高効率・広帯域波長可変Yb:YAGセラミックレーザー

吉岡 宏晃¹, 中村 真毅¹, 小川 貴代², 和田 智之²

¹茨城大学大学院 メディア通信工学専攻 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

²理化学研究所 固体光学デバイス研究ユニット (〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1)

Efficient Broadly Tunable Yb:YAG Ceramic Laser

Hiroaki YOSHIOKA,¹ Shinki NAKAMURA,¹ Takayo OGAWA,² and Satoshi WADA²

¹Department of Media and Telecommunications Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University,
4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki 316-8511

²The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

(Received July 11, 2008)

A high-power efficient ceramic Yb:YAG laser was demonstrated at room temperature of 20 °C with a Yb concentration of 9.8 at. %, a gain medium of 1 mm, pumping power of 13.8 W, an output coupler of $T = 10\%$, and a cavity length of 20 mm. 6.8 W cw output power was obtained with a slope efficiency of 72 %. The ceramic Yb:YAG laser exhibited continuous tunability in a spectral range of 118.31 nm from 992.52 to 1110.83 nm for $T = 0.1\%$. This is the broadest tunability on Yb:YAG lasers.

Key Words: Yb:YAG, Ceramic laser, High efficiency, High power, Tunable

1. はじめに

真空焼結法¹⁻³⁾やナノサイズ微結晶作成技術³⁾によって作成されるセラミックのレーザー媒質は、単結晶の媒質と比較すると様々な利点をもっており非常に魅力的である。セラミックは大型サンプルの高速作成が容易であるが、単結晶の場合は困難である。セラミックのレーザー媒質はその多結晶性により多機能であり優れている⁴⁾。潜在的に、セラミックは短期間で作成でき、大量生産が可能であるので、単結晶よりもコストパフォーマンスに優れている。さらに、セラミックの作成に複雑な設備や技術を必要としない。1995年以来、多くのセラミックのレーザー媒質が開発され^{1,2)}、2000年にはNd:YAG(3.4 at. %)セラミックマイクロチップレーザーにおいて、同じサイズの単結晶Nd:YAGマイクロチップレーザーと比較して出力パワーが3倍であると報告された⁵⁾。また、低いNd添加濃度においてLD端面励起Nd:YAGセラミックレーザーの効率は単結晶Nd:YAGレーザーより高い。1998年以来、何種類ものセラミックレーザーが開発され、2001年にはNd:YAGセラミックレーザーが報告された⁶⁾。また、母材であるYAGセラミックには物理的な利点が多く存在する⁷⁾。YAGセラミックはYAG単結晶と比べ、10 %以上硬く、強度は3倍以上である。さらに、セラミックは単結晶と比べ熱衝撃に強い。Yb³⁺を添加したレーザー媒質はLD励起の固体レーザーとして非常に魅力的である⁸⁾。また、Yb³⁺を添加したレーザー媒質は、量子効率が高く、濃度消光が極めて少ない。これはYb³⁺イオンがシンプルな二

つだけのマンフォールド(基底準位²F_{7/2}, レーザー上準位²F_{5/2})を持つからである。これまでに、数多くのYb:YAG単結晶レーザーに関する研究が報告されている⁹⁻¹¹⁾。Yb:YAGは広帯域の吸収・蛍光バンドを持っている。近赤外線領域である広帯域の吸収バンドはLD励起に最適であり、広帯域の蛍光バンドは超短パルスの生成が可能である¹⁰⁾。しかし、Yb:YAGレーザーは準三準位もしくは準四準位レーザーであると知られており、レーザー遷移の終端である下準位マンフォールド²F_{7/2}のシュタルクレベルに有限の分布が存在し、レーザー下準位での再吸収を防ぐため高強度励起、高輝度励起光源、効果的な熱制御技術¹²⁻¹⁴⁾が要求される。最初のYb:YAGセラミック(C_{Yb} = 1 at. %)レーザーの発振では、cw出力パワー345 mW、スロープ効率26 %が報告され、その中で吸収・蛍光スペクトルについての報告がなされた¹⁵⁾。最近では、高出力のLDエッジ励起単結晶Yb:YAGレーザー、そして更にこの結晶のまわりに無添加YAGセラミックを組み込んだ複合型マイクロチップレーザーが実証された^{16,17)}。2007年の初めには、LDエッジ励起複合型全セラミックYb:YAG(C_{Yb} = 10 at. %)マイクロチップレーザーが実証され、cw出力パワー414 W、スロープ効率47 %が得られた¹⁸⁾。ここ最近では、高濃度添加(C_{Yb} = 20 at. %) Yb:YAGセラミックレーザーにより、cw出力パワー2.7 W、スロープ効率52 %が報告された¹⁹⁾。また我々は、コア径400 μmのファイバ結合LDによる端面励起Yb:YAG(C_{Yb} = 9.8 at. %)セラミックレーザーを用いてcw出力パワー5.5 W、スロープ効率52 %を報告した²⁰⁾。コア径100 μmのファイバ結合LDによる端面励

