

複合セラミックスレーザー媒質に関する研究

電気通信大学大学院 量子・物質工学専攻 植田研究室 檜皮 健二

1. はじめに

近年、固体レーザーは高性能化、高出力化、低価格化が進み、半導体産業をはじめ、自動車産業、鉄鋼産業、等でのレーザー加工に応用され、さらに医療分野でレーザー治療と産業応用は広範囲に及んでいる。加工機用レーザー装置には、主に、炭酸ガスレーザー、Nd:YAGレーザーが用いられ、特にNd:YAGレーザーは、発振波長が $1.06 \mu\text{m}$ なので、ファイバー伝送が可能であり、有用性は非常に大きい。

これまで固体レーザーの性能向上、低価格化はLDによるレーザー励起の実用化によるものが大きかった。これはランプ励起方式にくらべ、全て固体要素で構成されるため小型化、軽量化が可能になり、励起光源としての寿命も 10 倍以上と長いためである。しかし、低価格化に関して励起用LDのコスト削減効果は予想からずれが生じ始め、レーザー媒質の改善、コスト削減が求められている。従来、レーザー媒質には単結晶が用いられていたが、単結晶と同等のファインセラミックスが開発され^{1,2)}、これは、要求されている課題を解決することができる。

Nd³⁺イオンを添加したレーザー媒質にCr⁴⁺イオンを併用することによってQ-スイッチレーザー発振が可能である。Q-スイッチレーザーでは尖頭出力が高いため、加工用レーザーに適している。媒質としては、Nd³⁺イオンとCr⁴⁺イオンを共添加したYAG結晶が主流である。しかし、Cr⁴⁺イオンによる励起光吸収が存在するため共添加型よりもNd³⁺イオンとCr⁴⁺イオンを分けた複合型の方が高効率化が期待できる。さらに、ファインセラミックスにおいても、セラミックスとセラミックスの接合が可能のため、複合型セラミックスレーザーには、低価格化、高効率化、多機能化が期待できる。よって、セラミックスの接合、複合型Q-スイッチレーザーを含めて、複合セラミックスレーザー媒質の研究を進める。

2. セラミックスの接合

2.1 拡散距離測定

複合型セラミックスを考える上で、接合部分を評価する必要がある。接合部分の評価を、添加イオンの拡散距離を測定することによって行う。

時間 $t=0$ において $x>0$ では $c=c_0$ 、 $x=0$ では $c=c_s$ とすると、拡散開始後のある時間における拡散イオンの濃度分布は

$$\frac{c(x,t) - c_0}{c_s - c_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \dots\dots\dots (2.1)$$

となる。

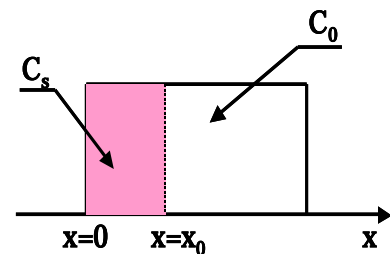


図 2.1 濃度分布図

また、活性イオンによる発光強度 I は濃度に比例することから、

$$I \propto \frac{c(x,t)}{c_s} \propto 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{Dt}}\right) \dots\dots\dots(2.2)$$

と書き表される。よって、発光強度を測定し、拡散係数 D を見積もり、拡散距離をもとめる。ここで、平均拡散距離 $\langle x \rangle$ は、以下の式で表される。

$$\langle x \rangle = 2\sqrt{\frac{Dt_0}{\pi}} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.2 測定装置

拡散距離測定を行うための実験図を図 2.2 に示す。

10 倍の対物レンズ(Mitutoyo M Plan NIR 10)を 2 つ用いて 1 対 1 の顕微鏡(共焦点顕微鏡)を作製した。励起光と発光光とが同軸であるメリットは、励起ポイント(発光ポイント)と検出ポイントが同一であるという点である。

