

Yb 添加セラミックレーザーに関する研究

電子物性工学専攻 植田研究室

高市 和則

1. はじめに

1958年に、A. L. Schawlow とC. H. Townesによって固体レーザーについての議論がなされ、その2年後の1960年、T. H. Maimanによって行われた世界で初めての固体レーザー発振である、ルビー($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) レーザーの発振の報告がされた。以来40年以上経った現在、固体レーザーは科学の様々な研究分野や産業界で利用されている。今までの固体レーザーでは利得媒質に、単結晶やガラスが用いられてきた。単結晶に代わるレーザー媒質として、セラミックスの利用が以前から考えられてきたが、レーザー発振を得るのに十分な品質のものが得られてこなかった。

しかし、近年のナノサイズ微結晶製造技術とセラミックスの真空焼結技術の進歩により非常に高い透光性を有するセラミックスの製造が可能となってきた。植田研究室では、セラミックスを製造している神島化学工業株式会社、ロシア科学アカデミー結晶学研究所の Alexander A. Kaminskii 教授と共同で、セラミックレーザーの研究・開発を行ってきた。

セラミックスの利点として、

1. 製造コストが低い。
2. 大きなサイズの物作ることが出来る。
3. 短期間で製造が可能である。
4. 大量生産が可能である。

などを挙げることが出来る。

我々のグループでは、 $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックス、 $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ セラミックス、 $\text{Nd}^{3+}:\text{YGdO}_3$ セラミックス、 $\text{Nd}^{3+}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ セラミックスについて研究を行い、単結晶とセラミックスには性能にほとんど差がないこと示してきた。しかし、 Nd^{3+} イオン添加固体レーザーでは、 Nd^{3+} イオン濃度に依存する濃度消光の存在や、近赤外域において3つの遷移のチャンネルが存在するといった特徴がある。これらの特徴は、高効率・高出力固体レーザーにとってあまり好ましくない。

Yb^{3+} イオンは2準位の非常に単純なエネルギー構造をしているので、励起状態吸収や、濃度消光などの現象が生じない。このことは、 Nd^{3+} イオンなどと大きく異なる点であり、レーザー媒質としては高い量子効率などが期待できる。しかし、 Yb^{3+} が Pr^{3+} イオン、 Dy^{3+} イオン、 Ho^{3+} イオン、 Er^{3+} イオン、 Tm^{3+} イオンの増感剤として用いられてきたことから分かるように[31]、これらのイオンが不純物として混入しているとエネルギー移譲が生じ、レ

一ザ一の効率低下が起こる。そのため、添加物やホスト材料は純度の高い材料を使用する必要がある。

2. セラミック材料について

2.1 $Y_3Al_5O_{12}$ セラミックス

$Y_3Al_5O_{12}$ は、 $Ia\bar{3}d$ (O_h^{10} , # 230) 空間群に属し、ガーネット構造をしている。

図1 に $Y_3Al_5O_{12}$ セラミックスのUV-visible スペクトルと、IR スペクトルを示す。UV-visible スペクトルは、日立Model 200-10 で測定したものであり、IR スペクトルは日本分光Model A-302 で測定したものである。

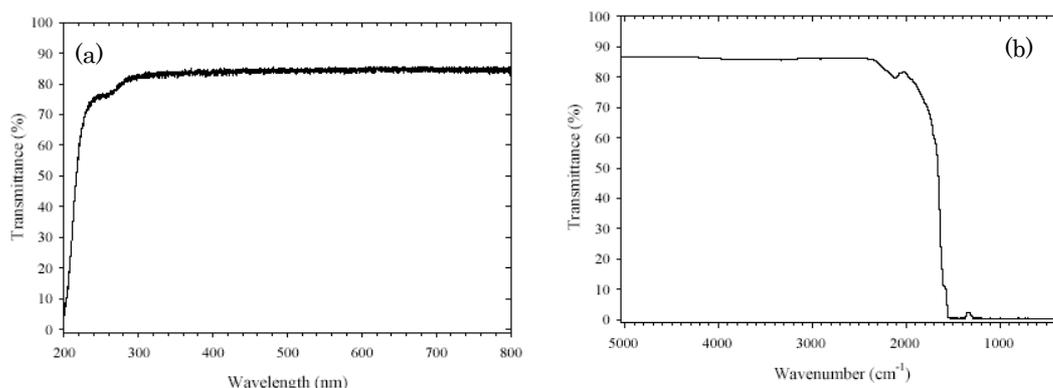


図1 : $Y_3Al_5O_{12}$ セラミックスのUV-visible スペクトル(a)と、IR スペクトル(b)。

2.2 Y_2O_3 セラミックス

Y_2O_3 は、室温では $Ia\bar{3}$ (T_h^7 , # 206) 空間群に属し、鉄マンガン鉱構造、G-タイプの金属酸化物構造をしている。G-タイプの金属酸化物構造は立方晶であり、Y 原子にとっては2 つのサイトが存在する。(d) ポジションを占め C_2 の対称性を持っているものと、(b) ポジションを占め $C_{3i}(S_6)$ の対称性を持っている物とである。unit cell 内には、24 個の(d) ポジション、8 個の(b) ポジションがある。Y原子にとっては32 個のポジションがある。