起Yb:YAGセラミックレーザーではスロープ効率79 %と高い効率が報告されている²¹⁾。しかし、その出力は1.7 Wである。

単結晶Yb:YAGレーザーの波長可変性については、いくつか報告されている²²⁻²⁴⁾。2000年には、透過率0.1 %の出力結合ミラー(OC)、複屈折フィルタを用いた単結晶Yb:YAGレーザーにおいて出力パワー160 mWで波長可変域84.5 nm(1024.1 nm~1108.6 nm)が報告された²³⁾。これまで、これがYb:YAGレーザーで最も広い波長可変域であった。その後2002年に、出力パワー180 mWの単結晶Yb:YAGレーザーで波長可変域59 nm(1021.9 nm~1081.2 nm)が報告された²⁴⁾。

2008年の初めに我々は、コア径200 μm のファイバ結合LDによる端面励起Yb:YAGセラミックレーザーでcw出力パワー6.8 W、スロープ効率72 %を達成し、さらにYb:YAGセラミックレーザーで初めて波長可変性について測定し、透過率 $T=0.1$ %のOCとSF10プリズムを用いて波長可変域63.5 nm(1020.1 nm~1083.6 nm)を報告した²⁵⁾。

本論文では、このcw出力パワー6.8 W、スロープ効率72 %の室温動作(20 $^{\circ}\text{C}$)の端面励起Yb:YAGセラミックレーザーについて更に詳しく報告し、さらに励起用の平面2色性ミラー(DM)を短波長側帯域の広いものと置き換えたことにより波長可変域を約30 nm広げ、透過率 $T=0.1$ %のOCを用いて従来²⁵⁾の約2倍の波長可変域118.31 nm(992.52~1110.83 nm)が得られたので報告する。単結晶²³⁾およびセラミックを含めたYb:YAGレーザー全てにおいて、この波長可変域は最も広帯域である。

2. 実験装置

Fig. 1にYb:YAGセラミックレーザーの実験装置を示す。波長940 nmのファイバ結合LD(JENOPTIK Laserdiode, JOLD-30-FC-12)を励起光源に用いた。ファイバのコア径は200 μm 、NAは0.22である。励起光はレンズL1($f=25$ mm)とL2($f=25$ mm)を用いて、セラミックに集光した。セラミックでの集光スポット径は ~ 200 μm である。

まず、高効率・高出力を得るために、DMとOCからなる直線型共振器を設計して実験を行った。DMは無反射(AR)コーティング800 nm~1000 nm、高反射(HR)コー

Fig. 1 Experimental setup for tunable Yb:YAG ceramic laser. LD: fiber-coupled diode laser; L1, L2: focusing lenses; DM: flat dichroic mirror; M: a concave mirror (ROC = 250 mm); OC: output coupler.

ティング1020 nm~1200 nmが施されている。OCは1030 nm~1037 nmで透過率 $T=10, 5, 1$ %のミラーを用いた。Yb:YAGセラミック($C_{\text{Yb}}=9.8$ at. %, 神島化学工業)は1030 nmでARコーティングが施され、 $5 \times 10 \times 1$ mm³のものを用いた。1 mm厚のYb:YAGセラミックはインジウムホイルで包み、銅の水冷ホルダーに取り付け冷却した。レーザー動作の間、水温は室温の20 $^{\circ}\text{C}$ に保たれた。直線型共振器での共振器長は20 mmに最適化された。励起光吸収パワーは、レーザー発振中には励起強度を増加させてもほぼ同じ吸収効率が保たれ、レーザー発振していない場合には励起強度を増加すると吸収効率は減少することが知られている^{12,13)}。本研究ではこの効果を考慮して励起光吸収パワーを定義している。

次に、波長可変性を測定するために、Fig. 1に示す凹面ミラー(M、曲率半径250 mm)を用いたV型共振器にSF10プリズムを挿入した実験装置を設計した。SF10プリズムは波長可変素子として用いられ、MとOCの間にプリズム角で挿入した。このときの共振器長は495 mmであった。また、広帯域の波長可変域が得られるように、DMにはARコーティング800 nm~1000 nm、HRコーティング1010 nm~1200 nmのミラーを用いた。以前に用いられたものは、ARコーティング800 nm~1000 nm、HRコーティング1020 nm~1200 nmであった^{20,25)}。OCは、透過率 $T=10, 5, 1$ %に加えて、1025 nm~1070 nmで透過率 $T=0.1$ %の4種類のミラーを用いて波長可変特性を測定した。

