

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560045

研究課題名（和文）無集光で発振する太陽光励起ファイバーレーザー

研究課題名（英文）Solar-pumped fiber laser without concentrating the sunlight

研究代表者

遠藤 雅守(ENDO, Masamori)

東海大学・理学部・教授

研究者番号：60317758

研究成果の概要(和文)：Ndドープガラスファイバーをダイクロミック入射窓を持つ箱に入れ、色素による波長変換で光を閉じ込めることで太陽光を増強、無集光で発振する太陽光励起レーザー実現を目指す。太陽光の20倍相当の白色光で43dB/kmの利得を得た。これを、無集光の太陽光における利得に換算すると2.2dB/kmとなり、ファイバーの損失を上回ることではできなかった。問題点は光子増強率が4.1倍と低い事で、原因は箱の側壁反射率の低さと色素溶液の励起光波長帯における吸収である。

研究成果の概要(英文)：We aim a solar-pumped laser without concentrating the sunlight. A Nd-doped glass fiber is packed in a box whose front window is dichroic, and it contains sensitizer dye solution. By irradiating a white light equivalent to a 20 times concentrated solar light, a 43dB/km of positive gain is observed. Expected gain by the natural sunlight is 2.2dB/km, and it is below the intrinsic loss of the fiber. The unexpected low gain is due to the low reflectivity of the sidewall of the box, and pump wavelength absorption of the dye solution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 (4903)応用工学・量子光工学

キーワード：レーザー，太陽光励起レーザー，ファイバーレーザー

1. 研究開始当初の背景

無尽蔵の太陽エネルギーを直接高輝度のレーザー光に変換する「太陽光励起レーザー」は化石燃料の枯渇、炭酸ガスによる地球温暖化が叫ばれる現在において魅力的なコンセプトに映る。太陽光励起レーザーのうち最も単純な太陽光励起固体レーザーは、固体のレーザー媒質を太陽光で直接照射し反転分布を得るものである。したがってその構成部品はレーザー媒質、一組の共振器ミラー、そして太陽光を集光するレンズあるいはミラーと単純そのものである。太陽光励起レーザーの歴史は古く、1966年には

早くも発振の報告[1]があるほどであり、現在までに数多くの研究報告がある。翻ってその応用を見ると、現在までに実用化された太陽光励起レーザーは未だ存在しないとんでも過言ではない。

理由の一つとして、構成部品の一つ、集光システムが複雑、巨大で結局はレーザー出力に対して魅力の薄いシステムしか構築できないことが挙げられるだろう。集光システムが巨大になる理由は、レーザー発振に必要な利得を得るために太陽光をおよそ10,000倍に集光する必要があるためである。しかし最近、Yabe等により提唱され

た新エネルギーシステムのための太陽光励起レーザー[2]では、Fresnel レンズ 1 枚で構成された極めて単純な集光光学系でレーザー発振を達成している。このシステムのキーコンポーネントとなるのが新開発の Nd/Cr: YAG セラミックである。これにより集光度の低い、低品質の光学系でも十分な利得を得ることが可能になった。

本研究は太陽光励起レーザーの低集光発振を更に推し進め、「集光せずに発振する太陽光励起レーザーは実現可能か」という課題に挑むものである。これにより太陽光励起レーザーは太陽電池のように平板状のレーザーを太陽の方向にかざすだけで発振するようになる。

結論から言うと、集光なしに発振する太陽光励起レーザーの形態としてはファイバーレーザー以外にはありえない。なぜなら集光しない太陽光は(励起光源としては)あまりに弱く、発振に必要な大きさの正利得を得るためには非常に長い媒質長が必要なためである。集光しないで発振する太陽光励起ファイバーレーザーの可能性は 1998 年に Ueda によりはじめて言及された[3]。活性原子はドープされた Nd^{3+} である。文献[3]によると予備実験では単位長さあたり利得が損失を上回ることができなかったため発振せず、太陽光を有効に Nd^{3+} に結合させる工夫が必要である、と結ばれている。そしてその後、無集光発振太陽光励起レーザーの開発を試みたグループはない。

