

太陽光誘起による光ファイバからのレーザー発振

1) (株)豊田中央研究所, 2) 豊田工業大学

水野 真太郎, 長谷川 和男, 伊藤 博¹⁾, 鈴木 健伸, 大石 泰丈²⁾

Sunlight-induced laser oscillation from an optical fiber

S. Mizuno, K. Hasegawa, H. Ito¹⁾, T. Suzuki and Y. Ohishi²⁾

¹⁾Toyota Central R&D Labs., inc. ²⁾Toyota Technological Institute

1. はじめに

太陽光励起レーザーの歴史は古く、1963年に初めて発振した^[1]。半世紀後の今日、太陽光励起レーザーは太陽光エネルギー高度利用の一つの形態になりうると再度注目され、様々な応用を見据えた研究が始まっている^[2-5]。太陽光励起レーザーは励起源に太陽光を使用し、「良質なエネルギー源」になる可能性を秘めている。しかし、レーザー発振に至っているが、低いレーザー効率、レーザー媒質の冷却、低いレーザービーム品質など課題がある。

まず、ここでの我々の太陽光励起レーザーの定義をしておきたい。(1)一次エネルギー源が太陽光、(2)太陽光で直接レーザー媒質を励起、(3)最終出力がレーザー光である。基本的な構成要素は、太陽光集光系、レーザー構造、レーザー媒質である。本稿ではレーザー構造とレーザー媒質の検討について詳しく述べ、結果をもとに構築した太陽光励起ファイバレーザーの発振特性について紹介する。

2. 太陽光励起レーザー構造の検討

我々は光ファイバ型の太陽光励起レーザーに着目した。太陽光はレーザーの励起光としてはパワー密度が低く (100 mW/cm^2)、太陽光集光比には限界が存在するため、いかに効率よく励起できる構造にするかが課題である。ファイバ型レーザーには以下の特徴が挙げられる。(1)ガラスの高い透明性、励起光を閉じ込める導波路構造、長い相互作用長、および信号光と利得媒質の高いモード整合効率を利用し、高効率な励起が可能、(2)クラッドを二重に設け内部クラッド部分に太陽光を導入・伝搬させ、コアで徐々に吸収させるダブルクラッド構造を用いることが可能 (これは光の輝度圧縮となり、集光系の制約条件を緩和する)、(3)比表面積が大きいため冷却性能に優れる (従来の太陽光励起レーザーは強制冷却が必須)、(4)レーザー媒質からのエネルギー引き出し効率が高い。以上のような特徴から太陽光励起レーザー構造には、ファイバ型が適していると考えた。

3. レーザー媒質の検討

AirMass 1.5の太陽光スペクトルを考慮して、特定の波長に変換するときのエネルギー変換効率を考えた場合、波長約 1100 nm で最大

の変換効率が得られる。Nd³⁺を添加したレーザーはそれに近い1060 nm付近で発振実績があり、また低しきい値化に有利な4準位系レーザーであることから、Nd³⁺イオンは太陽光励起レーザーの有望な活性イオンと考えた。Ndを添加したガラス材料は核融合用レーザーやファイバレーザーとして応用されてきたが、励起源に半導体レーザーやランプなどの高輝度光源が用いられており、広帯域で低パワー密度の太陽光の場合のガラス材料検討は少ない。我々は様々なNd添加ガラスに対し、吸収断面積、蛍光断面積、蛍光寿命、Judd-Ofelt解析、レーザーや太陽光を励起源とした発光量子効率などの評価を行い、太陽光励起レーザー媒質としてのポテンシャルを調査した。特にファイバ化が可能なホストガラスとしてポロシリケートガラス、テルライトガラス、フッ化物ガラスについて検討した。本報では、我々が評価した範囲内で最も優れた特性を示したNd添加フッ化物(ZBLAN)ガラスについて述べる。