3. 実験結果

Fig. 2に透過率 $T=10, 5, 1$ %のOCそれぞれの励起光吸収パワーに対するレーザー出力を示す。透過率 $T=10, 5, 1$ %のOCそれぞれのレーザー発振しきい値の励起光吸収パワーは1.2, 2.0, 2.3 Wであり、励起光吸収パワー13.8 Wでの最大レーザー出力はそれぞれ6.9, 6.9, 6.8 Wであった。透過率 $T=10$ %のとき、発振波長は励起光吸収パワー

Fig. 2 Input-output power dependence of efficient Yb:YAG ($C_{\text{Yb}}=9.8$ at. %) ceramic laser with output couplers of $T=1, 5$, and 10 %.

を増加させるにつれて、1029.7 nm(励起光吸収パワー2.3 W)から1032.2 nm(励起光吸収パワー13.8 W)へ長波長側に変化した。透過率 $T=5\%$ のとき、励起光吸収パワー2.2 Wと5.1 Wの間で2波長同時発振²⁰⁾が見られ、発振波長は励起光吸収パワーを増加させるにつれて、1029.5 nm(励起光吸収パワー2.0 W)から1032.2 nm(励起光吸収パワー5.1 W)、また1048.6 nm(励起光吸収パワー2.2 W)から1050 nm(励起光吸収パワー13.8 W)へ長波長側に変化した。透過率 $T=1\%$ のとき、発振波長は励起光吸収パワーを増加させるにつれて、1049.5 nm(励起光吸収パワー1.2 W)から1056.2 nm(励起光吸収パワー13.8 W)へ長波長側に変化した。共振器内の往復損失 L はレーザー発振しきい値とOCの反射率より0.09と見積もられ²⁶⁾、1 mm厚のレーザー媒質で小信号利得係数 g_0 は 2.0 cm^{-1} 、1パスの利得 G は1.2である。透過率 $T=10, 5, 1\%$ それぞれの線形近似直線をFig. 2に示す。透過率 $T=10, 5, 1\%$ それぞれのスロープ効率 η_{slope} は60, 64, 72%である。最も高いスロープ効率72%を得た透過率 $T=10\%$ のときの最大出力は6.8 W(励起光吸収パワー13.8 W)で、光-光変換効率 $\eta_{\text{opt-opt}}$ は49%であった。直線型共振器でのレーザービームプロファイルをFig. 3 (a), ガウス分布のフィッティングをFig. 3 (b)~(c)に示す。このとき、ガウス分布のフィッティングレートは、 x 軸方向で0.996、 y 軸方向で0.994であった。従って、レーザービームはガウスビーム(TEM₀₀モードビーム)であることが分かる。

高出力、高効率、高品質ビームは共振器長を最適化することによって実現した。Fig. 4に共振器長と最大レーザー出力パワーの関係を示す。Fig. 4より共振器長は20 mm以下で最適化されると考えられる。この20 mmの共振器長は用いた実験装置の都合上、最小の値となる。従って、さらに共振器長を短くすることができれば、さらなる高出力パワー、高効率が見られるレーザー共振器に最

Fig. 3 Transverse intensity profile of the Yb:YAG ceramic laser beam: (a) Beam image. (b) Beam profile along x . (c) Beam profile along y . The intensity distribution indicates that the beam is a Gaussian beam (a TEM₀₀ mode beam).

Fig. 4 Maximum output power as function of cavity length of efficient Yb:YAG ceramic laser.

適化できると考えられる。

レーザー発振の波長可変特性は、熱レンズ効果を考慮した共振器を設計して、励起光吸収パワー13.8 Wのもと測定した。ファブリ・ペロー共振器長が熱レンズの焦点距離を越えたとき、共振器は不安定となりレーザー発振が終わるので、Fig. 4より熱レンズの焦点距離は109 mm(共振器長120 mmよりレーザー媒質とDMの間の距離を除いた値)であると言える。この熱レンズ効果を考慮して凹面ミラー(M, 曲率半径250 mm)とSF10プリズムを用いたV型共振器を設計した。これをFig. 1に示した。SF10プリズムは波長可変素子としてMとOCの間にプリュスター角で挿入した。共振器長は495 mmである。

Fig. 5に励起光吸収パワー13.8 Wのときのレーザー発振波長に対するレーザー出力パワーの波長可変特性を透過率 $T=10, 5, 1, 0.1\%$ のOCを用いた場合についてそれぞれについて示す。Fig. 5はそれぞれの波長で得られた最も高いレーザー出力パワーをプロットした。スペクトルの

Fig. 5 Output power of ceramic Yb:YAG tunable laser as function of oscillation wavelength for various output couplers.

