

# Yb 添加 CaF<sub>2</sub> を用いたフェムト秒 カーレンズモード同期レーザーの開発

白川晃研究室 中村 聡

## 1. 序論

近年、超短パルスレーザーは非熱加工や微細加工、難加工材料の加工など様々な用途に利用されており、更なる高出力化、短パルス化の研究がされている。

本研究では広いスペクトル幅と高い熱伝導率を併せ持ち、高出力化、短パルス化の両立が期待されている Yb:CaF<sub>2</sub> 単結晶を用いて、カーレンズモード同期、可飽和吸収鏡 (SESAM) によるモード同期の 2 つの手法で超短パルスレーザーの研究を行った。

## 2. 原理

Yb 添加 CaF<sub>2</sub> は、図 1 に示すような螢石型の結晶構造を持つ CaF<sub>2</sub> に Yb を添加したものである。

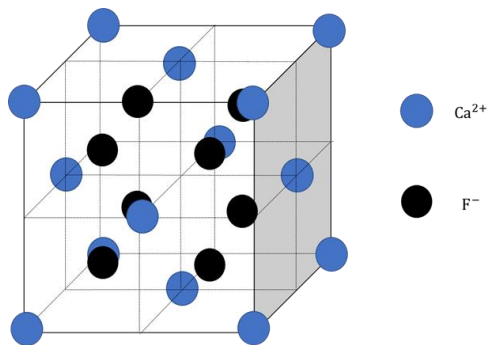


図 1 CaF<sub>2</sub> の結晶構造

CaF<sub>2</sub> の Ca<sup>2+</sup> を Yb<sup>3+</sup> に置換することから、イオンの価数が異なる。このような場合、添加濃度が増大すると、添加した希土類イオンが凝集しクラスターが形成される[1]。クラスターは複雑な結晶場を持っていることから、添加される希土類イオンのスペクトルの広帯域化に寄与し

ている。このような理由から Yb:CaF<sub>2</sub> は広くなめらかな蛍光スペクトルを有している。図 2 に Yb:CaF<sub>2</sub> の蛍光スペクトルと吸収スペクトルを示す。

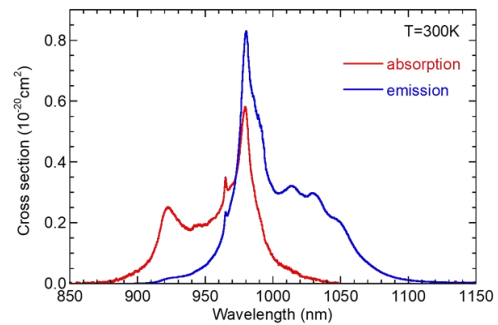


図 2 Yb:CaF<sub>2</sub> の蛍光、吸収スペクトル

Yb:CaF<sub>2</sub> の蛍光スペクトルは半値全幅で約 70 nm の幅を持つ。これは一般的に用いられる Yb 添加利得媒質と比べても広い幅を持つ。図 3 に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について示す[2]。

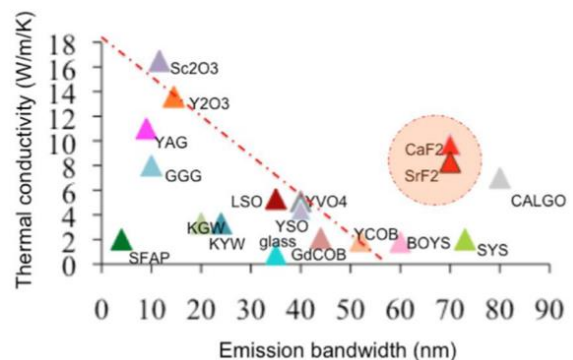


図 3 スペクトル幅と熱伝導率[2]

図 3 からわかるように、一般的に熱伝導率が高くなると蛍光スペクトル幅が狭くなるが、Yb:CaF<sub>2</sub> は高い熱伝導率と広い蛍光スペクトルを併せ持っている。

