

無集光で発振する太陽光励起ファイバーレーザー

遠藤 雅 守

Solar-Pumped Fiber Laser without a Concentration of Sunlight

Masamori ENDO

We have proposed a solar-pumped fiber laser combined with “greenhouse chamber”. The chamber contains liquid sensitizer in which an active fiber is immersed. Its front window is dichroic so that the visible spectrum is transmitted while near infrared is reflected. The incident sunlight is absorbed by the sensitizer, is converted to the absorption band of the Nd^{3+} , and it is confined by the multiple reflections. Theoretical investigation shows that laser oscillation without concentrating the sunlight is feasible. An apparatus with mild concentrating optics has been build and a small signal gain of 2.1%/pass is observed.

Key words: solar pumped laser, fiber laser, neodymium laser

化石燃料の枯渇と地球温暖化の危機が叫ばれる現在、無尽蔵の太陽エネルギー活用がますます注目されるようになってきた。なかでもユニークなのが太陽光励起レーザーである。太陽光励起レーザーの歴史は意外に古く、1966年にはすでに発振の報告がある。日本では、今世紀に入ってから複数の研究機関が太陽光励起レーザーをエネルギー分野で活用するべく活発な研究を行っている¹⁻³⁾。

太陽光励起レーザーの実用化に立ちはだかる困難のひとつが、励起光源を選べないという特殊な事情である。太陽光は白色光であり、かつ地球軌道上でのパワー密度はレーザー媒質の励起には全く不足である。そこで太陽光励起レーザーは、例外なくどれも太陽光を10,000倍程度に集光し、その焦点にレーザー媒質を置く。したがって集光光学系は大型で、高い集光倍率が要求され、かつ太陽を高精度に追尾する必要がある。これは、装置が大型化するにつれ困難になっていく。

本研究は、この問題に対する解答のひとつとして、Ndドープアクティブファイバーをレーザー媒質に用い、「集光せずに発振する太陽光励起レーザーは可能か」という課題に挑むものである。本研究の源流は電気通信大学の植田の構想まで遡る⁴⁾。発想は、 Nd^{3+} レーザーは純粋な四準位で逆転分布閾値が事実上存在しないため、光ファイバーの

超低損失を利点として、極端に長い媒質長を確保すれば光共振器の損失を上回る利得を得られるだろう、というものである。

その後の計算で、単純に太陽光を当てただけでは利得がファイバーの固有損失を超えられないことが判明する。しかし、電通大グループの Bisson はこの問題を克服するため、“greenhouse chamber”を組み合わせたアイデアを発表した⁵⁾。本研究は、そのアイデアを具現化するべく、筆者と Bisson が共同で始めたものである。

1. 増感型太陽光励起ファイバーレーザー

図1は、greenhouse chamber と増感剤を組み合わせた太陽光励起ファイバーレーザーの概念図である。レーザー媒質はNdドープガラスファイバーで、これを液体の増感剤に浸漬して平板状のチャンバーに封入する。増感剤は可視光を吸収、808 nm 帯で蛍光する色素などを利用する。チャンバーの上面窓は可視光を全透過、近赤外を全反射するダイクロイック窓で、残りの壁面は高反射鏡で構成されている。太陽光は上面の窓から入射し、増感剤は太陽光の大部分を占める可視光の光子を Nd^{3+} の吸収帯である 808 nm に変換する。近赤外の光子は多重反射で閉じ込められるため、ファイバーとの効率のよい結合が確保さ

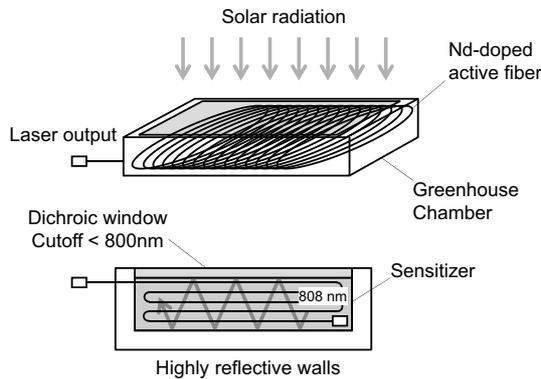


図1 “Greenhouse chamber” と増感型太陽光励起ファイバーレーザーの概念図。

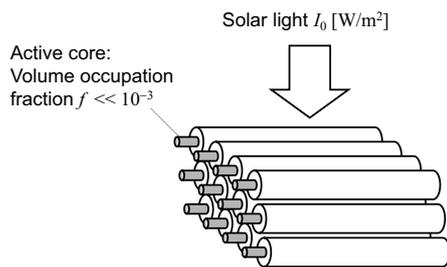


図2 側面から励起されるアクティブファイバー束の概念図。

れる。この作用があたかも地球温暖化の原因である「温室効果」に似ていることが命名の由来である。ファイバー側からみれば、これは吸収帯の光子が自然の太陽光に比べて何百倍にも増大されたのと同じ効果を生む。レーザー媒質長は数十 m もの長さにすることが容易で、片道当たりの十分な利得が確保され、レーザー発振が達成される。

