

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 9 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21604002

研究課題名（和文） 低コスト省エネ型超短パルスレーザーシステムの開発

研究課題名（英文） Development of low cost efficient ultrashort pulse laser system

研究代表者

中村 真毅（NAKAMURA Shinki）

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90323211

研究成果の概要（和文）：

半導体可飽和吸収鏡とプリズム対を用いたモード同期 Yb:YAG セラミックレーザーを国内外で初めて開発した。さらに、このレーザーを適当に調整することにより、2 波長同時モード同期パルスを国内外で初めて観測した。また、これらのレーザーは出力平均パワーが 20 mW と小さかったのでプリズムを分散補償ミラーに交換し、高出力化を試み、3.9 W という国内外で最も高い平均出力パワーを得た。最後に低分散ファイバ伝搬実験を行った。

研究成果の概要（英文）：

A diode-pumped passively mode-locked Yb:YAG ceramic laser was demonstrated. We successfully achieved passive mode locking. To the best of our knowledge, this is the first mode-locked Yb:YAG ceramic laser, and the shortest pulse for diode-pumped ceramic lasers without Kerr lens mode locking was obtained. However, the average output power of laser was low as 20 mW. Furthermore we experimentally demonstrated a dual-wavelength independently mode-locked Yb:YAG ceramic laser in a single cavity. Next, we obtain the average power of 3.9 W by replaseing a prism pair by dispersion compensation mirror. To our knowledge it is the highest power. Finally, the ultrashort highpower laser pulse was propagated in a low-dispersion fiber propagation and super continuum was generated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：レーザー

科研費の分科・細目：時限・量子ビーム科学

キーワード：イッテルビウム、セラミック、超短パルス、フェムト秒、レーザー

1. 研究開始当初の背景

Yb:YAG 単結晶レーザーの研究はなされていたが、Yb:YAG セラミックレーザーの研究はあまりなされてなかった。特に超短パルスを発生するモード同期レーザーにおいてYb:YAG セラミックを用いたものはなかった。また1 μm 帯光源が少なく、この帯域でのスーパーコンティニウム光の発生は詳しく解明されていなかった。

2. 研究の目的

(1) モード同期 Yb:YAG セラミックレーザーの開発を行うことが第一の目的である。

(2) 第二の目的はこのレーザー光をファイバ圧縮をした後にさらにファイバ伝搬を行い、これまで提唱してきた新しいビーム伝搬解析手法と実験結果との比較を目的とする。

① スーパーコンティニウム光を発生する。

② スーパーコンティニウム光をフィードバックして更なる短パルス化をはかる。

3. 研究の方法

図1にわれわれが初めて開発したレーザー共振器の概要図を示す。また、図2に改良後のレーザー共振器の概要図を示す。

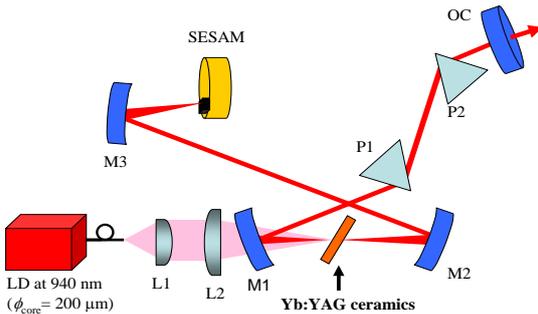


図1 モード同期 Yb:YAG セラミックレーザーの構成

モード同期 Yb:YAG セラミックレーザーの実験構成には図1に示すような X 型共振器を用いた。励起光源として、波長 940 nm のファイバ結合型 LD を用いた。ファイバのコア直径は 200 μm で、NA は 0.22 である。また、LD の最大出力パワーは 26.6 W である。励起光は L1 ($f=50\text{ mm}$) と L2 ($f=70\text{ mm}$) の 2 枚のレンズを用いてセラミックに集光した。Yb:YAG セラミック ($C_{\text{Yb}}=9.8\text{ at.}\%$) の厚さは 1 mm で、ブリュースター角となるように調整した。Yb:YAG セラミックは熱伝導率の高いインジウム箔で挟み、銅製の水冷式ヒートシンクに設置し、20 $^{\circ}\text{C}$ に冷却した。セラミックは 2 枚の高反射ミラー(M1, M2)の間に設置した。M1, M2 は曲率半径 (ROC) 100 mm であり、波長 1030 nm で高反射 (HR)、波長 940 nm で無反射 (AR) のコーティングが施されている。受