4. 発光量子効率

太陽光下でのガラスの光学特性を明らかにするために、太陽や各種光源を励起光源にできる発光量子効率測定装置を構築した(図1)。太

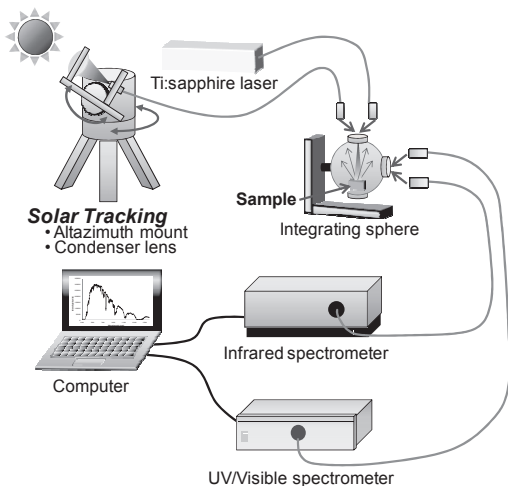


図1 積分球を用いた太陽光照射下の量子効率測定装置

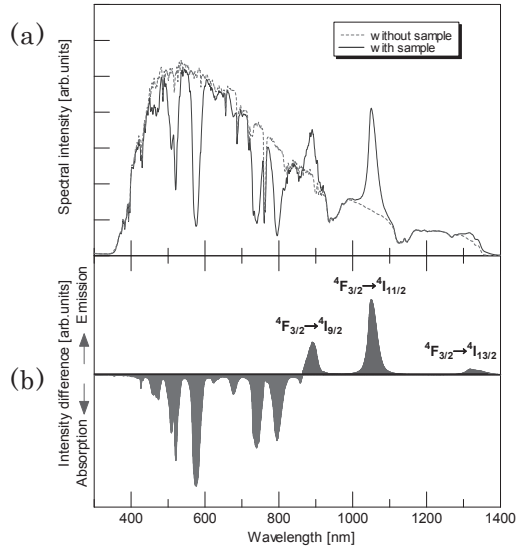


図2 太陽光照射時に(a)0.5 molのNdF₃添加ZBLANガラスを積分球内に置いた場合と置いてない場合のスペクトル、(b)差スペクトル

陽を経緯台で追尾し、レンズで太陽光を光ファイバへ取り込んだ。太陽光を積分球内へ導き試料に照射した。吸収・発光スペクトルは測定波長帯域の異なる2台のマルチチャンネル分光光度計で測定した。量子効率の導出方法は文献^[6]に示した。

図2に太陽光照射時に0.5 mol.%のNdF₃添加ZBLANガラスを積分球内に置いた場合と置いてない場合のスペクトル(a)、およびそれらの差スペクトル(b)を示す。約850 nm以下の可視・近赤域にはNdイオンに起因する離散的な吸収、約890 nm, 1050 nm, 1300 nmには⁴F_{3/2}を始準位とする発光が確認された。

図3に上記装置を用いて測定したNdF₃添加ZBLANガラスの各種発光量子効率を示す^[7]。太陽光(η_{ns})とTi:Al₂O₃レーザー(973 nm)(η_{973})を励起光としている。また、Ti:Al₂O₃レーザー励起で実測した発光寿命とJudd-Ofelt解析の結果を用いて算出した輻射遷移量子効率(η_r)も示してある。 η_r はx=0.5 mol.%以下で誤差の範囲内で100%であり、非輻射緩和の影響は小さいことを示している。一般的に酸化物ガラスよりも低いフォノンエネルギーを持つフ

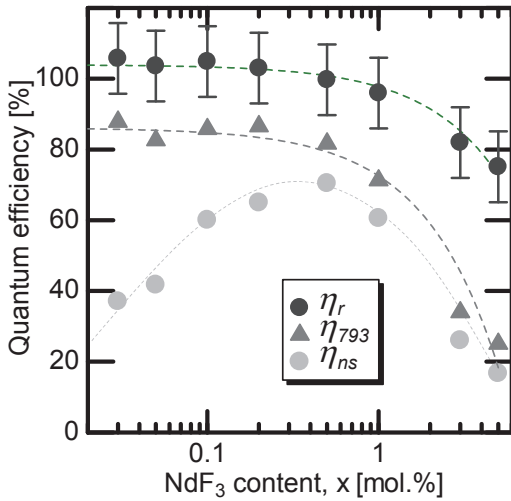


図3 Nd添加ガラスの太陽光照射下の発光量子効率のNdF₃添加量依存性

フッ化物ガラスは、非輻射緩和確率が小さいことが知られている。x ≥ 3% では濃度消光による減少がみられた。η₇₉₃ は最大で88%で、Czochralski法で合成したNd³⁺:YAG結晶を波長514.5 nmで励起した場合に得られた量子効率90%と同等である^[8]。η_{ns} はx = 0.5 mol.%で最大を示し70%であった。しかしη_r、η₇₉₃とは異なり、低x領域で減少する傾向が見られた。これは低い添加領域では、発光に寄与しないホストガラス吸収の割合が増加し、量子効率の低下を起こしていると考えられる。ここではデータを示さないが、テルライトガラスの場合、太陽光波長域でホストガラスの吸収が大きく、η_{ns}の低下が顕著であった^[9]。