この顕微鏡の空間分解能は光スペクトラムアナライザまでのファイバーのコア径により、決定する

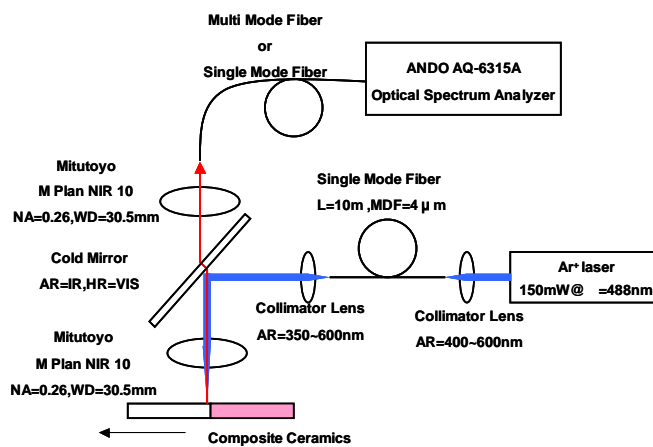


図 2.2 拡散距離測定装置

ものとした。Nd³⁺、Cr³⁺イオンの測定にはMFD=4 μmのシングルモードファイバー(SMF)、Cr⁴⁺イオンの測定にはMFD=9 μmのSMFを使用する。

使用した試料は Nd:YAG と Non-dope:YAG の複合セラミックス、Nd:YAG と Cr:YAG の複合セラミックスの 2 種類であり、それぞれの試料の表面は研磨処理を行った。

発光光の光強度を測定するため、試料の厚み方向の影響を少なくする必要がある。よって、試料は 80 μm 程度の厚みまで研磨処理を行った。

2.3 各イオンの発光スペクトル

図 2.3 に各イオンの発光スペクトルを示す。測定時には、Nd³⁺、Cr³⁺、Cr⁴⁺イオンのそれぞれの特徴的な波長、1064.2nm、688.7nm、1294nm 部分を使用する。

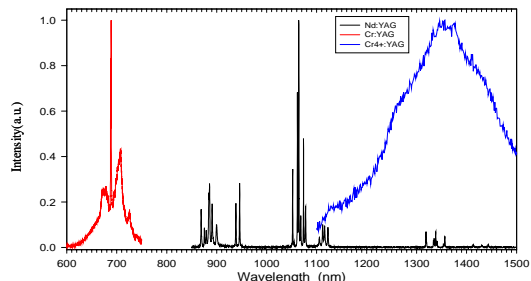


図 2.3 各イオンの発光スペクトル

2.4 測定結果

図 2.4 に Non-dope:YAG-Nd:YAG と Nd:YAG-Cr:YAG のコンポジットセラミックスの拡散距離測定の結果を図 2.4 に示す。図 2.4 では、縦軸を $I(x)/I_{max}$ で規格化し、最も発光強度の強い位置で値が 1 となるようにした。この結果より、式 2.2 でフィッティングし、拡散係数 D を求めた。さらに式 2.3 に当てはめ、平均拡散距離を求めた。これらの計算結果を表 2.1 にまとめる。

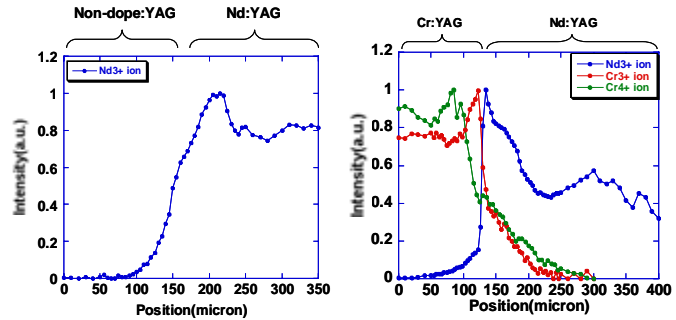


図 2.4 Non-dope:YAG-Nd:YAG と Nd:YAG-Cr:YAG セラミックスの拡散距離測定結果

Nd:YAG 単結晶と Non-doped:YAG 単結晶を拡散結合させた時の、平均拡散距離 $\langle x \rangle$ は、 $3.4 \mu\text{m}$ であり、Nd:YAG セラミックスと Non-doped:YAG セラミックスの接合では、 $23.8 \mu\text{m}$ と言う結果を考えると、単結晶と単結晶の拡散結合よりも、セラミックスとセラミックスの接合のほうが、より強固な接合をしていると考えられる。これは、高強度の光が入射した場合、張り合わせ面から破壊される可能性は低下すると考えられる。これは、Nd:YAG セラミックスと Cr:YAG セラミックスの接合でも同様のことが言えると思われる。よって、Q-スイッチレーザー媒質としても十分耐えうると思われる。そこで、Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットセラミックス Q-スイッチレーザーの発振実験を行う。