2. 研究の目的

本研究は上記の問題を解決するため、ファイバーを色素溶液に浸漬し、ダイクロイック窓で封止したチャンバーに入れることにより結合効率を劇的に向上させる方策を提案する。そしてその結果、無集光で太陽光励起ファイバーレーザーが発振可能であることを実証する。そのため、以下の個別目標を立て研究を実施する。

- ①. 集光しない太陽光で Nd^{3+} ドープファイバーレーザーが発振することを理論的に実証する。
- ②. 実験を行い、疑似太陽光を照射して理論的予測通りの利得が得られることを確認する。
- ③. 太陽光を無集光で照射し、レーザー発振を実証する。

3. 研究の方法

無集光発振太陽光励起ファイバーレーザーの概念図を図 1 に示す。レーザー媒質は長さ数百 m~数 km に及ぶガラスファイバーで、 Nd^{3+} をドープしてある。ポンピングの最適波長は 808nm で発振波長は 1064nm、いわゆる YAG レーザーと同じものである。ファイバーはコイル状に巻かれ、密に配置されて金属製チャンバー内に収納される。チャンバーは可視および近赤外で高反射率の誘電体多層膜でコートする。チャンバーは増感剤で満たされており、太陽光のうち可視

光成分を透過する窓で封止されている。

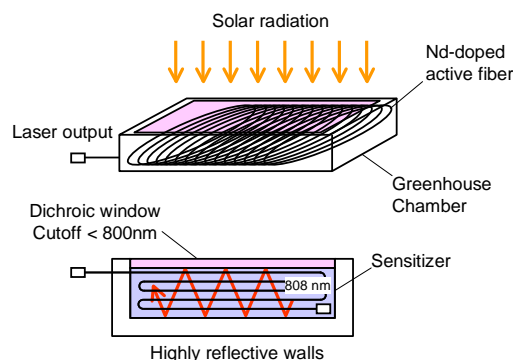


図 1: 無集光発振太陽光励起ファイバーレーザーの概念図

ダイクロイック窓は 800nm よりやや短い波長にカットオフを持つため、可視光を透過し、808nm で高い反射率を持つ。そして、透過した可視光は増感剤に吸収され、808nm 近辺の蛍光として放出される。その結果、808nm より短い波長の太陽光の大部分が 808nm 帯に変換され、しかもダイクロイック窓と高反射コートされたチャンバーで多重反射するため効率良くファイバーに吸収される。その結果、集光しない太陽光(1kW/m²程度)の光子密度でもファイバー内に正の利得を生じせしめる。もちろん、利得の絶対値は固体レーザーとは比べるべくもないが、ファイバーの長い利得長を生かせばレーザー発振が可能となる。

高効率発振のキーとなるのが単位長さ当たりの損失と単位長さ当たりの利得の比率であるが、この点では通信用に極限まで洗練されたガラスファイバーの技術が存分に活用できる。入手可能な Nd ドープガラスファイバーの 1064nm における損失は 10dB/km 未満で、これは典型的な Nd: YAG 結晶の 1/100 にも達する。

4. 研究成果

(1) 太陽光励起ファイバーレーザーの理論

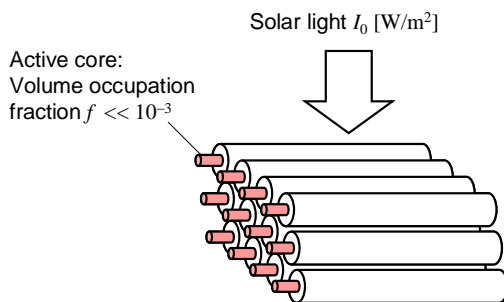


図 2: 太陽光励起ファイバーレーザー媒質の利得を見積もる系の概念図

図 2 は系を単純化したモデルの概念図である。密に配置されたファイバー束があり、コアの空間占有率は f とする。ここで光ファイバーはコアがクラッドの断面積に比べ小さいため f を 10^{-4} とする。

このファイバー束に側面から全光束 $I_0(\text{W}/\text{m}^2)$ の太陽光が当たったときの利得を計算する。 f が小さいため、単一通過当たりの励起光の損失は無視する。

