

モード同期 $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ セラミックレーザーの研究

白川(晃) 研究室 北島 将太郎

1. 序論

超短パルスレーザーは短いパルス幅と高いピーク強度を持ち、非熱微細加工や高エネルギー物理等への応用が期待されている。高出力動作の実現のためには、利得媒質は優れた熱特性を持つことが要求される。媒質内部に生じる熱がうまく排出されなければ、熱レンズ効果や熱誘起複屈折といった熱光学的現象が生じ、レーザーの品質低下を招くためである。一般的な媒質は添加する Yb^{3+} イオン等の濃度の増加に伴い熱伝導率が急激に低下する。 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (以降 LuAG) は、 Yb^{3+} イオンの高濃度添加時の熱伝導率の低下は緩やかであり、更に一般的なレーザー材料である Yb:YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) と比較して大きな利得を持つので、高出力パルスレーザー・増幅器として適した材料である。またセラミックにすることで単結晶よりも高い機械特性をもち、大口径な材料も作製可能となる。本研究では Yb^{3+} 添加 LuAG セラミックを用いたモード同期レーザーの研究を行った。

2. 原理

2.1. Yb:LuAG セラミックの特性

LuAG は、レーザー媒質として一般的である YAG の Y を Lu で置き換えた結晶であり、YAG と同様のガーネット構造を持つ。YAG 等の一般的なレーザー媒質では、通常イオンの添加濃度の増加に伴い急激に熱伝導率が低下するという問題がある。これは置換される母材のイオンと添加される希土

類イオンの原子量が異なるため、希土類イオンが欠陥として作用しフォノンの平均自由行程が下がってしまうためにおきる。熱伝導率の低下の度合いは、原子量が違うほど顕著である。

図 1 に Yb:YAG と Yb:LuAG の単結晶、Yb:LuAG のセラミックの熱伝導率の添加濃度依存性を示す。

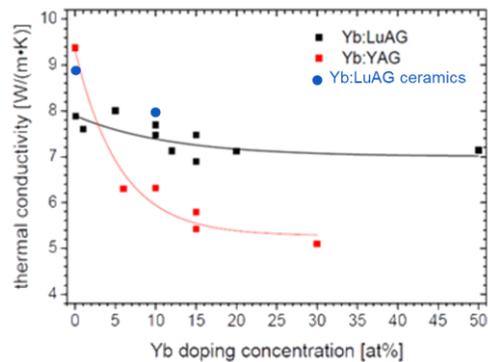


図 1 Yb:YAG, Yb:LuAG の熱伝導率の添加濃度依存性[1][2]

Yb:YAG の場合では Yb^{3+} (173 g/mol) は Y^{3+} (89 g/mol) と置換される。原子量の違いは大きく、熱伝導率は添加濃度の増加とともに急激に減少する。それに対し、Yb:LuAG では Lu^{3+} (175 g/mol) と置換される。原子量は非常に近いいため、高濃度添加時 (> 2-3%) の熱伝導率の低下はわずかであり、Yb:YAG よりも高い。またこの特性は Yb:LuAG においても同様の結果が得られている。これより Yb:LuAG は高濃度添加と高い熱伝導率の両立ができる、高効率・高出力なレーザーに向けた材料であるといえる。

図 2 に Yb:LuAG セラミックの吸収スペクトルと蛍光スペクトルを示す。

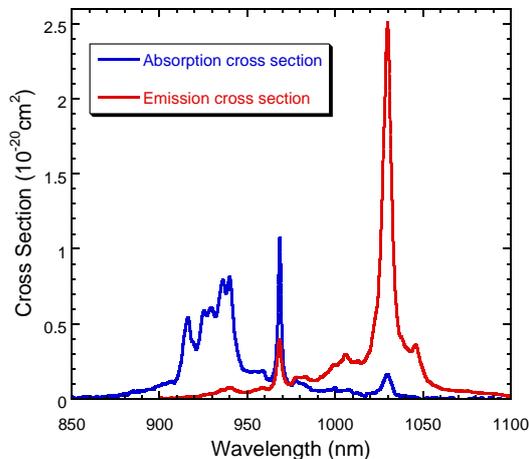


図 2 Yb:LuAG の吸収・蛍光スペクトル[2]

