

新材料研究のための波長可変

チタンサファイアレーザーの開発

白川 晃研究室 小林 祐樹

1. 序論

超短パルスレーザーは非常に短い時間幅と高いピーク強度を持つことから、非熱微細加工などの産業分野への応用や、物理学の分野への応用が期待されている。

Yb:CaF₂-LaF₃ セラミックは、高出力超短パルスレーザーの媒質として期待され、我々のグループで研究を続けてきた。

本研究では Yb:CaF₂-LaF₃ セラミックを対象とし、この材料が持つ不均一広がりによる、蛍光スペクトルの励起波長依存性を確認するために、波長可変チタンサファイアレーザーを開発することを目的とした。

2. Yb:CaF₂-LaF₃ セラミック

本研究で扱ったセラミックは株式会社ニコンによって製作されたセラミックスである。この材料を作製するために用いられている原材料の一種である、Yb: CaF₂ 単結晶は蛍光帯域幅が約 70nm と広く、また大口径な試料も作成可能なことから、高出力長短パルスレーザーの媒質に期待される材料である。

Yb³⁺イオンが 1at.%以上 CaF₂ に添加されると、電荷補償を行う過程で図 1 に示すような Hexameric cluster と呼ばれる特殊な結晶構造に変化することが知られている。

このクラスター構造は量子効率の低下を引き起こすとされている。

また同時に十分な電荷補償が行われない場合には、レーザー発振に寄与しない Yb²⁺イオンが発生

する。La が共添加されることで Yb³⁺と La³⁺が置換され、Yb²⁺の発生が防がれると考えられている。

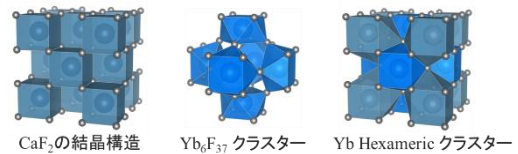


図 1 Yb Hexameric クラスタ [2]

先に示した様に、この材料には Yb だけでなく La のイオンが共添加されているため、添加される Yb の置換サイトには、La³⁺と Ca²⁺の 2 種類が存在する。同一の結晶中であるが、置換サイトによって Yb 周囲の結晶場は異なるので、異なる中心周波数を持つことになる、従ってこの材料は不均一広がり性の材料であると考えられる。図 2 に我々のグループが測定した、材料の吸収スペクトルを示す。

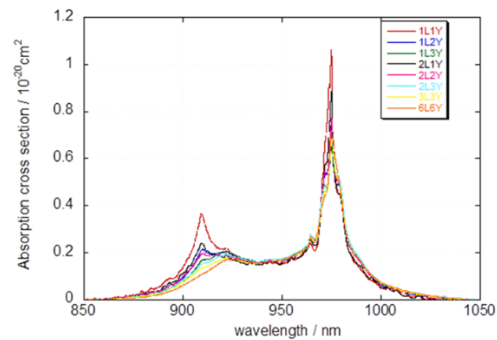


図 2 Yb:CaF₂-LaF₃ セラミックの吸収スペクトル

図 2 は La と Yb の添加濃度がそれぞれ異なる材料の吸収スペクトルである。主ピークは 910nm と 975nm 付近であるが励起に使用する波長付近 (960~980nm) には特徴的な蛍光スペクトルの形状が見られている。

この蛍光スペクトルの変化が不均一広がりによって得られていると考えられ、蛍光スペクトルに励起波長依存性が存在するか確かめる必要があった。そこで本研究では 960~980nm で波長可変なチタンサファイアレーザーの開発を目的とした。

3.チタンサファイア(Ti:Al₂O₃)

Al₂O₃ の Al³⁺イオンを Ti³⁺イオンに一部置換した結晶である。蛍光スペクトルが広く 600~1100nm である [1]。広い蛍光帯域を持つことから、波長可変素子を組み込むことで、波長可変レーザーとして使われる。