一般的に、4 順位レーザーの小信号利得係数 γ_0 は以下の式で表される。

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

ここで P_{ab} は単位体積当たり吸収パワー (W/m^3)、 η_Q は量子効率、 η_s はストークス効率である。 Nd^{3+} ドープガラスを 808nm で励起した場合、 $\eta_Q=0.9$ 、 $\eta_s=0.8$ である。 I_s は媒質の飽和強度で以下の様に書ける。

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma\tau} \quad (2)$$

ここで τ は Nd^{3+} の蛍光寿命で $400\mu\text{s}$ 、 $h\nu$ は光子エネルギー (波長 $1.06\mu\text{m}$)、 σ は誘導放出断面積で $2 \times 10^{-20} \text{m}^2$ である。

一方、太陽光スペクトルのうち Nd^{3+} に有効に吸収される割合は

$$P_{ab} = \eta_a I_0 \alpha_p \quad (3)$$

である。ここで η_a は太陽光スペクトルのうち Nd^{3+} に吸収される割合で 0.1 と仮定する。 α_p は媒質の吸収係数で、 0.5% ドープの Nd ガラスファイバーの実測値、 $300\text{dB}/\text{km}$ を仮定する。

以上の仮定と、宇宙空間における太陽光パワー密度 (Air Mass Zero=AM0)、 $1.4 \times 10^3 \text{W}/\text{m}^2$ を仮定するとアクティブファイバーの利得は $3.0 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ 、あるいは $0.13\text{dB}/\text{km}$ となる。一方、典型的なアクティブファイバーの損失は $10\text{dB}/\text{km}$ 程度で、これでは利得がファイバーの損失を上回ることができない。

しかし、我々の提案する方法で 808nm 帯の光子濃度を 300 倍に増強できれば、期待される利得は $1.0 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ になり、ファイバーレーザーの高効率動作に十分な水準となる。詳細な計算は文献[4]に譲るが、縦横 300mm 、厚さ 1mm の、LP レコード盤のサイズのファイバーレーザーから取り出されるパワーは 6mW と見積られる。では、どのようにして 300 倍の増強を得るかというところ、一つはスペクトル圧縮で、もうひとつは温室効果チャンバーである。

一つ目のスペクトル圧縮は単純な理屈で、太陽光の広いスペクトルを吸収し、 808nm 付近の狭いスペクトルで蛍光する色素等の増感剤を用いる。太陽光のパワーのうち半分は波長 700nm より短い領域にあるので、これにより 808nm 帯光子濃度は自然な太陽光に比べ 5 倍の増強が期待できる。したがって、 300 倍の増強を得るためには温室効果チャンバーによる 60 倍の増強が要求される。

ダイクロイックミラーを窓に持つチャンバー内で光子濃度がどの程度増強されるかを計算した。シミュレーションの概念図を図 3 に示す。グリッド中央を出発した光子は 4 面の壁に当たり

つつ減衰するが、これを半透明のスクリーンで置き換える。すると、角度 θ で出発した光子の減衰定数は以下の様に表される。

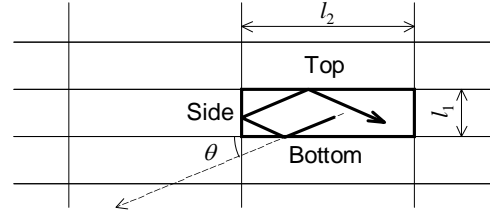


図 3: 温室効果チャンバーによる光子濃度増大を見積もる計算の概念図

$$\text{側面: } \alpha_{\text{Side}} = -\ln[R_{\text{Side}}(\theta)] N_1 \quad (4)$$

$$\text{底面: } \alpha_{\text{Bot}} = -\ln[R_{\text{Bot}}(\pi/2 - \theta)] N_2 \quad (5)$$

$$\text{上面: } \alpha_{\text{Top}} = -\ln[R_{\text{Top}}(\pi/2 - \theta)] N_2 \quad (6)$$

ここで N_1 、 N_2 は単位長さあたり光子が壁面に当たる回数 (m^{-1}) で以下の様に表される。

$$N_1 = \frac{\cos \theta}{l_1} \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{\sin \theta}{l_2} \quad (8)$$

すると、光子の寿命はこれら α と溶液の損失 α_m を使い以下の様に表される。

$$\tau(\theta) = \frac{n}{(\alpha_{\text{Side}} + \alpha_{\text{Bot}} + \alpha_{\text{Top}} + \alpha_m) c} \quad (9)$$