### 3. 実験

#### 3.1 CW 発振実験

カーレンズモード同期を実現するのに十分な出力が得られているか確認するため、図4のような系を組んで入出力特性を確認した。

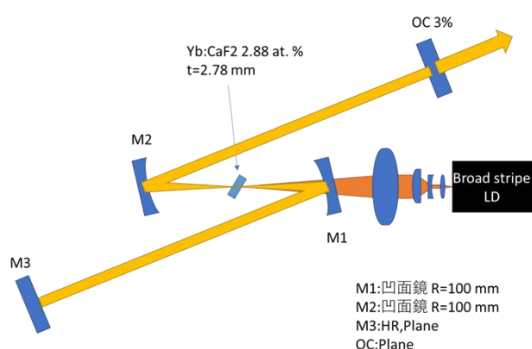


図4 CW 発振実験系

励起光源には中心波長 975 nm のブロードストライプ LD を用い、3 枚のレンズを用いてコリメイトし、 $f=70$  mm の凸面レンズにより集光した。スポットでのビーム径は縦  $121\mu\text{m}$  × 横  $41.3\mu\text{m}$  であった。共振器は曲率半径 100 mm の凹面鏡と透過率 3% の出力結合鏡、平板の HR から構成されている。凹面鏡の収差補償角が  $6.3^\circ$  と計算されたが、レーザー光が結晶ホルダーに接触してしまうことからそれぞれ凹面鏡への入射角を OC 側で  $9^\circ$ 、HR 側で  $8.7^\circ$  とした。結果として図5のような入出力特性を得た。励起 9.5 W 励起時にマルチモードでは最高 1900 mW、シングルモードでは 1400 mW の出力を得た。スロープ効率はマルチモードで 22.4 %、シングルモードで 16.7 % であった。CW 発振で大きな出力が得られたためカーレンズモード同期実験に移行した。

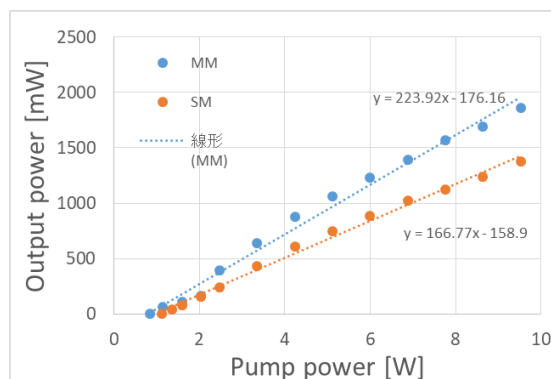


図5 CW 発振での入出力特性

#### 3.2 カーレンズモード同期発振実験

図6にカーレンズモード同期発振実験系を示す。

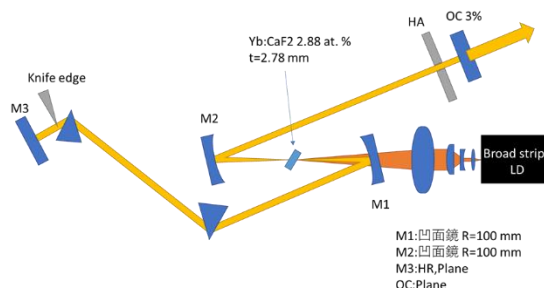


図6 カーレンズモード同期発振実験系

作製したモード同期発振実験系は、前節で作製した Z 型共振器に分散補償としてプリズム対をブリュースター角で挿入して伸ばしたものである。プリズム間距離は 370 mm から 510 mm の間で変化させた。このとき得られる負分散は共振器 1 周あたり約  $-2700$  fs<sup>2</sup> から  $-4200$  fs<sup>2</sup> であった。M1,M2,OC,HR はそれぞれ Z 型共振器で使用したものと同一である。マルチモード発振の抑制のため、OC 手前にハードアパーチャー(HA)を挿入し、発振波長の選択のために HR の手前にナイフエ