強度は波長1010 nm, 1030 nmおよび1050 nm近傍に現れており, 強度が最大のピークは1030 nm近傍に存在する. また, 波長1020 nm近傍では出力パワーの減少が見られる. これはFig. 6に示す蛍光スペクトル²¹⁾において, 波長1020 nm近傍でスペクトルの強度が弱いことが起因していると考えられる. さらに, 波長1045 nmでも同様の減少が見られる. 透過率 $T = 10\%$ のOCを用いたとき, 999.48 nm~1052.12 nmの波長可変域52.64 nmを得た. このとき, 波長1031.78 nmで最大出力パワー4.41 Wを得た. 透過率の低い $T = 5\%$ のOCを用いたとき, 996.75 nm~1074.58 nmの波長可変域77.83 nmを得た. このとき, 波長1034.14 nmで最大出力パワー3.63 Wを得た. さらに透過率の低い $T = 1\%$ のOCを用いたとき, 994.35 nm~1098.87 nmの波長可変域104.52 nmを得た. このとき, 波長1031.99 nmで最大出力パワー1.40 Wを得た. 最も広い波長可変域を得たのは透過率 $T = 0.1\%$ のOCを用いたときで, 992.52 nm~1110.83 nmの波長可変域118.31 nmを得た. このとき, 波長1033.42 nmで最大出力163 mWを得た.

透過率の低いOCを用いることにより, 波長可変域が広がった. 以前我々が測定した波長可変域63 nm (1027.4 nm~1090.7 nm)は, ARコーティング800 nm~1000 nm, HRコーティング1020 nm~1200 nmのDM, 1025 nm~1030 nmで透過率 $T = 0.1\%$ のOCを用いた²⁵⁾. このとき, レーザー発振の最短波長および最長波長は, 再吸収損失とDMとOCの反射コーティング特性によって制限されたと考え, 本研究ではARコーティング800 nm~1000 nm, HRコーティング1010 nm~1200 nmのDM, および1025 nm~1070 nmで透過率 $T = 0.1\%$ のOCを用いて短波長・長波長側双方のレーザー発振波長の広帯域化をねらい, 波長可変域118.31 nm (992.52 nm~1110.83 nm)を得た. Fig. 7とFig. 8に透過率 $T = 0.1\%$ のOCを用いたときの各波長でのレーザービームプロファイルを示す. Fig. 7はFig. 5と同じ最も高い出力が得られたとき, そしてFig. 8は横モードをシングルモードになるようにアライメントしたときのレーザービームプロファイルである. Fig. 7 (b)~(c)に示すように, 波長が1030 nm~1050 nm付近では, 出力パワーを

Fig. 6 Emission intensity of Yb:YAG ceramics ($C_{Yb} = 9.8$ at. %) at room temperature.²¹⁾

Fig. 7 Transverse intensity profile of the Yb:YAG ceramic laser beam in the tunable operation with output coupler of $T = 0.1\%$. (a), (b), (c) and (d) were measured at the same output powers on the tuning curve of Fig. 5.

Fig. 8 Transverse intensity profile of the Yb:YAG ceramic laser beam in the tunable operation with output coupler of $T = 0.1\%$. (a) and (b) were measured when the beam quality was optimized with an output power reduction.

最も高く調節したときビームはマルチ横モードとなった. 波長1030 nm~1050 nm付近では, ビームをFig. 8 (a)~(b)のようにシングル横モードに最適化したとき, 1031 nmで~100 mW, 1050 nmで~76 mWに出力パワーが減少した. 共振器の最適化により, 高いビーム品質を維持しつつ高い出力パワーを得られることが期待される. 波長1030 nm~1050 nm以外の波長では, Fig. 7 (a)およびFig. 7 (d)のようにシングル横モードでのレーザー発振のみが観測され, マルチ横モード発振は見られなかった.

