

Nd³⁺添加 Ba(Zr, Mg, Ta)O₃ セラミックレーザーの研究

白川晃研究室 B4 富田貴之

1. 序論

固体レーザーは超短パルスレーザー発振器・増幅器としての研究が盛んである。超短パルスレーザー用のレーザー材料としての特性には広い利得帯域幅、優れた熱特性や蛍光特性、機械特性が求められる。レーザー材料の特性は母材とそれに添加される希土類イオンによって決まるが、母材に依るところが大きく、その母材として近年ではセラミック材料が注目されている。

我々は、(株)村田製作所との共同研究で開発した透光性セラミックである Ba(Zr, Mg, Ta)O₃ セラミックを用いた研究を行ってきた。本研究では BZMT に Nd³⁺イオンを添加した Nd³⁺:a(Zr, Mg, Ta)O₃ を用いてレーザー特性を評価する。

2. 原理

2.1 Ba(Zr, Mg, Ta)O₃ について

BZMT セラミックはペロブスカイト構造を主結晶構造にもつ透光性セラミックである。A サイトに Ba, B サイトに Mg, Ta が 1:2 で存在する BMT 結晶では、B サイトが六方晶を構成し光学的異方体となることからセラミックを作製した際に不透明なものになってしまう。しかし、BMT 結晶の B サイトに Zr⁴⁺ を添加することで、規則的な配列を崩し無

秩序構造となることで、立方晶を構成することで光学的等方体となり、透明なセラミックを作製することが可能となった(図1)。

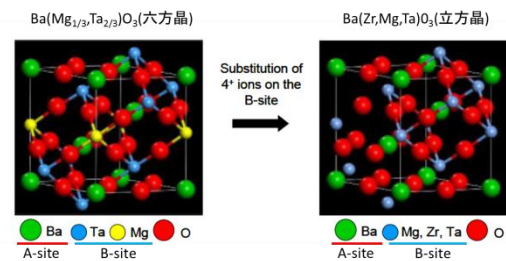


図1. 結晶構造

また、無秩序構造に希土類イオンを添加することで、多数の結晶場を受けるため利得スペクトルを広げることができる。また、組成調整によって希土類イオンを添加するサイトを A サイト、B サイト、A&B サイトに制御することが可能である。これまでの研究によって、A サイトに Nd³⁺ を添加したものが蛍光量子効率が最も良いことがわかっていいため、本研究においても A サイトに 1 mol. %Nd³⁺ を添加したものを使用した。

2.2 Nd³⁺:a(Zr, Mg, Ta)O₃ について

図2に本実験で用いた Nd³⁺:a(Zr, Mg, Ta)O₃ の吸収スペクトルを示す。本実験では発振波長 807 nm の LD を用いたが、Nd³⁺:a(Zr, Mg, Ta)O₃ では発振波長付近の吸収スペクトル幅が広く、LD 励起時の波長不安定性に対応

することが可能であるため、LDでの直接励起に適していると言える。

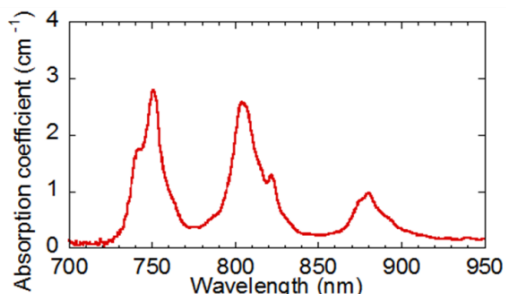


図 2. A-site 1mol. % Nd³⁺:Ba(Zr, Mg, Ta)O₃ 吸収スペクトル

また、蛍光スペクトル (図 3) も発振波長の 1062 nm を中心としてとても広く、利得スペクトル内に発振閾値を超える縦モードの数が増えるため、超短パルスを発振しやすくなることから、超短パルス動作に適していると言える。

