

# Yb:CaF<sub>2</sub> セラミックスの CW レーザー発振

白川晃研究室 松岡智明

## 1. 序論

固体レーザーの利得媒質としてセラミックスは、単結晶と比べた際に機械的強度、高濃度添加時の均一性、作製可能な口径などの点で優れており、ガラスに対しても熱特性、機械特性で有利である。以上の特徴から、近年、セラミックスは高出力レーザーの媒質として単結晶・ガラスに置き換わる新しい固体利得媒質として期待されている。

本研究では、幅広い蛍光スペクトルと高い熱伝導性を兼ねた Yb:CaF<sub>2</sub> に Yb<sup>2+</sup> の発生防止のため La を微量添加した、共同研究先より新たに提供された La,Yb:CaF<sub>2</sub> セラミックスについて、その分光特性とレーザー特性を評価した。

## 2. 原理

Yb<sup>3+</sup> のエネルギー準位は以下に示すように、<sup>2</sup>F<sub>5/2</sub> と <sup>2</sup>F<sub>7/2</sub> の二つの準位がある。

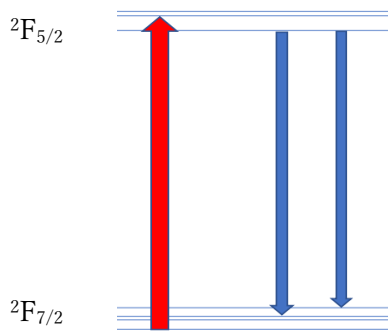


図1 Yb<sup>3+</sup> のエネルギー準位

吸収と放出が等しい遷移では三準位レーザーとして働くが、その他では準4準位レーザーとして働く。準4準位レーザーはレーザー終状態と基底状態が近いため3準位レーザー同様に励起パワーを必要とするが、量子効率が高く発熱が少ない特徴を有している。

この Yb<sup>3+</sup> を CaF<sub>2</sub> に添加すると、図2の特殊な6量体クラスター構造を生じることが知られている[1]。

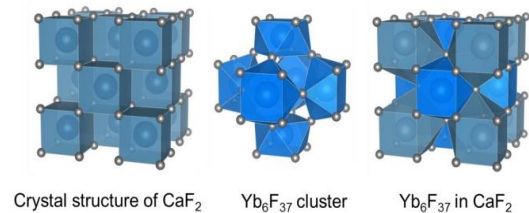


図2 Yb hexameric クラスター[2]

このクラスター構造が作られると、複雑な結晶場が希土類イオンのエネルギー準位に作用し、広い蛍光スペクトルが得られる。Yb:CaF<sub>2</sub> 単結晶の蛍光スペクトルを以下に示す。

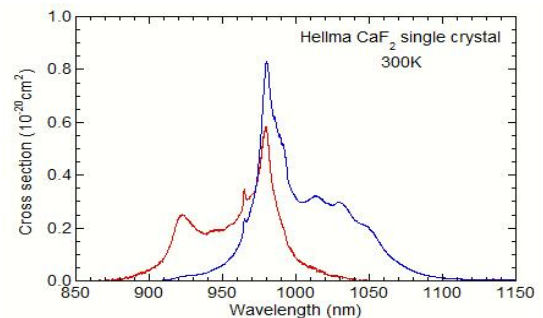


図3 Yb:CaF<sub>2</sub> 単結晶の蛍光スペクトル

この半値全幅は約 70nm である。

また、一般的に用いられる Yb 添加利得媒質のスペクトル幅と熱伝導率の関係は図 4 のようになっている。

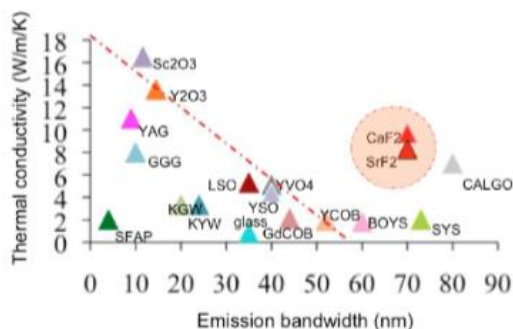


図 4 スペクトル幅と熱伝導率[3]

図 4 からわかるように、一般的に蛍光スペクトル幅が広がると熱伝導率が低くなるが、Yb:CaF<sub>2</sub>は広い蛍光スペクトルと高い熱伝導率を併せ持っている。したがって、高出力超短パルスレーザーの媒質に適しており、機械的強度に優れたセラミック材料にすることで Thin ディスクレーザーなどの強励起レーザーへの応用が期待できる。