図2 に Y_2O_3 セラミックスのUV-visible スペクトルと、IR スペクトルを示す。UV-visible スペクトルは、日立Model 200-10 で測定したものであり、IR スペクトルは日本分光Model A-302 で測定したものである。

2.3 Sc_2O_3 セラミックス

Sc_2O_3 も Y_2O_3 同様室温では $Ia\bar{3}$ (T_h^7 , # 206) 空間群に属し、鉄マンガン鉱構造、

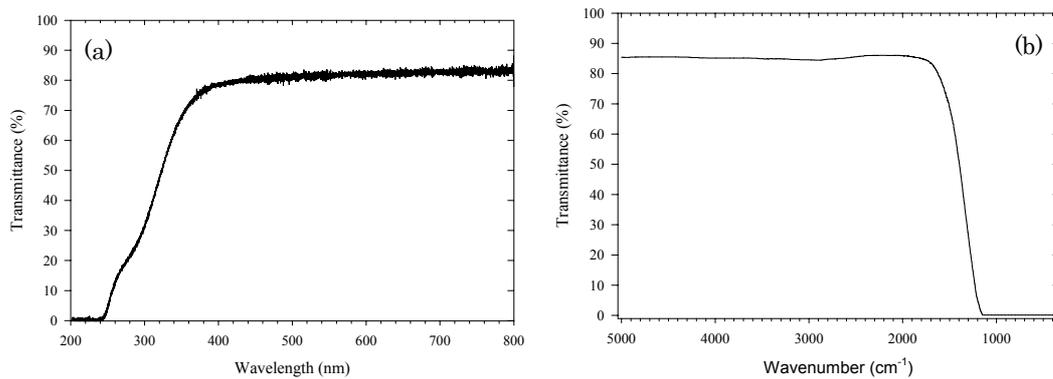


図 2 : Y_2O_3 セラミックスの UV-visible スペクトル(a) と、IR スペクトル(b)。

G-タイプの金属酸化物構造をしている。

図 3 に Sc_2O_3 セラミックスの UV-visible スペクトルと、IR スペクトルを示す。UV-visible スペクトルは、日立 Model 200-10 で測定したものであり、IR スペクトルは日本分光 Model A-302 で測定したものである。

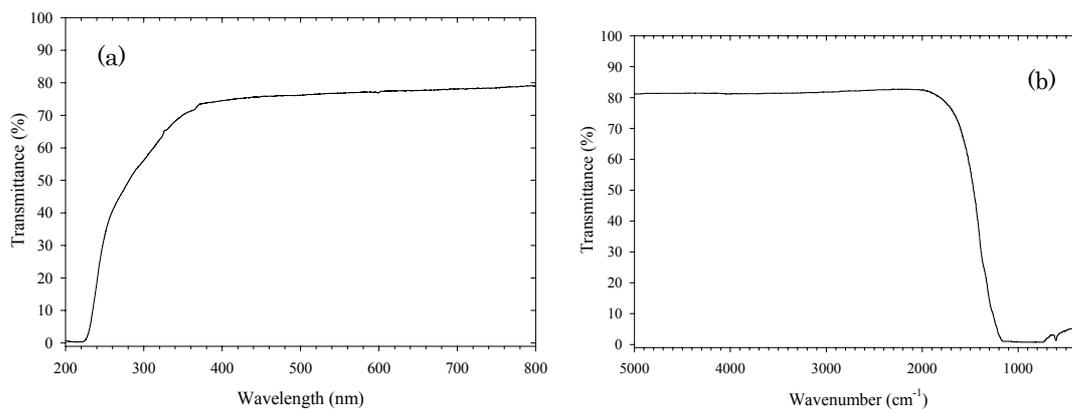


図 3 : Sc_2O_3 セラミックスの UV-visible スペクトル(a) と、IR スペクトル(b)。

3. Yb^{3+} 添加セラミックス

3.1 $Yb^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ セラミックス

図4に、1 at. % $Yb^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ セラミックスの室温での吸収スペクトルと発光スペクトルを示す。スペクトルの測定には、安藤電気オプティカルスペクトルアナライザー AQ-6315A を使用した。