ッジを挿入した。結果としてモード同期を達成することができなかった。原因として考えられるのがプリズム対を挿入したことによる損失とアライメントが最適でない点あげられる。プリズム対を挿入した際、出力はマルチモード発振では 9.5 W 励起時最高で 900 mW, スロープ効率は 11.1 % であった。これはプリズム対を挿入する前と比べ半分以下の値となってしまうことからアライメントの最適化を図る必要がある。また今回使用した結晶での励起光の吸収率は約 59 % と低い値であったこと、Yb:CaF<sub>2</sub> の非線形屈折率が  $1.9 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$  であり代表的な利得媒質である Yb:YAG の非線形屈折率  $6.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ [3] の 3 分の 1 以下という小さな値であり、光カー効果が得にくいということも原因の一つであると考えられる。

### 3.3 SESAM モード同期発振実験

図 7 に SESAM モード同期発振実験系を示す。

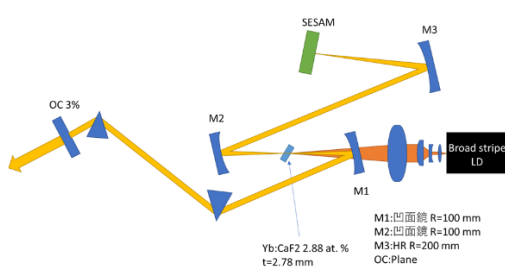


図 7 SESAM モード同期発振実験系

SESAM モード同期発振実験系は、カーレンズモード同期発振実験系の HR を OC3% に、OC3% を曲率半径 200 mm の HR に置き換え、その集光点に SESAM を

挿入したものである。SESAM の変調深さの値は約 0.4% である。プリズム間距離は 385 mm でこのとき得られる負分散は、共振器 1 周あたり約  $-2900 \text{ fs}^2$  であった。モード同期によって得られたスペクトルと自己相関波形を図 8 と図 9 に示す。

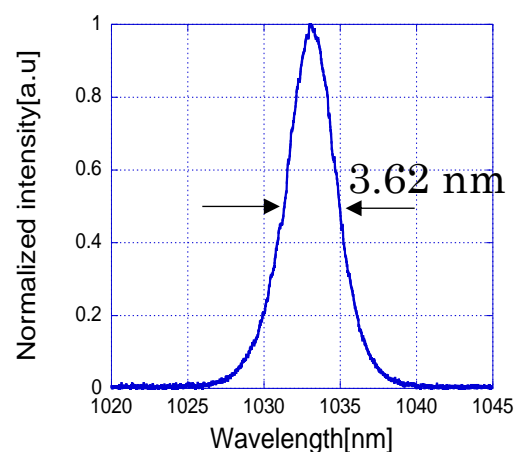


図 8 発振スペクトル

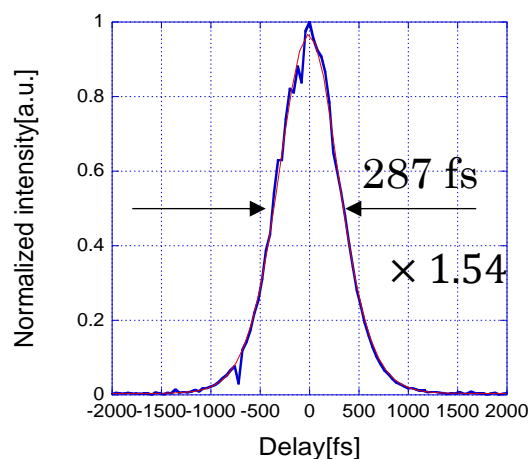


図 9 自己相関波形

モード同期はセルフスタートし、励起パワー 6.2 W 励起時に発振スペクトルの中心波長 1033 nm、半値半幅 3.62 nm、パルス幅 287 fs、平均出力約 190 mW を得た。このときの時間帯域幅積は 0.292 であり  $\text{sech}^2$  型でのフ