### 3.実験

#### 3.1 分光特性評価

La,Yb:CaF<sub>2</sub>セラミックについて、その吸収スペクトルを光スペクトラムアナライザで測定した。測定には、図 5 の実験系を用いて行った。

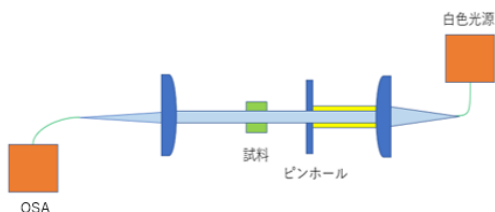


図 5 吸収スペクトル測定

光源から出た白色光を非球面レンズで平行光にし、光軸から遠く収差を無視できない光はピンホールによって除外した。光軸に対して入射面が垂直になるように試料を固定し、白色光を透過させた。透過光を光スペクトラムアナライザへ入力することで、白色光の試料透過後のスペクトルを測定した。この作業を、試料を外して同様に行うことで白色光のスペクトルも測定した。試料透過後の白色光スペクトルを  $I_1(\omega)$ 、白色光のスペクトルを  $I_2(\omega)$  とすると、試料の透過スペクトル  $T(\omega)$  は

$$T(\omega) = \frac{I_1(\omega)}{I_2(\omega)} \quad (1)$$

で表される。また、吸収係数  $\alpha$  [m<sup>-1</sup>] は

$$T = e^{-\alpha L(1-R)^2} \quad (2)$$

に代入することで求めた。反射率  $R$  は、吸光係数が 1200nm 付近で 0 になるよう決定した。L は試料の厚さ [m] である。

3 つの試料について吸収係数を測定し、以下の結果を得た。

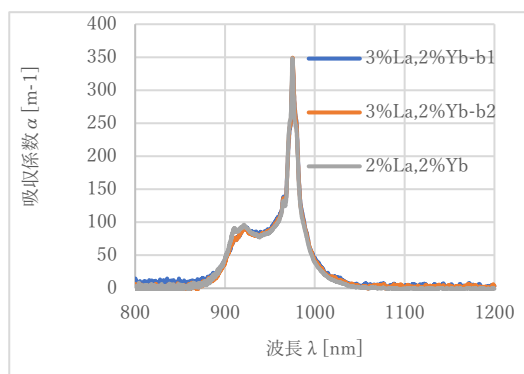


図 6 La,Yb:CaF<sub>2</sub>吸収スペクトル

図 6 から吸収スペクトルの概形は La3% 添加の結晶に比べて La2% 添加の結晶が波長 950nm 付近で吸収が弱まっていることが確認できた。

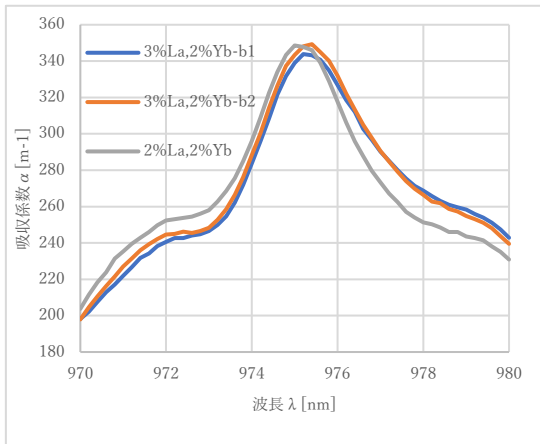


図7 La,Yb:CaF<sub>2</sub>吸収スペクトル拡大図

また、拡大すると、La2%に比べてLa3%が長波長側で吸収していることも確認できた。ピーク波長は約975nmであったので、通常を中心波長975nmLDによって励起可能であることがわかった。

### 3.2 レーザー特性

2%La,2%Yb: CaF<sub>2</sub>セラミックのCWレーザー発振における入出力を測定した。図8に実験系を示す。

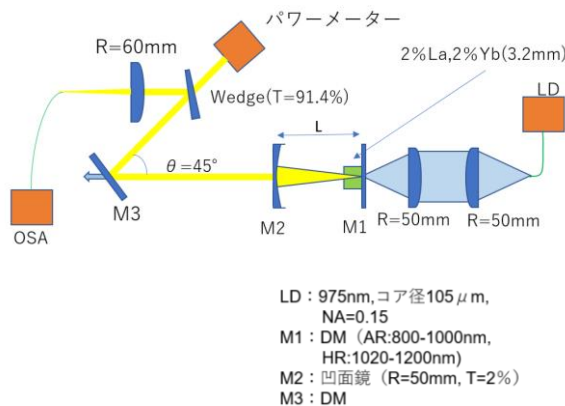


図8 La,Yb:CaF<sub>2</sub>セラミックレーザーCW発振実験系

LD から出射された励起光（中心波長975nm）は、平凸レンズ(R=50mm)でコリ

メイトされ、再び平凸レンズ(R=50mm)によって結晶へ集光される。M1、M2間で発振させ、M3のダイクロイックミラーによってレーザー光と励起光を分離させた。さらにレーザー光をWedgeによって分割し、発振スペクトルと光強度を同時に測定した。