表 2.1 平均拡散距離まとめ

	拡散方向	拡散係数 D (cm^2/s)	平均拡散距離 $\langle x \rangle$ (μm)
Nd:YAG-YAG コンポジットのNd3+	Nd:YAG YAG	6.2×10^{-10}	23.8
Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットのNd3+	Nd:YAG Cr:YAG	1.3×10^{-10}	17.1
Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットのCr3+	Cr:YAG Nd:YAG	6.8×10^{-10}	25
Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットのCr4+	Cr:YAG Nd:YAG	1.8×10^{-9}	40.2

3. Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットセラミックス Q-スイッチレーザー

3.1 Q-スイッチ発振概念

Q-スイッチ発振では、はじめは、レーザー共振器の Q 値を低くしておいて励起を続け、発振媒質での反転分布が十分に大きくなった時、急速に共振器の Q 値を高くし、上準位に蓄えられたエネルギーを短時間でレーザー出力として取り出す。この Q 値の変動を実現するた

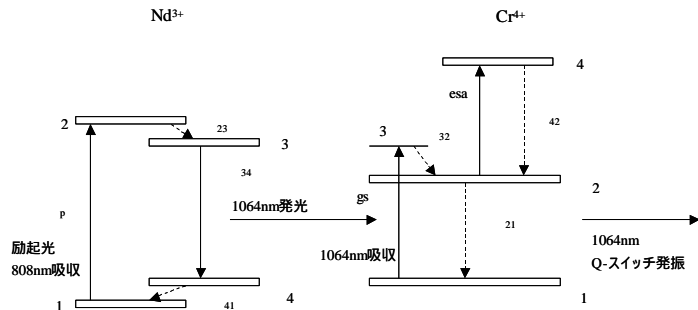


図 3.1 Q-スイッチ発振概念図

めに、可飽和吸収体を用いる。今回は、可飽和吸収体に $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ を用いた。また、利得媒質としては、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ を用いる。概念図を図 3.1 に示す。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ での蛍光寿命 τ_{34} は $\sim 230 \mu\text{s}$

程度と長く、Cr⁴⁺:YAGでの蛍光寿命 τ_{21} は~3.4 μ sと短い。これにより、Nd³⁺:YAGで反転分布が次第に起こり、エネルギーが蓄えられ、ある瞬間に、Cr⁴⁺:YAGでの吸収がなくなり、Q-スイッチ発振に至る。³⁻⁶⁾

3.2 Q-スイッチレーザー装置

Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットセラミックス Q-スイッチレーザー装置を図 3.2 に示す。励起光源に最大出力 7.1W、発振波長 807.4nm の Fiber coupled LD(unique-m.o.d.e. 製 UM7800/100/20)を使用した。発振波長が 807.4nm と短波長のため、最大出力時に温度調整器で温度を調整し、長波長側にシフトさせ実験を行った。励起光を f=80mm のアクロマートレンズを 2 つ使い、1:1 に集光した。このとき 7%の損失が生じ、実質的な励起パワーは最大で 6.6W である。また、凹面鏡は、反射率 R が 90%、80%の 2 種類を用いた。