発光断面積の計算は、Füchtbauer—Landenburg 法を用いて行った。

3.2 $Yb^{3+}:Y_2O_3$ セラミックス

図5に、4 at. % $Yb^{3+}:Y_2O_3$ セラミックスの室温での吸収スペクトルと発光スペクトル

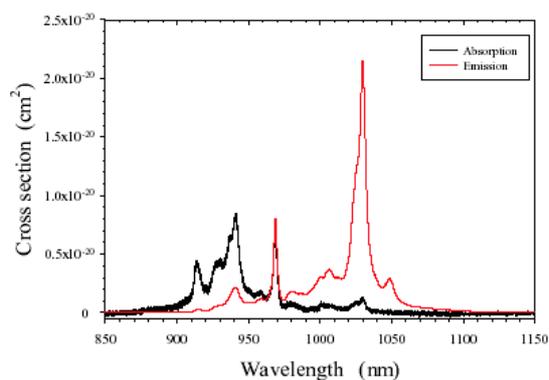


図4 : 1 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックスの吸収スペクトルと発光スペクトル。

を示す。スペクトルの測定には、安藤電気オプティカルスペクトルアナライザー AQ-6315A を使用した。

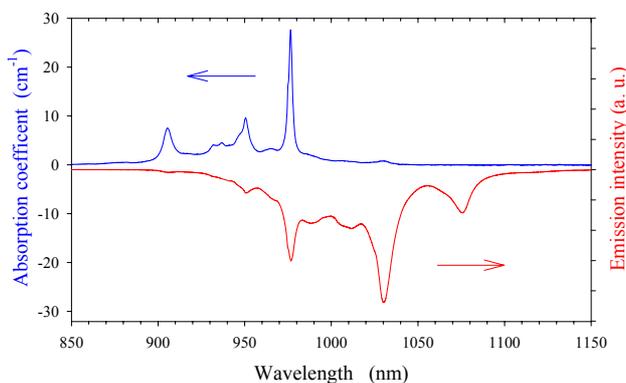


図5 : 4 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ セラミックスの吸収スペクトルと発光スペクトル。

3.3 $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ セラミックス

図6に、2.5 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ セラミックスの室温での吸収スペクトルと発光スペクトルを示す。スペクトルの測定には、安藤電気オプティカルスペクトルアナライザー AQ-6315A を使用した。

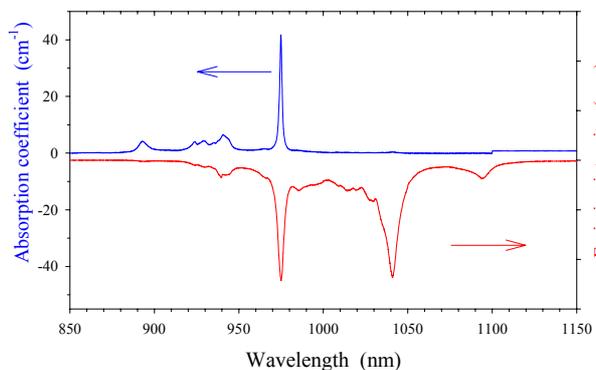


図6 : 2.5 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ セラミックスの吸収スペクトルと発光スペクトル。

4. レーザー発振実験

4.1 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックレーザー

1 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックスを用いて、LD の端面励起にてレーザー発振実験を行った。実験に用いた1 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックスの厚さは、1.6 mm で、コーティングはされていない。実験装置の概略図を図7 に示す。励起光源には、浜松ホトニクス社製のファイバーカップルLD を用いた。ファイバーのコア径は100 μm であった。励起光の集光には、 $f = 50 \text{ mm}$, $f = 30 \text{ mm}$ のレンズを使用した。レーザー共振器は、HR @ 1030 nm, AR @ 940 nm のコーティングがされた平面鏡と、曲率 $R=250\text{mm}$, 透過率 $T = 3 \% @ 1064 \text{ nm}$ の凹面鏡からなり、共振器長は約3cm であった。

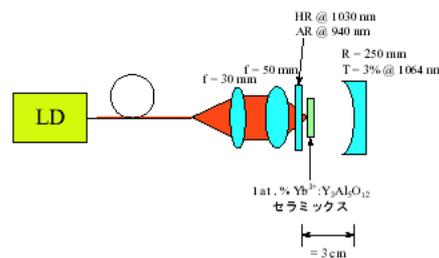


図7: $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックレーザーの実験装置概念図。

実験結果の吸収パワー-入力パワーのグラフとレーザー発振波長のグラフを図8 に示す。励起光の吸収パワー2.4 Wの時、レーザー発振波長1030nmで345mWの出力を得た。また、 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックレーザーの実験としては世界で初めて成功したものである。