4. Ti:Al₂O₃ レーザー発振

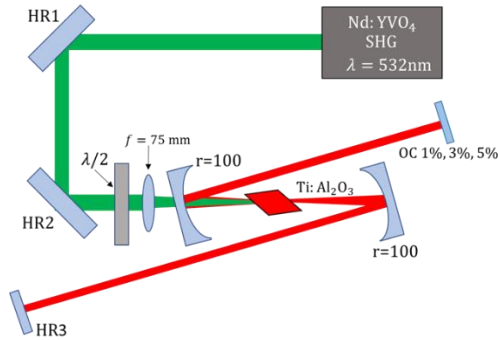


図 3 Ti:Al₂O₃ レーザー共振器

図 3 には Ti:Al₂O₃ レーザー発振の共振器を示している。本研究では Z 型共振器を用いて、利得媒質は厚さ 5.0mm の Ti:Al₂O₃ の結晶をブリュースター角(60.7°)で配置した。収差補償角は7.7°と計算された [2]。媒質を挟む凹面鏡には曲率半径が 100mm のものを使用し、結晶への集光には焦点距離が 75mm のレンズを使用した。出力結合鏡(OC)には透過率が 1%、3%、5%を取り替えながら使用した。励起光源には Nd:YVO₄ の第二次高調波である波長 532nm レーザーを用いた。高反射鏡である HR1、HR2 の 2 枚のミラーによって光学系の高さを 4 インチにした。HR3 の先に CCD を置くことでビームの状態を見られるようにした。2 枚の凹面鏡の距離は 105mm にした。

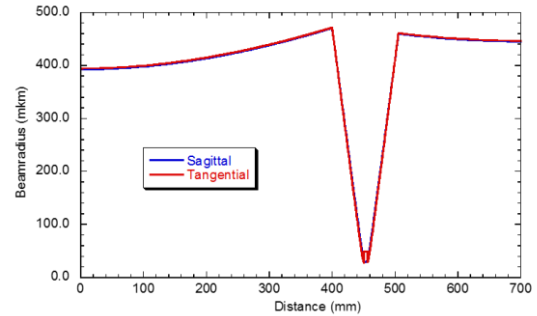


図 4 自己無撞着法によるビーム径

図 4 に自己無撞着法を用いて計算した共振器のビーム半径を示す。計算の結果、媒質中のビーム半径は約 25 μ m になった。また励起光は波長 532nm のとき集光位置において 27.5 μ m のビーム半径を持つことが計算された。

5. Ti:Al₂O₃ レーザー発振結果

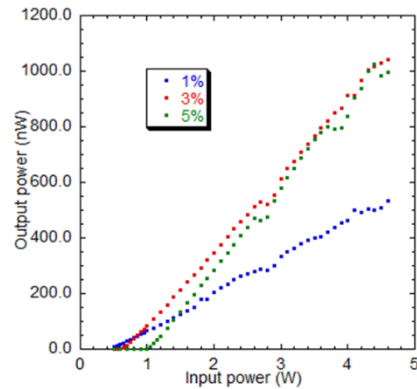


図 5 Ti:Al₂O₃ レーザーの入出力特性

図 5 には測定された Ti:Al₂O₃ レーザーの入出力特性を示した。励起出力は 4.0W にて共振器を最適化した。

図 5 より OC 1% 時の閾値は 0.50W 付近で最大の出力は励起 4.6W で 487mW であり、スロープ効率は約 12% だった。OC 3% 時の閾値は 0.65W 付近で、最大出力は励起 4.6W 時の 949mW、スロープ効率は約 24% だった。OC 5% 時の閾値は 1.05W 付近で、最大出力は励起 4.4W 時の 933mW、スロープ効率は 28% だった。