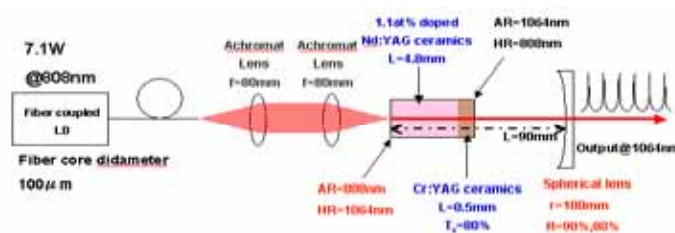


図 3.2 Q-スイッチレーザー装置

レーザー媒質については、

3.5mm の円筒型セラミックス

を用いた。Nd:YAG 部分の長さが 4.8mm で、濃度が 1.1at%であり、Cr:YAG 部分の長さが 0.5mm で発振波長(1064nm)に対しての透過率が 80%であった。この試料の励起光源側の端面には、808nm の AR コーティングと 1064nm の HR コーティングを、出力側の端面には、808nm の HR コーティングと 1064nm の AR コーティングを施した。また、共振器は試料の励起光源側の端面と凹面鏡で構成し、共振器長は 90mm である。

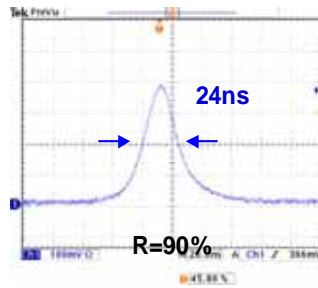
3.3 実験結果

最大 6.6W 励起時に得られた、Q-スイッチレーザーの出力、パルス幅、繰り返し周波数、尖頭出力、パルスエネルギー、また、光-光変換効率、スロープ効率を反射率 R=90%、80%でそれぞれまとめたものを表 3.1 に示す。また、数値計算により求めた、パルス幅、繰り返し周波数、尖頭出力、パルスエネルギーを同時に書き記す。

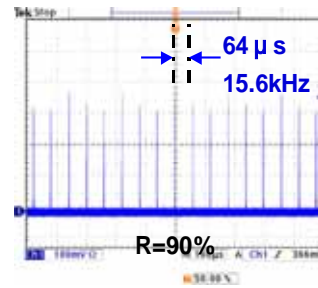
図 3.3 は R=90%の凹面鏡を、図 3.4 は R=80%の凹面鏡を使用し、6.6W 励起時に実測した、パルス幅、繰り返し周波数である。

表 3.1 6.6W 励起時の特性まとめ

Curvature radius (mm)	Reflectivity (%)	Output Power (W)	Pulse Width (ns)	Repetition rate (kHz)	Peak Power (kW)	Pulse energy (μ J)	Optical-Optical efficiency (%)	Slope efficiency (%)
	90	1.3	24	15.6	3.5	83.3	19.7	22.9
100	80	1.6	20	17.9	4.5	89	24.2	29.8
calculation	90		3.1	51.8	8.1	26		
100	80		2.2	43.3	16.8	37		

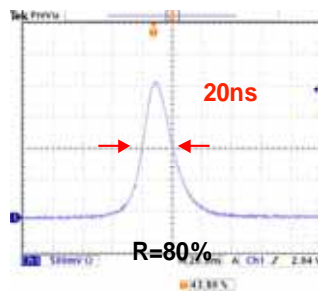


(a)パルス幅

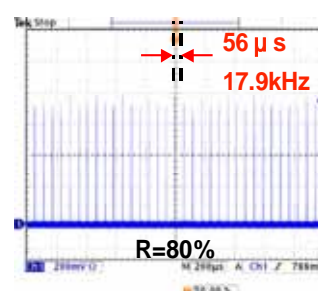


(b)繰り返し周波数

図 3.3 R=90%の時のパルス幅と繰り返し周波数



(a)パルス幅



(b)繰り返し周波数

図 3.4 R=80%の時のパルス幅と繰り返し周波数

実測結果としては、光-光変換効率が最大で 24.2%、スロープ効率は最大で 29.8%となった。また、パルス幅、繰り返し周波数、尖頭出力、パルスエネルギーに関して、実験値と計算値に大きな違いが見られた。この原因として、実験における問題点、計算における問題点があげられる。

まず、実験においての問題点は、利得媒質における励起光のビーム断面積と発振光のビーム断面積の不一致があげられる。計算によれば、励起光のビーム径と発振光のビーム径の比率は、約 2:1 であり、一致しない部分は損失となる。次に、計算においての問題点は、可飽和吸収体の励起光吸収を考慮していない点である。