ここで n は増感剤溶液の屈折率、 c は真空の光速度である。

光子の平均寿命は、これを角度 0 から $\pi/2$ まで積分、平均化したもので与えられる。一方、チャンバーが無い場合の光子寿命は単純に中央からチャンバー端まで光子が走る時間で規定でき、これらの比率が光子濃度の増強率と定義できる。

いま、チャンバーの寸法として縦横 300mm 、厚さ 1mm を仮定し、チャンバーの上面が 780nm にカットオフを持つダイクロイック窓、下面は高反射率誘電体多層膜を施したガラス窓とする。これらの窓は正面入射に対しては高い反射率を示すが、反射率が角度の関数として大きく変化する点が欠点である。図 4 は本研究で使用したダイクロイック窓 (Top) と高反射窓 (Bottom) の反射率の入射角依存性である。反射率は s 偏光と p 偏光で大きく異なり、 s 偏光に対してはグラフで見られるような反射率の落ち込みは観測されない。計算では保守的に上下面の反射率を図 4 のデータと仮定した。側壁は金属壁として、簡単

のため一定の反射率を仮定した。

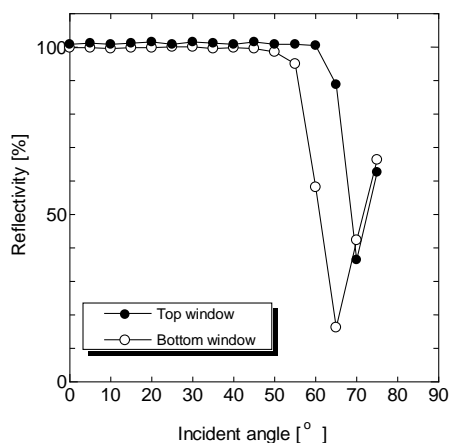


図 4: 実際に使用したダイクロイック窓および誘電体多層膜ミラーの反射率の角度依存性(s 偏光).

図 5 は、側壁反射率の関数で表した光子増強率である。側壁の面積は上下面の 0.7%に過ぎないが、光子増強率は側壁反射率に非常に敏感であることがわかる。しかし、側壁反射率が 0.7 以上あれば 60 倍の光子増強率が達成できることがわかり、これは磨かれた金属で充分達成できる数値である。

以上の理論的考察から、増感剤と温室効果チャンバーを組み合わせれば無集光で発振する太陽光励起ファイバーレーザーが構築可能であることが示された。

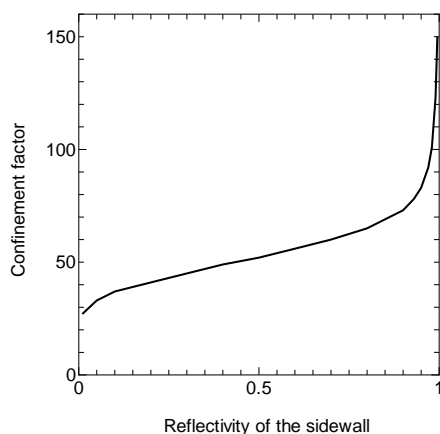


図 5: 側壁反射率と光子増強率の関係

(2) 実験装置

図 6 は実験装置の概略図である。Ndドープファイバーは電気通信大学より寄贈を受けた。製造は三菱電線工業で、当時は本研究の様な横励起を想定していなかったため、ファイバーの特性は必ずしも本研究に最適なものとはなっていない。コア径は 15.8 μm で Nd イオン濃度は 0.5wt% である。808nm の吸収は 330dB/km である。通常、Nd ドープファイバーは蛍光波長が