2. 理 論

図2のように、アクティブファイバーの束が側面から太陽光で励起されている状態を考える。Nd³⁺のような純粋な四準位レーザーの場合、小信号利得係数 γ_0 は以下の式で表される。

$$\gamma_0 = \frac{\eta_Q \eta_s}{I_s} P_{ab} \quad (1)$$

ここで η_Q は量子効率、 η_s はストークス効率、 I_s は飽和強度、 P_{ab} は単位体積当たり吸収されたパワーである。一方、 P_{ab} は以下の式で表される。

$$P_{ab} = \eta_a I_0 \alpha_p \quad (2)$$

ここで η_a は太陽光のスペクトルのうち Nd³⁺ 吸収帯に合致する割合、 I_0 は太陽光強度、 α_p はコアの吸収係数である。ここから、air mass zero (AM0) の太陽光がドープ濃度 0.5 wt% のファイバーを照射した場合の小信号利得を計算すると、 $\gamma_0 = 0.13$ dB/km を得る。典型的なアクティブ

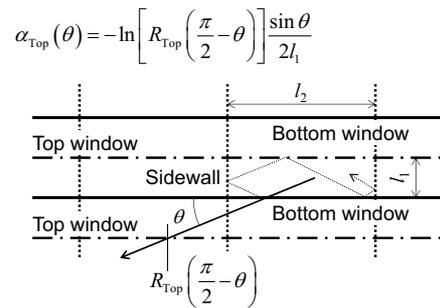


図3 多重反射による光子濃度増大の見積もり。多重反射を格子状スクリーンの通過でモデル化、損失係数 α [m⁻¹] に換算する。

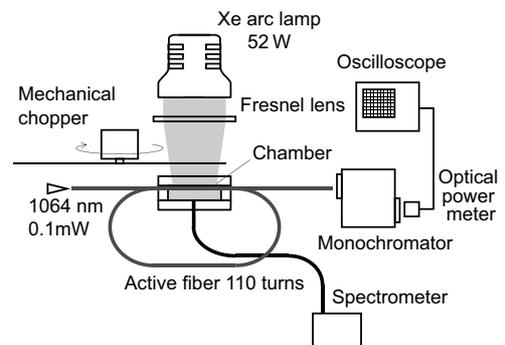


図4 疑似太陽光による予備実験の装置概念図。

ファイバーの損失係数は 10 dB/km であるから、利得は 2 桁足りないことがわかる。

ここで、greenhouse chamber と増感によるスペクトル圧縮を組み合わせ、808 nm 帯の光子濃度を 300 倍に濃縮したとすると、利得係数は 40 dB/km となり、利得が損失を十分上回る。300 倍の濃縮をどのように達成するかというと、太陽光の可視光成分を 808 nm 帯に圧縮することで、量子欠損や不完全な蛍光効率を考慮しても 5 倍の濃縮が期待できる。あと 60 倍は、greenhouse chamber の多重反射で稼ぐ。

図3は、4面を反射鏡で囲まれた直方体で光線が多重反射する系のモデルである。各面に、実在の誘電体多層膜反射鏡の反射係数 $R(\theta)$ を代入し、数値計算により光子濃度の増倍率を計算したところ、60 倍は容易に達成できることを確認した。以上の計算の詳しい過程については文献⁶⁾を参照されたい。

3. 疑似太陽光による利得計測試験

提案したコンセプトの成立性をみるため、Xe ランプを疑似太陽光とした増幅試験を実施した。実験装置を図4に示す。Nd³⁺ を 0.5 wt% でドープしたファイバーは一部だけがチャンバーを貫通していて、アクティブ長は合計 4.8 m である。AM0 太陽光換算で 20 倍強度の Xe ランプをチャンバーに照射した。発熱を避けるためデューティー比 3.6%