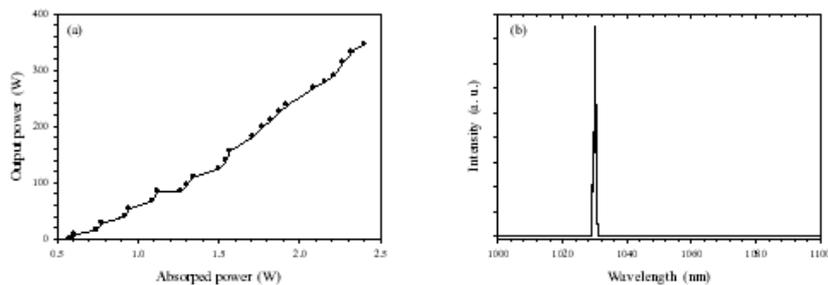


図8: $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックレーザー。(a) 出力特性、(b) レーザー発振波長。

4.2 $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ セラミックレーザー

8 at. % $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{O}_3$ セラミックスを用いて、LD の端面励起にてレーザー発振実験を行った。試料の厚さは、1.5 mm で、片面HR@ 1030 nm, AR @ 940 nm コーティング、もう片面AR @ 1030 nm コーティングであった。実験装置の概略図を図9 に示す。励起光源には、4.1と同じファイバーカップルLD を用いた。励起光の集光には、 $f = 50 \text{ mm}$, $f = 30 \text{ mm}$ のレンズを使用した。レーザー共振器は、HR @ 1030 nm, AR @ 940 nm のコーティングがされた試料の端面と、曲率 $R = 250 \text{ mm}$, 透過率 $T = 3 \% @ 1064 \text{ nm}$ の凹面鏡

からなり、共振器長は約2 cmであった。

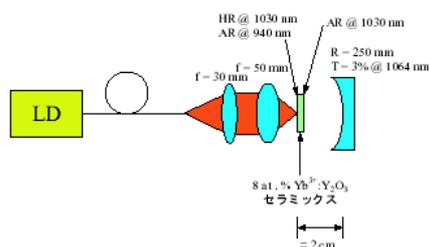


図9：Yb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ セラミックレーザーの実験装置概念図。

実験結果の吸収パワー-入力パワーのグラフとレーザー発振波長のグラフを図10に示す。励起パワー12.4 Wの時、レーザー発振波長1078 nm で1.5 Wの出力を得た。Yb³⁺:Y₂O₃ セラミックレーザーの実験としては世界で初めて成功したものである。

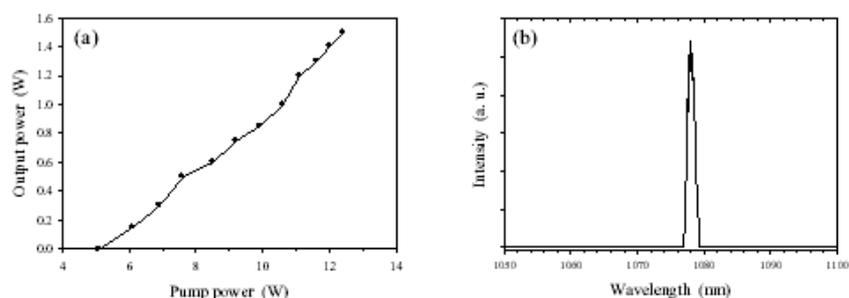


図10：Yb³⁺:Y₂O₃ セラミックレーザー。(a) 出力特性、(b) レーザー発振波長。

4.3 Yb³⁺:Sc₂O₃ セラミックレーザー

2.5 at. % Yb³⁺:Sc₂O₃ セラミックスを用いて、LD の端面励起にてレーザー発振実験を行った。試料の厚さは、3 mm で、コーティングはされていない。実験装置の概略図を図7と同じである。

実験結果の吸収パワー-入力パワーのグラフとレーザー発振波長のグラフを図11に示す。励起光の吸収パワー5.2 Wの時、レーザー発振波長1094 nm で420 mWの出力を得た。Yb³⁺:Sc₂O₃ セラミックレーザーの実験としては世界で初めて成功したものである。

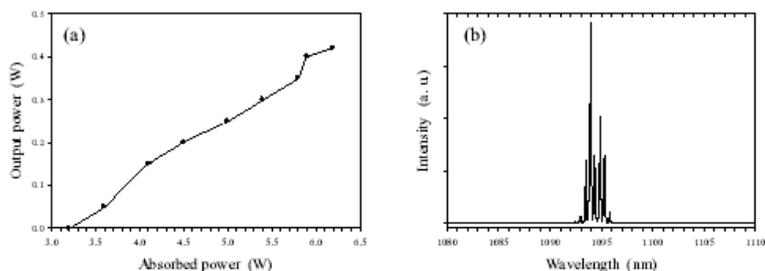


図11：Yb³⁺:Sc₂O₃ セラミックレーザー。(a) 出力特性、(b) レーザー発振波長。