Yb:LuAG セラミックは 968nm 付近にゼロフォノンラインを持ち、吸収スペクトルの最も大きいピークはそれであるが、940 nm 付近にも吸収帯を持つ。この吸収帯は広帯域であるため、レーザーダイオード(LD)励起に適している。蛍光スペクトルは 1030 nm に主要なピークを持ち、半値全幅は 6.1 nm である。誘導放出断面積は Yb:YAG と比較して約 25% 大きな値であり、高出力レーザー・増幅器に適している。蛍光寿命は 1.07 ms である。

2.2. モード同期

超短パルスの発生手法の一つとしてモード同期がある。モード同期とは共振器中に利得変調や損失変調を加え、多くの縦モード間の位相関係を揃えることで実現される。具体的には可飽和吸収体を用いた受動モード同期が挙げられる。これは光のパワーに応じて透過率が変化するという性質を用いて共振器内に損失変調を加えモード同期を実現する。

他の受動モード同期の手法として光カー効果により起きるビームの自己収束とアパーチャーを用いるカーレンズモード同期がある^[3]。これは可飽和吸収体を用いたモード同期法と比べて深い変調幅が得られるため、より短いパルス幅を得られやすい。本来ならば媒質の非線形性さえ強ければカーレンズモード同期はそれ単体で実現されるはずだが、それに代表的な可飽和吸収体の一つである半導体可飽和吸収鏡(SESAM)を補助として用いることでより安定したモード同期が得られ、さらに自発的にモード同期が開始する系を構成することができる。

これまでの Yb:LuAG を媒質として用いたモード同期実験の研究では、SESAM を用いたモード同期により平均出力 200 mW、パルス幅 699 fs のパルスが得られていた^[2]。本研究ではより短いパルス幅を目指すため、媒質の幅を厚くし非線形性を増すことで、カーレンズモード同期の実現を目指した。

3. 実験

まずカーレンズモード同期の前段階として、高出力で安定した SESAM モード同期を目指した。

図 3 にモード同期実験系の概略図を示す。

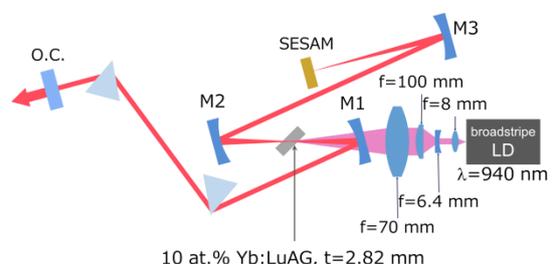


図 3 モード同期実験系

共振器の基本的な構成は Z 型共振器であ

り、共焦点共振器を構成する M1, M2 の間に、利得媒質として厚さ 2.82 mm の 10 at.% 添加 Yb:LuAG セラミックをブリュースター角で配置した。M1,M2 の曲率半径(ROC)はどちらも 100 mm である。励起光源には中心波長 940 nm のブロードストライプ LD を用いており、4 つのレンズによりコリメート、集光されている。結晶上での励起光のビーム径はおよそ $90 \times 40 \mu\text{m}$ 程であった。分散補償にはプリズム対を使用した。プリズム間の距離は 約 100 cm であり、共振器一往復で約 -7000 fs^2 の負分散量を補償した。SESAM は BATOP 社製の変調深さ $\Delta R \approx 1.2\%$ のものを用い、ROC 500 mm の凹面鏡(図中 M3)で集光した。出力結合鏡(O.C.)には透過率 5% のものを用いた。

この実験により得られた入出力特性の結果を図 4 に示す。

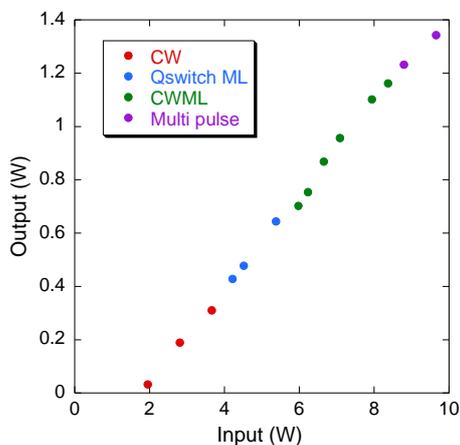


図 4 入出力特性

励起パワー 8.4 W のときシングルパルス CW モード同期の最大の平均出力 1.16 W を得た。図 5 にこの時のパルストレイン、図 6 に SHG 自己相関計を用いて測定した自己相関波形、図 7 にスペクトルを示す。得

られたパルス幅は、パルスの形を sech^2 と仮定してフィッティングすると 746 fs であった。スペクトル幅は 1.6 nm であった。このときの時間帯域幅積は 0.336 であり、これより得られた結果はフーリエ限界に近い状態だと分かる。