一リエ限界パルスの時間帯域幅積の値である 0.315 を下回ってしまったが、これは分散補償に用いたプリズム対によって波長の空間的チャープが発生し、スペクトルアナライザに全てのスペクトルが入らずスペクトル幅が狭まってしまったこと、発振スペクトルと自己相関波形を同時に測定していないことから生じてしまったエラーではないかと考えられる。上記の結果が得られた系でアライメントを最適化させたところ発振スペクトルの中心波長 1044 nm でモード同期がセルフスタートした。このときのスペクトルと自己相関波形を図 10 と図 11 に示す。

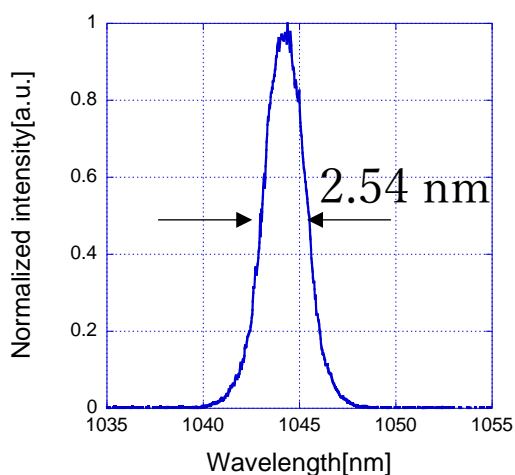


図 10 発振スペクトル

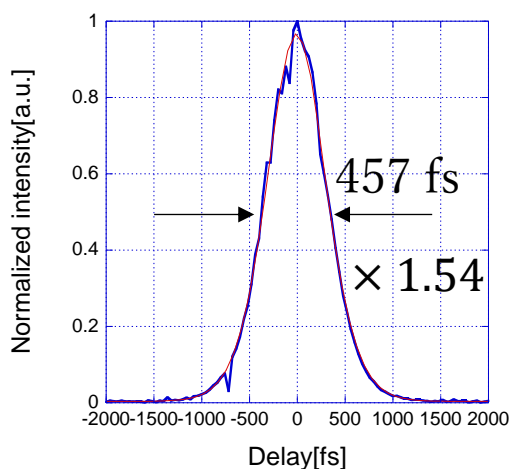


図 11 自己相関波形

発振スペクトルの半値全幅は 2.54 nm、パルス幅は 457 fs、平均出力は約 420 mW であった。このときの時間帯域幅積は 0.319 でありフーリエ限界パルスの時間帯域幅積に近い値が得られた。

アライメントにより発振波長がずれた要因として考えられるのは Yb:CaF<sub>2</sub> の蛍光、吸収スペクトルにあると考えられる。中心波長 1033 nm での発振では、光の放出と同時に光の吸収が生じていることから発振閾値が高い。そのためアライメントが最適に近づくにつれ発振が吸収がほぼ起きない長波長側にシフトする。アライメントが最適化された中心波長 1044 nm での発振の方が損失が少ないため、より高出力の発振が得られたと考えられる。

#### 4. まとめと今後の展望

カーレンズモード同期発振実験では発振が得られなかったため、今後はより高出力、カーレンズ効果増大をはかるために結晶厚が厚く、Yb 添加量の多い結晶を用いて実験を行っていきたい。SESAM モード同期実験では SESAM の変調深さを深くする、透過率の大きい出力結合鏡を用いる、最適な負分散を与えるなどをして更なる短パルス化を目指す。

#### 5. 参考文献

- [1] F. Druon, *et al.*, *Optical Materials Express* **1**, 489-502 (2011)
- [2] V. Petit, *et al.*, *Physical Review. B, Condensed matter* **78**(8) (2008)
- [3] R. Adair, *et al.*, *Phys. Rev. B* **39**, 3337 (1989).