これまでの検討から、太陽光励起レーザー媒質には、ファイバ化が可能な熱的安定性を有し、可視域に大きな吸収がなく、低フォノンエネルギーで発光効率の高いガラスであることが重要であることが明らかとなった。フッ化物ガラスは、そのような観点から太陽光励起ファイバレーザー用媒質として有望な候補である。我々はNd添加ZBLANガラスを用いて光ファイバを試作し、自然太陽光を用いてレーザー発振を試みた。

3. 太陽光励起ファイバレーザーの発振特性

図4に太陽光励起ファイバレーザー発振実験の概略図を示す^[10]。太陽光の集光光学素子には高い集光倍率が比較的容易に達成でき、色収差がない軸外し放物面鏡を採用した。今回用いた軸外し放物面鏡で達成される集光倍率は約10000倍集光された太陽光はファイバ端面に入射される。試作したNd添加ZBLANファイバはダブルクラッド構造で、コア径はシングルモード設計で5μm、第1クラッド径が125μm、ファイバ長が7.5mである。ファイバ両端に設置された共振器ミラーの反射率は、波長1050 nmにおいて98%である。これらのシンプルな光学系を経緯台に設置し太陽を追走させた。

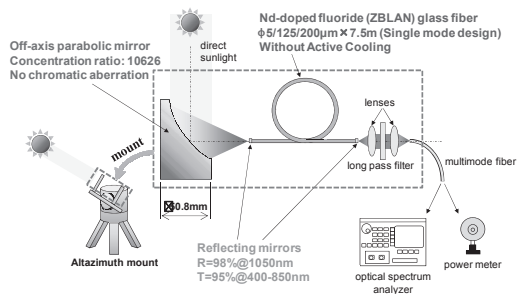


図4 太陽光励起ファイバレーザー発振実験の概略図

実験は青空に時折積雲が通過する空のもとで行った。Nd添加ZBLANファイバ透過前後のスペクトルを図5に示す。ZBLANファイバ入射直前の直達日射太陽光スペクトルはBirdモデルによって算出した^[11]。ファイバ透過後のスペクトルに1050 nm付近に強いレーザー発振線が確認された。350 nm-950 nmにはNdイオンの4f電子遷移に基づく吸収線が見られ、複数の波長帯では太陽光が吸収されきった。一方、約410-510 nm、590 nm-725 nm付近では透過光があり、今後、これらの波長帯をカバーできる増感剤の開発が期待される。スペクトルアナライザーは約1秒程度でスペクトル測定を終えるが、図6に示すように毎回測定毎に発振

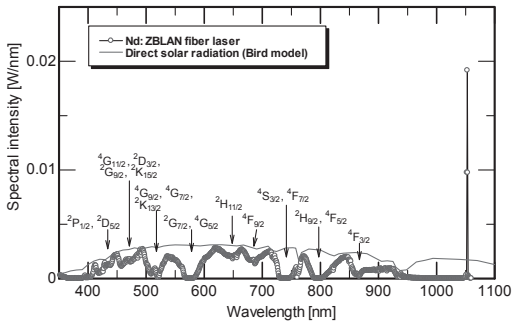


図5 透過前後の太陽光スペクトル

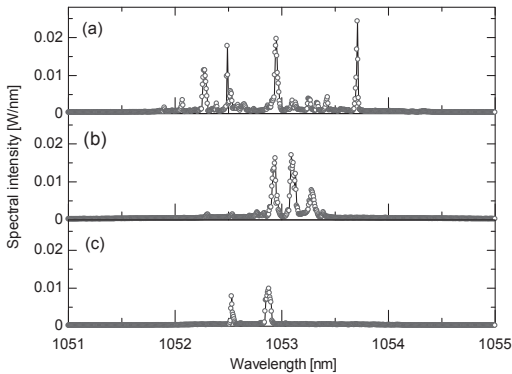


図6 異なる時刻に測定された太陽光励起ファイバレーザの発振線

線スペクトルが変化した (図6 (a), (b), (c) は約4分以内に得られたスペクトル)。不均一広がりにより多数の縦モードが発振しているものと考えられる。図6 (a) で得られたスペクトルの最大ピークの波長は1053.71 nmで半値全幅は0.013 nmであった。