1080nm にシフトするが、本研究で使用したファイバーは Al をドープ、YAG レーザーと同様の 1060nm 帯で蛍光する。

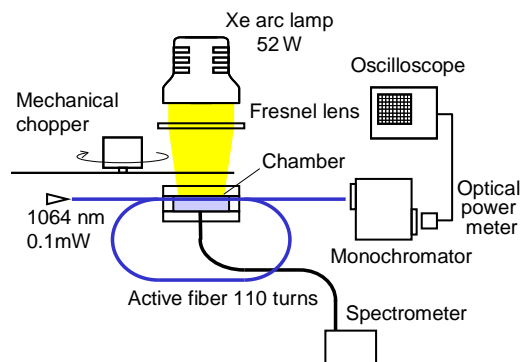


図 6: 実験装置の概念図

ファイバーはサポート上で 110 巻きされ、その一部が温室効果チャンバーを貫通している。ファイバー全体を増感剤に浸漬させなかったのは予算的制限である。ファイバーが部分的にしか照射されないことにより利得の絶対値が小さくなるが、これは疑似太陽光をある程度集光して照射する事により相殺できる。

チャンバーは窓の開口が 44 \times 44mm、厚さ 3mm で、アルミ合金製である。したがって 110 巻きのファイバーのうち太陽光に照射される総長は 4.8m である。一般にファイバーは強度確保のため樹脂コートされているが、チャンバー内部のファイバーはこれを除去した。

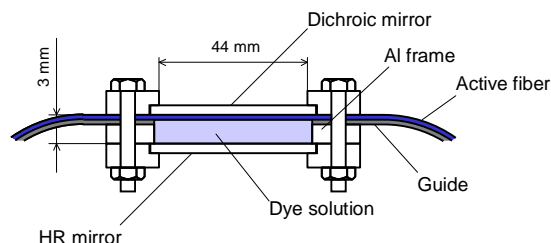


図 7: 温室効果チャンバーの断面図

チャンバーの断面図を図 7 に示す。上下面はいずれも誘電体多層膜コートのガラスで、下面は可視および近赤外の高反射膜である。波長 808nm、正面入射時の反射率は 99.9% 以上である。上面窓は二種類を用意した。一つは 740nm がカットオフのダイクロイック窓で、もうひとつがカットオフ 580nm のダイクロイック窓である。これは、Nd³⁺ の 808nm 吸収帯、588nm 吸収帯に対応した反射率特性である。580nm 窓は 808nm 帯で再び透過となるよう膜設計されている。

疑似太陽光は Xe アークランプ (Serico XC-500ASS) で 26000cd の光束が頂角 60° の円錐状に放射される。これをフレネルレンズで 44mm 角の窓に収まるように集光した。レーザーパワーメーターを使い計測したところ、窓上の全光パワーは 52W で、面積で割れば平均強度は

2.7W/cm²である。これはAM0太陽光の20倍に相当する。

チャンパーには熱交換器が設置されていない。その代わりに、疑似太陽光を機械的にチョップして熱負荷を下げ、自然冷却で温度を一定に保った。デューティー比は3.6%、周波数は1.5Hzである。数分間の動作中、観測された利得に変化は無かったので、実験中の温度上昇は無視できると考えられる。

アクティブファイバーの利得は、1064nmで発振する半導体励起Nd:YAGレーザー(Changchun MIL-III-1064)を集光してファイバーの一端から入射し、ファイバー他端の光強度で測定した。入射パワーはおおよそ300μWである。射出端には分光器を設置し、ポンプ光と信号光を分離した。チャンパー内の蛍光強度を下面中央に開けられた直径2mmの穴から観測している。穴にファイバー分光器(Ocean Optics USB4000)先端を差し込み、分光強度を計測した。

増幅試験に入る前に、808nm帯で高効率に蛍光する増感剤の探索を行った。吸収帯と蛍光帯が最も適するのは有機色素styryl 9Mであったが、蛍光効率を計測したところ約5%と低く、本研究の目的には適さない。無機量子ドットの蛍光効率は20%程度と高かったが、それでも温室効果チャンパーの増強効果を得るには不足であった。

そこで、方針を変更してNd³⁺の可視吸収帯で蛍光する増感剤を使うことにした。Nd³⁺レーザーは一般に808nmの⁶F_{5/2}準位をポンピングに使うが、588nmに位置する²G_{7/2}, ⁴G_{5/2}でもポンピングは可能である。但しこの場合、太陽光スペクトルのピークがこの波長帯にあるため、スペクトル圧縮効果は期待できない。増感剤は588nmより短い波長の成分を588nmに変換するのみで、588nmを全反射する窓による増強効果のみが期待できる。幸い、588nm帯で蛍光する有機色素rhodamine 6Gの蛍光効率は実測値で80%程度と高く、本研究では580nmにカットオフを持つ窓とrhodamine 6Gを増感剤として増幅試験を行った。