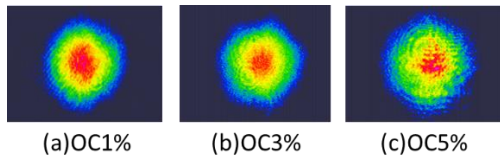


図 6 CCD で観測したビームプロファイル

図 6 よりビームのモードは共振器を最適化した際に TEM_{00} に近い形状が見られた。

波長可変素子なしの状態でも十分な出力を得ることが確認された。

6. 波長可変 $Ti:Al_2O_3$ レーザー

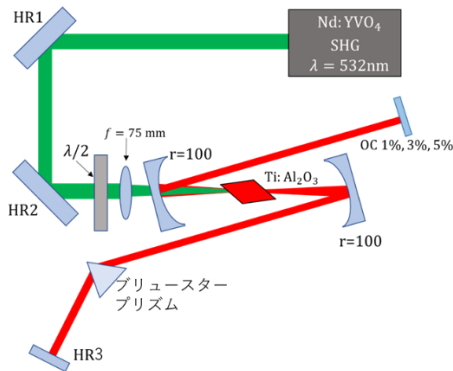


図 7 波長可変 $Ti:Al_2O_3$ レーザー共振器

図 7 は波長可変 $Ti:Al_2O_3$ レーザー共振器であり、ブリュースタープリズムを HR3 ミラーと片側の凹面鏡の間にブリュースター角で挿入した。波長変化は HR ミラーの微調整ねじを回転させることで可能にした。プリズムと HR3 の距離は 140mm である。

7. 波長可変性の測定結果

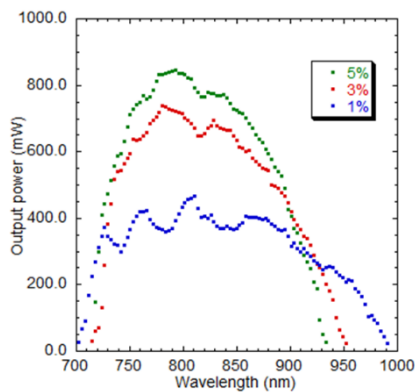


図 8 波長変化時の出力変化

図 8 は波長変化時の得られたレーザー出力であり、OC5%で波長 718nm から 931nm、OC3%では波長 715nm から 952nm、OC1%では波長 703nm から 991nm の範囲で出力が確認された。

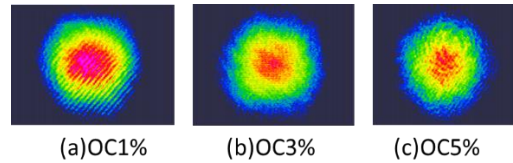


図 9 波長 800nm 時のビームプロファイル

図 9 よりビームのモードは共振器を最適化した際に TEM_{00} に近い形状が見られた。

波長変化した場合にも共振器の最適化によって同様のビームモードが得られる。

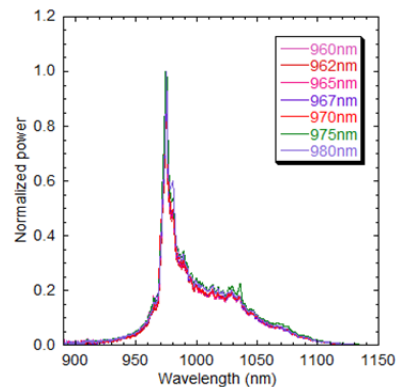
8. 励起波長変化時の蛍光測定

波長 960~980nm で変化させて蛍光スペクトルを確認した。測定に使用した材料は 1La1Yb, 1La2Yb, 1La3Yb, 2La1Yb, 2La2Yb, 2La3Yb の 6 種類である。

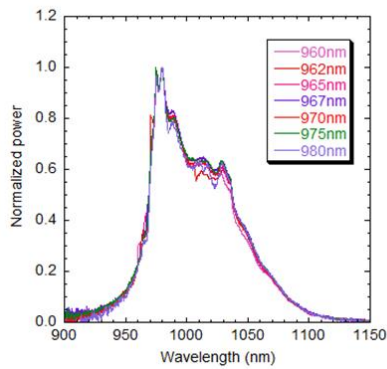
1La1Yb とは 1at.% の La と 1at.% の Yb が添加されているという意味を示している。