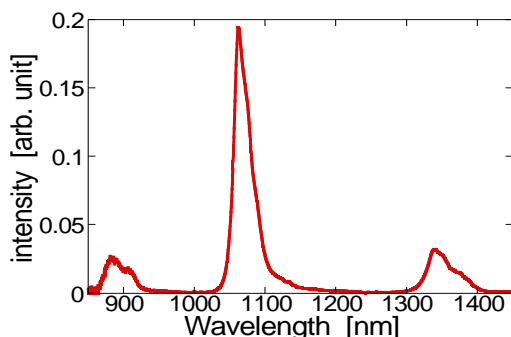


図 3. A-site 1mol. % Nd³⁺:Ba(Zr, Mg, Ta)O₃ 蛍光スペクトル

3. 過去の実験

3.1 過去の実験系

BZMT では過去にモード同期発振に挑戦していたが、安定した CW モード同期発振を得ることができなかった (図 4)。その原因として、共振器内に偏光選択素子がないこと、GTI ミラーによって共振器に与える負分散の

値が適切ではないことが疑われた。しかし、共振器内に偏光素子としてシリカプレートがブリュースター角で配置した後も安定した CW モード同期発振が得られなかったことから、BZMT を冷却ホルダー (図 5) に入れたことによる応力誘起複屈折の影響で共振器内の偏光が回ってしまっていることを疑い、偏光解消度測定によってその影響を調べた。

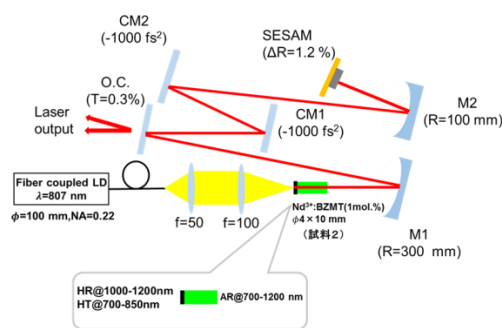


図 4. 過去の実験系



図 5. 冷却ホルダー

3.2 偏光解消度測定

偏光解消度は図 6 の実験系で測定をした。He-Ne レーザーから出射された光は結晶に対してビーム径が大きいので、ピンホールを入れて絞り、グランレーザープリズムで単一偏光にし、BZMT に入射し、ピンホールによって散乱光をはじき、検光子のグランレーザープリズムによって、ブ

リズムの向きが平行している時の最大強度 I_{max} と直行している時の最小強度 I_{min} を測定し、偏光解消度を求めた。測定した装置の測定限界は 1.11×10^{-4} であった。測定結果は表 1 のようで、ホルダーによる影響があったことが確認された。

このことより、ホルダーの締め付けによる影響を小さくするために、ホルダーの径を若干大きなものに変更し、固定ねじを締めすぎないように注意をすることで、無視できるほど小さい値とすることができたと考えられた。

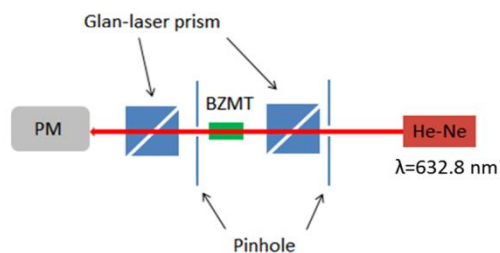


図 6. 偏光解消度測定実験系

表 1. 偏光解消度測定結果

	I_{max}	I_{min}	偏光解消度
BZMT (ホルダーなし)	1.89 mW	0.47 μ W	2.48×10^{-4}
BZMT (冷却ホルダー対策前)			0.1
BZMT (冷却ホルダー対策後)	1.97 mW	1.17 μ W	5.94×10^{-4}

4. 実験と結果

4.1 モード同期発振実験

本研究では SESAM を用いた受動モード同期レーザー発振実験を行った。図 7 に実験装置概念図を示した。利得媒質には Nd: BZMT を直径 4 mm、長さ 10 mm のロッド状に加工し、片面には High-Reflective (HR) コート