(3) 実験結果

温室効果チャンパーの効果を検証するため、温室効果無しでの増幅試験を実施した。計測は上面窓をガラス窓に置き換え、増感剤の代わりにメタノールを満たしたチャンパーで行った。その結果得られた小信号利得係数は3.5×10⁻³m⁻¹であった。これは808nm帯の吸収と588nm帯の吸収が合わさった効果であるので、次にカットオフ740nmの窓を装着、利得係数を計測した。その結果は2.1×10⁻³m⁻¹であった。ここから、588nm帯光子吸収による利得係数は2.1×10⁻³m⁻¹、808nm帯光子吸収による利得係数は1.4×10⁻³m⁻¹と見積もられる。ここで、太陽光がAM0の20倍の強度であること、下壁面により太陽光が一往復していることを考慮すると、

本研究で使用したファイバーの、AM0太陽光照射時における808nm帯光子による利得係数は3.5×10⁻⁵m⁻¹と見積もられる。これは先に理論的に見積もったアクティブファイバーの利得に近く、理論計算の正当性が実験的に確認された。

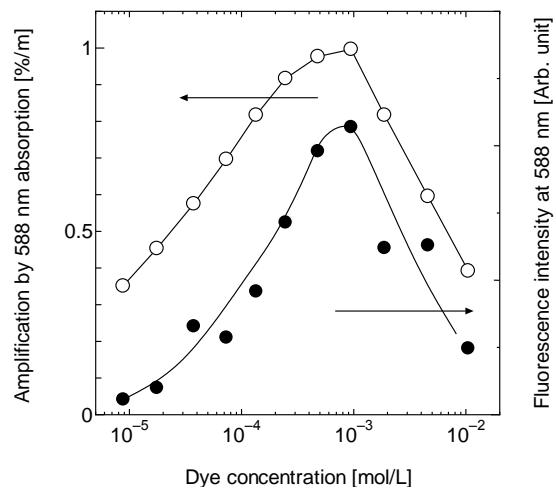


図 8: 色素濃度と利得係数の関係。右軸はチャンパー内の588nm蛍光強度

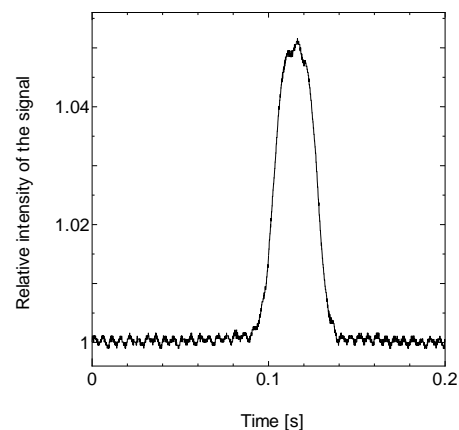


図 9: 典型的なプローブ信号増幅波形

続いて、580nmカットオフの窓とrhodamine 6G色素を用い利得係数の計測を行った。結果を図8に示す。左軸は利得係数、右軸は588nmの蛍光強度である。色素濃度9.5×10⁻⁴mol/Lのとき1.0×10⁻²m⁻¹の利得係数が得られた。典型的なプローブ光信号の時間変化を図9に示す。

ピークより左側の利得係数減少は、太陽光が色素溶液に吸収されず上側窓から逃げ出すことで説明できる。ピークより右側の利得減少は、後述するように色素溶液が588nm帯を吸収し、光伝搬距離がチャンパーの寸法程度まで短くなるためである。

得られた利得係数1.0×10⁻²m⁻¹から808nm帯光子の寄与、1.4×10⁻³m⁻¹を引くと、588nm帯光子吸収による利得は8.6×10⁻³m⁻¹となる。すなわち、温室効果チャンパーにより光子濃度

が4.1倍に増強された、ということが明らかになった。しかし、この値は我々が期待していたものに比べ小さい。この原因を突き止めるためいくつかの実験および計算を行った。