共振器の安定条件は図9のようになる。

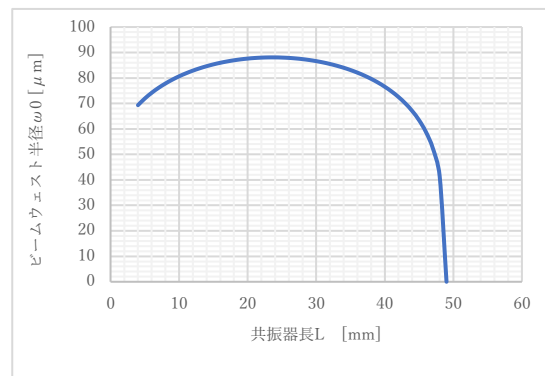


図9 共振器の安定条件

平凸レンズによって結晶へ集光されるビーム半径はファイバーのコア径の1/2であるので、52.5μmである。したがって図9より、共振器長47mm付近で共振器をアライメントし、発振を探した。また、測定毎に共振器長をアライメントすることで熱による屈折率の変化に対応した。その測定結果を図10に示す。

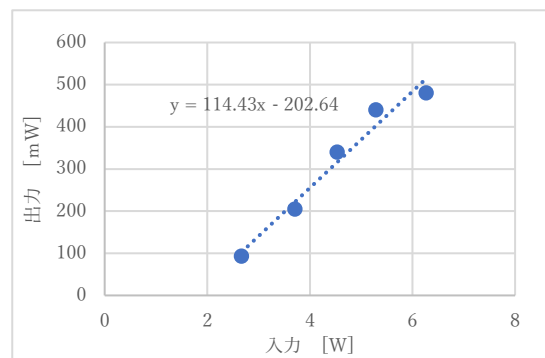


図10 CW発振入出力特性

このときのスロープ効率は対入力で 11.4%であった。また、発振閾値は 2.3W であった。スロープ効率は、過去に本研究室で同添加濃度のセラミック結晶で観測した対吸収での 54% [4]と比べて明らかに低い値となった。この要因として、OC の透過率が 2%と低い値であったこと、またセラミック結晶は焼結による作成の際に個体差が生じやすいことが考えられた。

また、発振スペクトルについてはレーザー発振強度 50mW、150mW、300mW の三点でそれぞれ測定した。この結果を図 11 に示す。

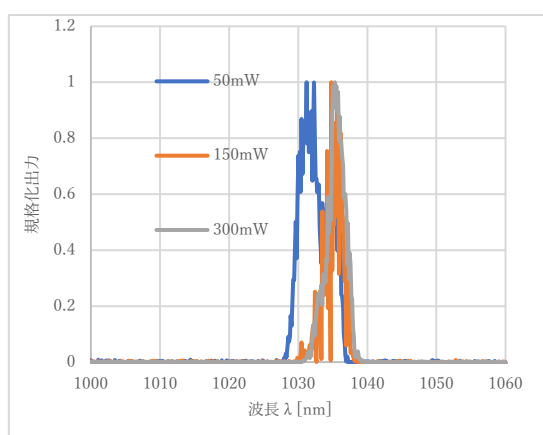


図 11 CW 発振スペクトル

図 11 から、2%La,2%Yb:CaF<sub>2</sub> の CW 発振スペクトルは 1035nm 付近であることが確認できた。また、発振出力によって波長が変化していることも確認できた。

## 4 結論と今後の展望

吸収スペクトルは、3%La,2%Yb:CaF<sub>2</sub> セラミック二つと 2%La,2%Yb:CaF<sub>2</sub> セラミック一つについて測定した。La の添加量

が等しい別個体ではスペクトルがほぼ一致したが、添加量が異なるとスペクトル形状が緩やかに変化することを確認できた。また、CW レーザー発振についてはスロープ効率が報告されているものより低かったものの、確認することができた。このとき最大効率は 11.4%であった。発振スペクトルは 1035nm 付近で、励起強度によって微小に変化することを確認した。

今後は励起用 LD の故障により行えなかった蛍光スペクトルの測定や、CW レーザー発振の出力を上げるために OC を替えて CW レーザー発振の出力増大を図る。また、発振中の吸収量を測定したうえで、対吸収の特性評価も行っていきたい。将来的には、SESAM やカーレンズ効果を利用してモード同期をかけた超短パルスレーザーの発振や、Thin ディスクレーザー発振への応用を目指す。

## 5 参考文献

- [1] M. Siebold, *et al.* “Yb:CaF<sub>2</sub>— a new old laser crystal,” *Appl. Phys. B* 97, 327–338, 2009.
- [2] 鈴木優哉, 電気通信大学大学院, 令和 2 年度 修士論文.
- [3] V.Petit, *et al.*, “Spectroscopy of Yb<sup>3+</sup>:CaF<sub>2</sub>: From isolated centers to clusters,” *Physical Review. B*, Vol. 78, No. 8, 2008.
- [4] 北島将太郎, 電気通信大学大学院, 平成 27 年度 修士論文.