本研究ではチタンサファイアレーザーの開発を行っていたが、その途中で励起光源が故障した。そのためこの測定には他の波長可変 $Ti:Al_2O_3$ レーザーを使用した。

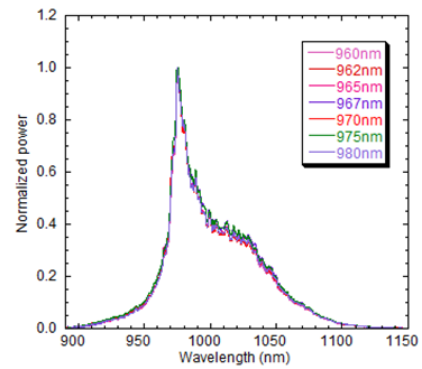
9. 励起波長変化時の蛍光測定結果



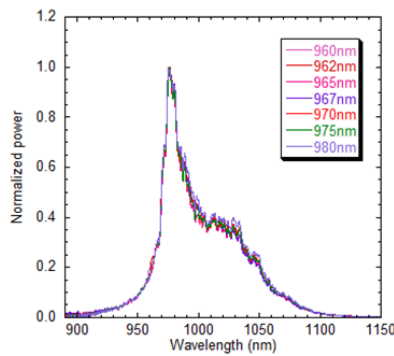
(a) 1La1Yb 蛍光スペクトル



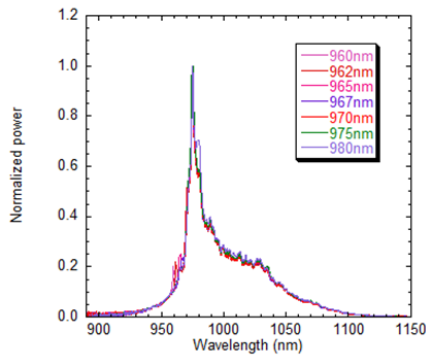
(b) 1La₂Yb 蛍光スペクトル



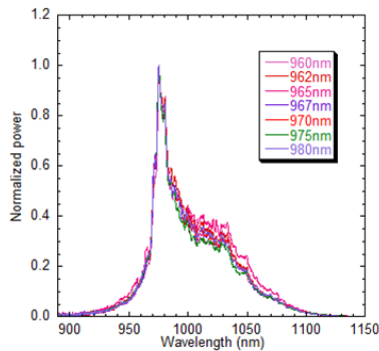
(f) 2La₃Yb 蛍光スペクトル



(c) 1La₃Yb 蛍光スペクトル



(d) 2La₁Yb 蛍光スペクトル



(e) 2La₂Yb 蛍光スペクトル

図 10 蛍光スペクトルの励起波長依存性

図 10 には各材料の励起波長依存性の測定結果を示した。励起波長変化による蛍光スペクトルの大きな変化は見られなかった。

常温において均一広がりの影響が不均一広がり
の影響より大きいことが考えられる。

10. 結論・今後の展望

波長 703nm から 991nm の範囲で出力可能な波長可変 Ti:Al₂O₃ レーザーを開発した。

Yb:CaF₂-LaF₃セラミックの蛍光スペクトルの励起波長依存性依存性は見られなかった。今後は低温環境下で均一広がりを抑えて蛍光スペクトルの励起波長依存性を測定したい。この測定によって Yb の置換サイトの同定につながると考えられる。

11. 参考文献

- [1] K.F.Wall , A.Sanchez, “Titanium Sapphire Lasers,” The Lincoln Laboratory Journal , vol. 3, p447-462, (1990).
- [2] H.Kogelnik, E.Ippen, A.Dienes, C.shank, “Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers,” IEEE J. of quant Electr. No.8 373, (1972).
- [3] 北島将太郎, “Yb 添加新材料を用いた高出力長短パルスレーザーの研究,” 平成 27 年度修士論文, 2016.