はじめに、色素溶液の588nmにおける吸収係数を計測したところ、 $1.1 \times 10^3 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ を得た。最大の利得を得た色素濃度が 10^{-3} mol/L であるのでこれは無視できない。これに加え、側壁反射率を50%と仮定して計算した光子増強率が図10である。側壁反射率の見積りは、側壁が粗加工のアルミであり、かつファイバーが通過する2面はシリコンシーラントで表面が覆われていることを考慮した。グラフは横軸が色素濃度、縦軸が期待される増強率である。

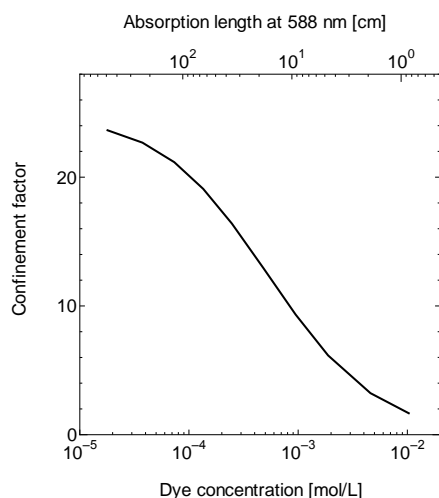


図 10: 色素濃度と期待される光子増強率の関係

図5の計算では側壁の面積は0.7%であったが実験装置では14%で、側壁反射率が増強率に与える影響は大きい。そのため増強率は溶液の吸収を考慮しない最大値でも24である。溶液濃度が高くなるにつれその損失が無視できなくなり、最大利得を期待できる 10^{-3} mol/L では増強率は10まで低下した。 10^{-2} mol/L ではもはや温室効果チャンバーが成立しないこともわかる。これで、実験的に得られた4.1という増強率の低さはほぼ説明できたことになる。

本研究で得られた利得係数をAM0太陽光照射に換算すると2.2dB/kmとなり、「無集光で発振」と言う目的には届かなかった。しかし、実験結果から、利得係数を増加させるには溶液の吸収係数を下げ、側壁の反射率を上げれば良いことが明らかになった。また、可視帯を吸収して808nm帯で蛍光する高効率な増感剤が見つければ、光子濃度は更に数倍になるので、これらをあわせれば無集光で発振する太陽光励起ファイバーレーザーが実現する。

(4) 結論

無集光で発振する太陽光励起レーザーを実現するため、増感剤とダイクロミック窓を組み合

わせた「温室効果チャンバー」にNdドープアクティブファイバーを封入した構造を提案した。基礎試験を実施し、アイデアの正当性を実証した。太陽光の20倍の強度を持つXeランプで照射された増幅器は $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ の小信号利得を示した。これは集光しない太陽光の照射に換算すると2.2dB/kmの利得となり、ファイバーの固有損失には届かない。原因はチャンバーの光子増強率が目論見に届かなかったことで、その原因は側壁反射率と溶液の吸収であることを明らかにした。また、可視帯の光子を吸収し、高効率で808nm帯で蛍光する増感剤の探索も課題である。

(5) 謝辞

本研究で使用された光ファイバーは電気通信大学植田教授及び白川准教授より提供を受けたものである。ここに明記し感謝の意を表す。

(6) 参考文献

- [1] C. G. Young, *Appl. Opt.* 993-997 (1966).
- [2] T. Yabe *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 90 (26), 261120 (2007).
- [3] K. Ueda, *Proc. SPIE* 3267, pp. 14-22 (1998).
- [4] M. Endo, J-F Bisson, *Jpn. J. Appl. Phys.* 51, 022701 (2012).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

1. Masamori Endo, Jean-François 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 (6pp). (査読あり)

[学会発表] (計2件)

1. 遠藤雅守, Jean-François Bisson, 「増感剤と多重反射セルを用いた太陽光励起ファイバーレーザー」, レーザー学会学術講演会第32回年次大会 (2012年1月, 宮城)
2. 遠藤雅守, Jean-François Bisson, 「色素増感型太陽光励起ファイバーレーザー」, 第71回応用物理学会講演会講演会 (2010年9月, 長崎)

[その他]

研究成果 web ページ:

<http://teamcoil.sp.u-tokai.ac.jp/kenkyu/Resonator/Fiber/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 雅守 (ENDO, Masamori)
東海大学・理学部・教授
研究者番号: 60317758