図 3.5 に発振光のビーム品質を表す、 M^2 パラメーターを測定した結果を示す。凹面鏡の反射率が 90%の時に $M^2=1.05$ となり、また、凹面鏡の反射率が 80%の時に $M^2=1.14$ となった。この結果より、コンポジットセラミックスによるQ-スイッチレーザー発振でも、十分なビーム品質を得られることがわかった。ビーム品質が高いと、絞り込むことが可能であり、光強度を高められるため、複合セラミックスは加工分野にも応用可能な素材であることがわかった。

また、ビーム品質が高い理由としては、セラミックスの透明度が単結晶と比べ、劣らない程高いという点があげられる。さらに、Nd:YAG セラミックスと Cr:YAG セラミックとの接合境界面における不安定性がないということ。最後に、Cr:YAG 部分が発振波長に対して損失となるため、最も基本的なモードで発振したと考えられる。

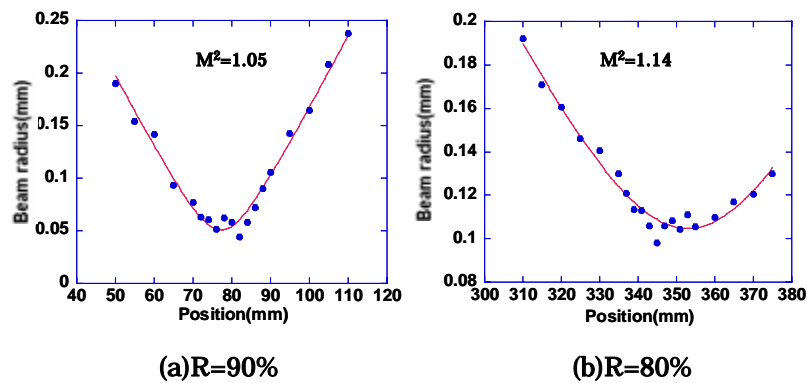


図 3.5 M^2 測定結果

4. まとめ

4.1 拡散距離測定について

拡散距離を測定する共焦点顕微鏡を製作した。これにより、セラミックスとセラミックスの接合は、単結晶と単結晶の拡散結合に比べ7倍程度、強固な接合をしていることが分かった。しかし、 Cr^{4+} イオンの拡散の仕方と Cr^{3+} イオンの拡散の仕方が違う原因は不明である。セラミックスの製作時に補填材として他のイオンを含ませるため、その他イオンの拡散の振る舞いを調べる必要がある。

4.2 コンポジットセラミックス Q-スイッチレーザーについて

Nd:YAG-Cr:YAG コンポジットセラミックスを用いて、Q-スイッチレーザー発振に成功した。凹面鏡の反射率が80%の時に、最大出力が1.6W得られ、パルス幅は20ns、繰り返し周波数は17.9kHz、尖頭出力は4.5kW、パルスエネルギーは89 μ J、光-光変換効率は24.2%、スローブ効率は29.8%という結果が得られた。

今後は、レーザー媒質の濃度や長さ、共振器長等の条件をまったく同一にし、共添加型セラミックスとの比較を行う。また、今回は、共振器長が90mmと長いため、共振器長を短くする。さらには、セラミックスの端面を加工することにより、凹面鏡を取り除き、セラミックスレーザー媒質のみでQ-スイッチレーザー発振を実現する。そのことにより、小型化、低価格化が実現すると考えている。

参考文献

- 1) T. Yanagitani, H. Yagi and M. Ichikawa: Japan Patent 10-101333(1998)
- 2) T. Yanagitani, H. Yagi and M. Ichikawa: Japan Patent 10-101411(1998)
- 3) W. Koechner: Solid-State Laser Engineering(Springer, Berlin, 1999) 3th ed.
- 4) John J. Degnan, Member, IEEE, IEEE J. Quantum Electron. **25**, 214(1989)
- 5) John J. Degnan, Member, IEEE, IEEE J. Quantum Electron. **31**, 1890(1995)
- 6) Guohua Xiao and Michael Bass, Fellow, IEEE, IEEE J. Quantum Electron. **33**, 41(1997)