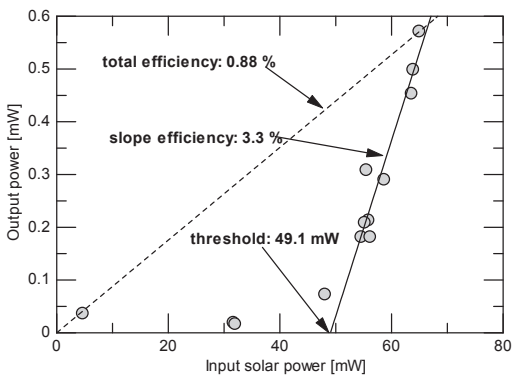


図7 太陽光励起ファイバレーザの入出力特性

Nd添加第1クラッドに入射した太陽光パワーに対するレーザーパワーの関係を図7に示す。最大のレーザー出力パワーは、入射パワー65.0 mWにおいて0.57 mWであった。レーザー発振しきい値は49.1 mW、スローブ効率は3.33%、総合効率は0.88%であった。さらなる効率向上に向けて改善すべき点として、(1)共振器ミラーの反射率、ファイバ長の最適化、(2)励起光の吸収効率の改善 (ex. 未吸収太陽光成分の削減)、(3)共振器損失の改善 (ex. ミラー損失、ファイバの伝送損失の低減)が挙げられる。

4. 結言

ダブルクラッド構造Nd添加フッ化物ガラスファイバと放物面鏡を組み合わせ、自然太陽光励起によるレーザー発振を実証した。太陽光励起ファイバレーザ媒質の特徴は、ファイバ化が可能であり、可視域に大きな吸収を持たず、低フォノンエネルギーで太陽光下での発光量子効率が比較的高い材料を選択している点にある。ガラスは高い組成自由度を持つので、今後これらの特性を向上させた新たな太陽光励起ファイバレーザ媒質の開発が期待される。

太陽光励起ファイバレーザ発振の実現は、太陽光励起レーザを利用した革新的なエネルギー技術分野に要求されるビーム品質、冷却、およびエネルギー変換効率などの課題に対してブレイクスルーとなる可能性がある。また、小型の放物面鏡とファイバ型共振器という小型軽量でメンテナンスが容易なシステムであるため、これまでの大型、大出力のレーザシステムとは一線を画す、ポータビリティの高い太陽光励起レーザ応用も期待できる。

本稿で紹介した太陽光励起ファイバレーザ技術は、まだ発振しきい値をようやく超えたレベルである。この技術が実用化に至るかかどうかは、今後の性能向上にかかっている。

参考文献

- [1] Z. J. Kiss, H. R. Lewis, and R. C. Duncan, *Appl. Phys. Lett.*, **2**, 93 – 94 (1963).
- [2] T. H. Dinh, T. Ohkubo, T. Yabe, and H. Kuboyama, *Opt. Lett.*, **37**, 2670–2672 (2012).
- [3] D. Liang, and J. Almeida, *Opt. Express*, **19**, 26399–26405 (2011)
- [4] D. Graham-Rowe, *Nat. Photonics* **4**, 64 – 65 (2010).
- [5] K. Hasegawa, H. Ito, S. Mizuno, *IEEE Photonics Conference*, ThCC 3907–908 (2011).
- [6] T. Suzuki, H. Nasu, M. Hughes, S. Mizuno, K. Hasegawa, H. Ito, and Y. Ohishi, *J. Non-Cryst. Solids* **356**, 2344 – 2349 (2010).
- [7] T. Suzuki, H. Kawai, H. Nasu, S. Mizuno, H. Ito, K. Hasegawa, and Y. Ohishi,
- [8] D. P. Devor, L. G. Deshazer, and R. C. Pastor, *IEEE J. Quantum Electron.* **25**, 1863 – 1873 (1989).
- [9] T. Suzuki, H. Kawai, H. Nasu, M. Hughes, S. Mizuno, K. Hasegawa, H. Ito, and Y. Ohishi, *Proc. SPIE* **7598**, Optical Components and Materials VII, 75981 L.
- [10] S. Mizuno, H. Ito, K. Hasegawa, T. Suzuki, and Y. Ohishi, *Opt. Express*, **20**, 5891–5895 (2012).
- [11] R. E. Bird, and C. Riordan, *J. Climate Appl. Meteor.* **25**, 87–97 (1986).