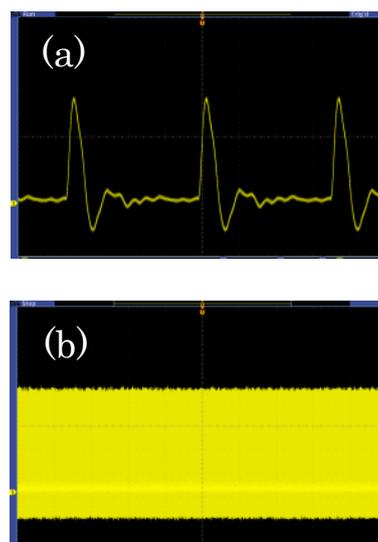


図 5 パルストレイン

(a) 4 ns/div のとき (b) 4 ms/div のとき

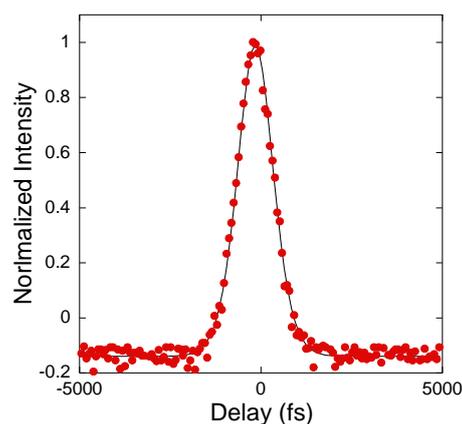


図 6 自己相関波形

共振器長に応じて決まる繰り返し周波数は 69.5 MHz であった。中心波長は再吸収の影響より、励起強度を上げていくほど長波

長側にシフトしており、励起パワー8.4 W のとき 1032 nm であった。

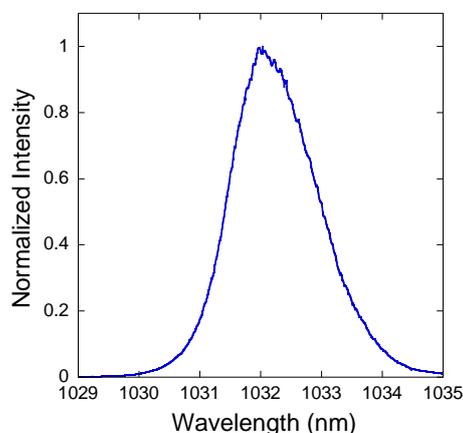


図7 スペクトル

Yb:LuAG の蛍光スペクトルの半値全幅 6.1nm という値は決して大きな値ではないため、これ以上の短パルス化のためにはやはりカーレンズモード同期により、更に深い変調幅を得る必要があるが、カーレンズモード同期には計算を駆使した緻密な共振器設計とシビアなアライメントを要するため、今回の実験においては実現することはできなかった。

しかし今回得られた最大の平均出力である 1.16W は SESAM モード同期においては十分に大きい値であり、これまでの研究で得られていた結果をはるかに上回るものである。またパルス幅もこれまでの研究で得られていた結果に近い値が得られた。よってこの共振器構成をもととして計算によりアパーチャーを挿入する位置を決め、M1, M2 と媒質の位置を適切に調整することでカーレンズモード同期を実現することが可能であると考えられる。

4. まとめと今後の展望

本研究では Yb:LuAG を媒質として用いて SESAM を補助としたカーレンズモード同期を目指した。結果カーレンズモード同期は実現できなかったものの、その前段階である高出力で安定した SESAM モード同期を実現することができた。そのとき表 1 の結果が得られた。

表 1 実験結果のまとめ

平均出力	1.16 W
スペクトル幅	1.6 nm
パルス幅	746 fs
時間帯域幅積	0.336
中心波長	1032 nm
繰り返し周波数	69.5 MHz

得られた値はこれまでの研究結果と比べ平均出力ははるかに大きく、パルス幅においても近い値であった。

今後は更に短いパルス幅を得るために改めて共振器設計を行い、カーレンズモード同期を目指す。

参考文献

- [1] K. Beil *et. al.*, in *Advanced Solid-State photonics 2009* (Denver, Feb. 2009), WB28
- [2] H. Nakao *et. al.*, *Optics express*, **20**, 14, 15385 (2012).
- [3] T. Brabec *et. Al.*, *Optics express*, **17**, 1292 (1992).