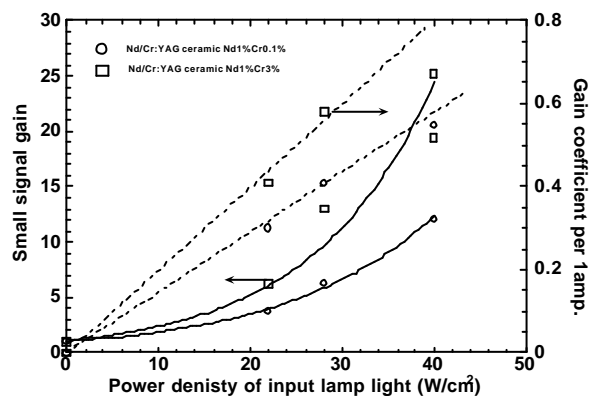


図 5 ランプ光励起密度に対するレーザー小信号利得

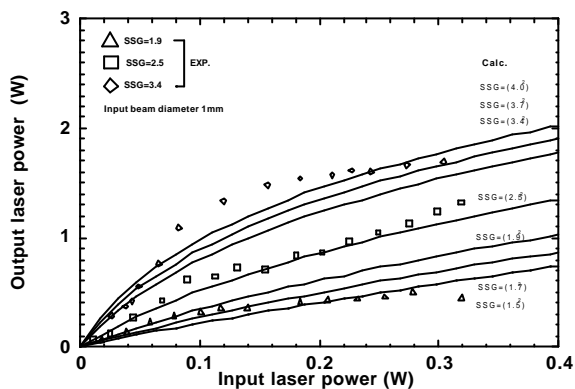


図6 レーザー入出力計測結果 点は実験結果、実線は計算結果を示す。

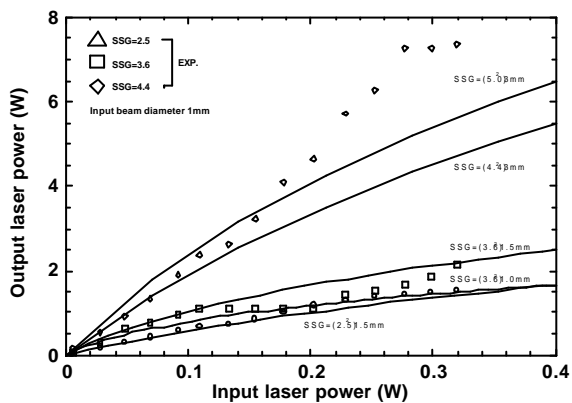


図7 レーザー入出力計測結果、点は実験結果、実線は計算結果を示す。

#### 4. まとめ

今回、アークランプでCrドープNd:YAGセラミックアクティブミラーのCWレーザー増幅実験を行い、Nd/Cr:YAGセラミックの理論式から導出した飽和パワーを用いた増幅計算結果と実験で得られた飽和増幅実験の結果がほぼ一致した。

本研究は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の委託研究(コントラクト番号: JX-PSPC-20243)として行われた。

#### 参考文献

[1] T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, H. Fujita, M. Nakatsuka and C. Yamanaka, "Nd/Cr:YAG Ceramic Rod Laser pumped by arc-metal-halide-lamp", Jpn.

J. Appl. Phys., 46 (2007) pp156-160.

[2] 佐伯拓、今崎一夫、本越伸二、内田成明、藤田尚徳、中塚正大、井澤靖和、山中千代衛, "Nd/Cr:YAGセラミックを用いたアクティブミラー増幅器のCWレーザー増幅特性", 第53回応用物理学関係連合講演会, 武蔵工業大学, 2006年3月.

[3] 佐伯拓、今崎一夫、本越伸二、内田成明、藤田尚徳、中塚正大、井澤靖和、山中千代衛, "擬似太陽光励起固体レーザーの開発", レーザー学会第349回研究会 日本・千里中央 千里クラブ, 2006年7月14日

[4] Z. J. Kiss and R. C. Duncan; Appl. Phys. Lett. 5 (1964) 200.

[5] T. Saiki, K. Imasaki, S. Motokoshi, and C. Yamanaka, H. Fujita, M. Nakatsuka, and Y. Izawa, "Disk-type Nd/Cr:YAG ceramic lasers pumped by arc-metal-halide-lamp", Optics Communications, 268 (2006) 155-159.

[6] M. Nakatsuka, K. Fujioka, H. Yoshida and H. Fujita; J. Korean Phys. Soc. 43, 607-615 (2003).

[7] 佐伯拓、本越伸二、今崎一夫、藤田尚徳、中塚正大、井澤靖和、山中千代衛, "擬似太陽光励起G&U\*セラミックアクティブミラーレーザーの開発", レーザー学会学術講演会第27回年次大会, 宮崎市フェニックスシーガイアリゾート, 2006年1月28日

[8] L.M.Frantz and J.S. Nodvik, J. Appl.Phys.34. (1963) 2346.