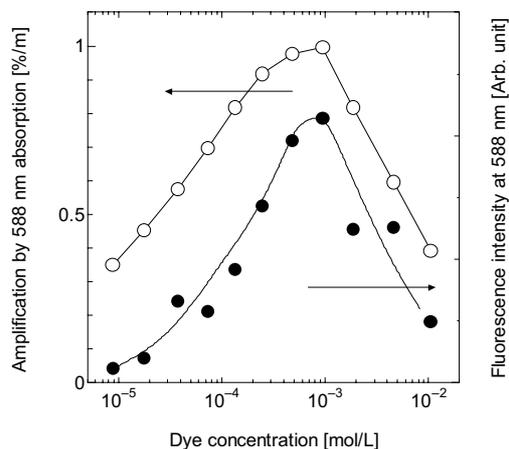


図5 色素濃度と観測された小信号利得係数および588 nm 蛍光強度の関係。

の機械式チョッパーを使用している。

可視光を吸収し、808 nm 帯で蛍光する増感剤を有機・無機を問わず探索、10種類以上のものを実際に試したが、蛍光効率が10~20%と低く、実用的なものが見つからなかった。一方、Nd³⁺は588 nm 帯にも吸収があり、蛍光効率が80%ときわめて高いrhodamine6Gが増感剤として使用可能である。やむなく本研究ではrhodamine6Gを使用して実験を行った。

色素濃度を変え、小信号利得を観測した結果を図5に示す。左軸は小信号利得係数、右軸はチャンバー底面から観測した588 nmの蛍光強度である。高濃度側で蛍光強度が減少しているのは色素の吸収によるもので、低濃度側で蛍光強度が減少しているのは入射光が一往復で完全に吸収されないためである。色素濃度10⁻³ mol/Lで最大の利得係数値1.0×10⁻² m⁻¹ (43 dB/km)を得た。

Greenhouse chamberの効果をみるため増感なしで増幅試験を行い、比較結果から588 nm帯の光子濃度増倍率は4.1とわかった。これは、目標の60倍という値から比べると相当に低い。おもな理由はチャンバーの設計仕様の問題と、図5でみられたように色素溶液の蛍光波長帯における吸収である。

4. レーザー発振試験装置の開発

これまでの実験ではまだ、理論計算で目標としたスペクトル圧縮5倍、チャンバーによる増幅60倍はみえていない。一方、太陽光をある程度集光すれば、現在の性能でもレーザー発振は可能であろう。そこで、レーザー発振を実証するための装置を開発した。装置全景を図6に示す。ファイバーは全長50 mで、Oリング溝様のチャンバーに納められている。ダイクロイック窓は四辺の直線部で、ア

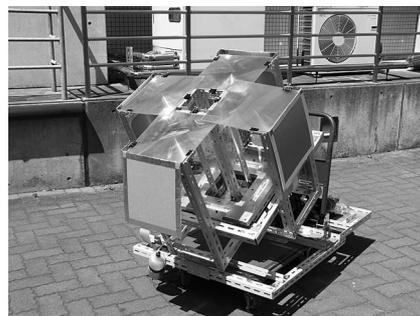


図6 レーザー発振試験装置全景。

クティブ長は計27 mである。300 mm 平方の樹脂フレネルレンズを2枚組み合わせ、5 mm×150 mmの集光スポットを得る。レンズの透過損失が64%と大きいため、実効的な集光倍率は43倍となる。実験はまだ始まったばかりでレーザー発振は観測されていないが、片道あたり2.1%の小信号利得が観測された。

増感剤とgreenhouse chamberを利用して、無集光で発振する太陽光励起ファイバーレーザーを提案した。増感剤によるスペクトル圧縮5倍とチャンバーによる光子濃度60倍増幅で目的は達成される。予備実験の結果は理論計算とよく一致したが、現状では増倍率は目標に届いていない。それでも、数十倍の弱い集光でレーザー発振が可能であることがわかったので、アクティブ長27 mのレーザー装置を試作した。初期の実験で片道あたり2.1%の正利得を観測し、現在も実験を継続中である。

本研究は科学研究費(21560045)の助成を受けたものである。ファイバー提供元の電気通信大学レーザー新世代研究センターに謝意を表す。

文 献

- 1) T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, H. Fujita, M. Nakatsuka and C. Yamanaka: "Nd/Cr: YAG ceramic rod laser pumped using arc-metal-halide-lamp," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) 156-160.
- 2) M. Mori, H. Kagawa and Y. Saito: "Summary of studies on space solar power systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)," *Acta Astronaut.*, **59** (2006) 132-138.
- 3) D. G. Rowe: "Solar-powered lasers," *Nat. Photonics*, **4** (2010) 64-65.
- 4) K. Ueda and A. Liu: "Future of high-power fiber lasers," *Laser Phys.*, **8** (1998) 774-781.
- 5) J-F. Bisson and K. Ueda: "Efficient pumping of optically thin materials," *4th Asian Pacific Laser Symposium (APLS 2004)*, TuE-B4 (2004).
- 6) M. Endo and J-F. Bisson: "Positive gain observation in a Nd-doped active fiber pumped by low-concentrated solar-like xenon lamp," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **51** (2012) 022701.

(2013年5月1日受理)