4. 結 論

室温(20 °C)発振で高効率かつ広帯域波長可変の端面LD励起Yb:YAGセラミックレーザーを開発した. Ybの添加率

9.8 at. %の1 mm厚Yb:YAGセラミックをレーザー媒質に用いた．共振器長2.0 cmの直線型共振器において，透過率 $T = 10\%$ のOCを用いることにより，励起光吸収パワー13.8 Wのとき最大出力パワー6.8 W，スロープ効率 $\eta_{\text{slope}} 72\%$ ，光-光変換効率 $\eta_{\text{opt-opt}} 49\%$ を得た．V型共振器にSF10プリズムを挿入した共振器において，透過率 $T = 0.1\%$ のOCを用いて，992.52 nm～1110.83 nmの広帯域の波長可変域118.31 nmを得た．このとき，波長1033.42 nmで最大出力パワー163 mWを得た．我々の知る限り，結晶およびセラミックのYb:YAGにおいて最も広い波長可変性である．この広い波長可変域を用いたフェムト秒パルスレーザーの開発や，分光応用が今後期待される．

謝 辞

本研究で用いたレーザービームプロファイラは，(株)メガオプトの畑中 秀和博士に貸与して頂きました．畑中 秀和博士に感謝致します．

参考文献

- 1) A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata, and K. Yoshida: J. Am. Ceram. Soc. **78** (1995) 1033.
- 2) A. Ikesue, T. Kinoshita, and K. Yoshida: J. Am. Ceram. Soc. **79** (1996) 1921.
- 3) J. Lu, M. Prabhu, J. Song, C. Li, J. Xu, K. Ueda, A. A. Kaminskii, H. Yagi, and T. Yanagitani: Appl. Phys. B **71** (2000) 469.
- 4) T. Taira: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **13** (2007) 798.
- 5) I. Shoji, S. Kimura, Y. Sato, T. Taira, A. Ikesue, and K. Yoshida: Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 939.
- 6) J. Lu, T. Murai, K. Takaichi, T. Uematsu, K. Misawa, M. Prabhu, J. Xu, K. Ueda, T. Yanagitani, H. Yagi, A. A. Kaminskii, and A. Kudryashov: Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 3586.
- 7) A. A. Kaminskii, M. Sh. Akchurin, V. I. Alshits, K. Ueda, K. Takaichi, J. Lu, T. Uematsu, M. Musha, A. Shirakawa, V. Gabler, H. J. Eichler, H. Yagi, T. Yanagitani, S. N. Bagayev, J. Fernandez, and R. Balda: Crystallogr. Rep. **48** (2003) 515.
- 8) W. F. Krupke: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **6** (2000) 1287.
- 9) P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan: Opt. Lett. **16** (1991) 1089.
- 10) C. Hönniger, G. Zhang, U. Keller, and A. Giesen: Opt. Lett. **20** (1995) 2402.
- 11) D. S. Sumida, H. Bruesselbach, R. W. Byren, M. Mangir, and R. Reeder: Proc. SPIE **3265** (1998) 100.
- 12) S. Matsubara, T. Ueda, S. Kawato, and T. Kobayashi: Jpn. J. Appl. Phys. **46** (2007) L132.
- 13) Y. Sato and T. Taira: IEEE J. Quantum Electron. **40** (2004) 270.
- 14) T. Shoji, S. Tokita, J. Kawanaka, M. Fujita, and Y. Izawa: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L496.
- 15) K. Takaichi, H. Yagi, J. Lu, A. Shirakawa, K. Ueda, and T. Yanagitani: Phys. Stat. Sol. A **200** (2003) R5.
- 16) M. Tsunekane and T. Taira: Jpn. J. Appl. Phys. **44** (2005) L1164.
- 17) M. Tsunekane and T. Taira: Opt. Lett. **31** (2006) 2003.
- 18) M. Tsunekane and T. Taira: Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 121101.
- 19) J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii: Opt. Lett. **32** (2007) 1890.
- 20) S. Nakamura, Y. Matsubara, T. Ogawa, and S. Wada: Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 2149.
- 21) J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, and A. A. Kaminskii: Appl. Phys. Lett. **89** (2006) 091114.
- 22) U. Brauch, A. Giesen, M. Karszewski, Chr. Stewen, and A. Voss: Opt. Lett. **20** (1995) 713.
- 23) J. Saikawa, S. Kurimura, N. Pavel, I. Shoji, and T. Taira: *Advanced Solid-State Lasers* (OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 34, eds. H. Ingeyan, U. Keller, and C. Marshall, OSA, Washington D. C., 2000) p. 106.
- 24) J. Saikawa, S. Kurimura, I. Shoji, and T. Taira: Opt. Mater. **19** (2002) 169.
- 25) S. Nakamura, H. Yoshioka, Y. Matsubara, T. Ogawa, and S. Wada: Opt. Commun. **281** (2008) 4411.
- 26) W. Koechner: *Solid-State Laser Engineering*, 3rd ed. (Springer, Berlin, 1992) p.101.