(1000–1200 nm)、High-Transmission (HT) コート (700–850 nm) もう片面には Anti-Reflective (AR) コート (700–1200 nm) を施したものを使用した。利得媒質の冷却には無酸素銅製の冷却ホルダーを用いて水冷による冷却を行った。励起には Laser Diode (LD, $\lambda=807$ nm, $\phi=100$ nm, NA=0.22) を用いた。出力透過鏡 (OC) の透過率は $T=1\%$ で、GTI ミラーを用いて負分散を与えた。また、共振器内にシリカプレートをブリュースター角 (55.4°) で配置し、単一偏光とした。GTI ミラーの組み合わせを変えることで共振器内の分散の量を変え、様々な分散の値 (1 pss あたり -2000 fs²、 -3150 fs²、 -3500 fs²、 -4650 fs²、 -6200 fs²) を与えた。パルス幅の測定には第二高調波自己相関計を用いた。

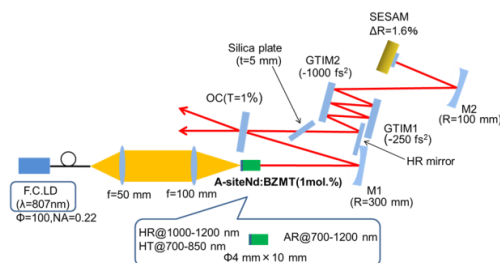


図 7. モード同期発振実験系

4.2 結果

GTI ミラーの組み合わせを変え、 $D=-3500$ fs² の分散を与えた時、最も短いパルス幅を得ることができた。その時の入出力特性は図 8 で、5.6W 励起時に図 9 のような最も安定した CW モード同期を得られ、69 mW の出力を得た。パルストレインの繰り返し周波数は 70.69 MHz であった。その時のスペク

トル幅は 1.9 nm (図 10 左) で、第二高調波自己相関計を用いて測定した自己相関波形より求めたパルス幅は sech^2 fit の場合、703 fs とこれまでの BZMT でのレーザー発振では最短のものを得られた。また、その他の与えた分散の値と得られたパルス幅との関係をグラフに表すと図 11 のようになった。

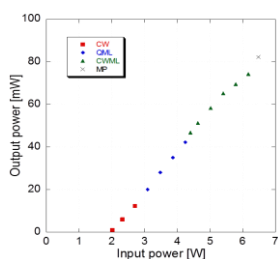


図 8. 入出力特性

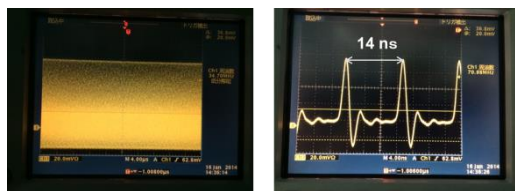


図 9. パルストレイン

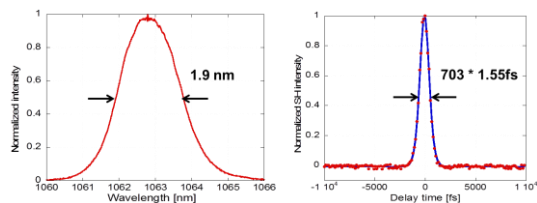


図 10. 発振スペクトル (左)、自己相関波形 (右)

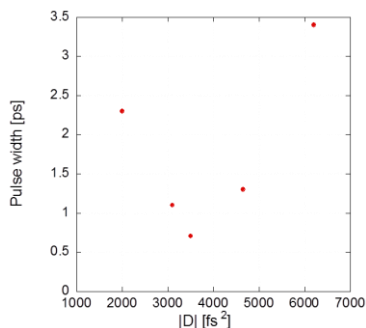


図 11. GTI ミラーにより与えた分散とパルス幅

4. 結論

BZMT でのレーザー発振としては最短のパルス幅を得ることができた。図 11 より -4000 fs^2 付近の分散を与えた時、より短いパルスを得ることができると推測される。

5. 展望

今後の展望としては、BZMT セラミックの高品質化による高出力化、共振器内の GDD の微調整が求められる。

6. 参考文献

1. S. Kuretake, N. Tanaka, Y. Kintaka, K. Kageyama, H. Nakao, A. Shirakawa, K. Ueda, A. A. Kaminskii “Nd-doped Ba (Zr, Mg, Ta)O₃ ceramics as laser materials” *Optical Materials* **36**(3):645-649 (2014).
2. 東祐軌他, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-A14, 同志社大学, (2013)