動モード同期は、実線で示すような透過率 1, 0.1% の出力結合ミラー (OC2) と半導体可飽和吸収ミラー (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM) をそれぞれ終端とする構成で動作させた。SESAM は、波長 1030 nm で飽和吸収 2%、飽和フルエンス 70 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、緩和時間 500 fs のものを用いた。共振器長は 162 cm である。SESAM には凹面ミラー (M4, ROC = 250 mm) を用いて集光した。45 cm の間隔の SF10 プリズム対 (P1, P2) は分散補償を行うために、出力側のアームに挿入した。共振器の群速度分散 (GDD) は 1 往復あたり、 -2670 fs^2 である。励起光源であるファイバ結合型レーザーダイオード (LD) からは、中心波長 940 nm、最高励起パワー 25 W の励起光が射出され、集光レンズ 2 枚によりレーザー媒質である Yb:YAG セラミックに集光される。ここでファイバコア径は 200 μm であった。

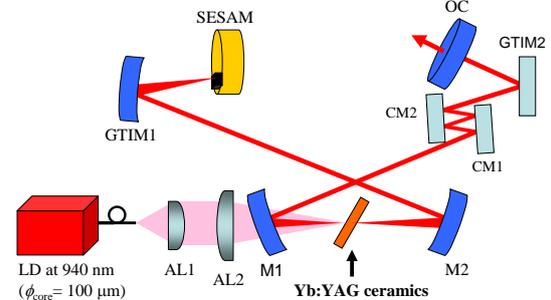


図2 分散補償ミラーを用いたモード同期 Yb:YAG セラミックレーザーの構成

図2では単位面積当たりの励起光エネルギー密度を向上させるために、ファイバをコア径 200 μm (図1) から 100 μm (図2) に変更し、集光レンズには単レンズよりも収差の少ないアクロマティック複合レンズ AL1 ($f=50\text{ mm}$)、AL2 ($f=75\text{ mm}$) を用いた。レーザー媒質となる Yb 添加濃度 9.8 at.% の Yb:YAG セラミックは、励起光の吸収効率を向上させるために、結晶厚 1 mm のものから厚さ 3 mm のものに変更した。終端ミラーとなる SESAM は飽和吸収率 2% のものを用いた。レーザー媒質内や、ミラー等の光学部品に反射する際に発生するパルス幅を広げる原因となる正常分散を補償するための分散補償系には SF10 プリズム対 P1, P2 を用いてきたが、共振器内損失を低減するために SESAM 前の集光ミラーに GTI ミラー (GTIM1、 $-1200\text{ fs}^2 @ 1050\text{ nm}$ 、 $f=12.5\text{ mm}$)、2 枚のチャープミラー (CM1、CM2、 $-100\text{ fs}^2 @ 1050\text{ nm}$)、フラットな GTI ミラー (GTIM2、 $-850\text{ fs}^2 @ 1050\text{ nm}$) を採用した。また、これまで図1の装置では、出力カプラ OC は安定したモード同期発振を行うために透過率 0.1%、1% のものを用いてきたが、

更なる高出力化実現のために透過率 2% のものを用いた。OC から出射された超短パルス光を、パワーメータで平均出力パワー、自己相関器で自己相関波形、分光器で発振スペクトル、デジタルオシロスコープでパルス列を計測した。

最後に行う予定だったスーパーコンティニウム(SC)光の圧縮までは、到達しなかったが、フォトニック結晶ファイバ(PCF)によって、1000nm 付近においても低分散の波長分散(GVD)特性が得られ、そのためそれらのファイバを使用すると、1000nm 帯の広くて平坦な超広帯域(SC)スペクトルが得られることが最近報告されている。このような低分散ファイバで発生した SC パルス光のスペクトルと入射波長付近の位相について調べた。その結果、位相を意識した SC 光の発生には 1000nm 帯で零でなおかつ極値を有する GVD 特性の PCF を使用し、短い長さで使用するのが有効であることがわかった。

調査した PCF は NKT Photonics A/S 製で、NL-4.7-1030 (以下、PCF1 と呼ぶ) および NL-1050-0-2 (以下、PCF2 と呼ぶ) である。図 3 に 2 種類の PCF (破線および実線) の GVD 特性を示す。比較のため、セルマイヤ方程式より算出したバルク状の石英の計算結果も一

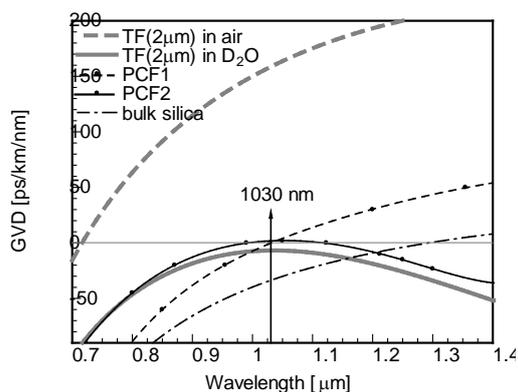


図 3 PCF の分散曲線

点鎖線で追加して示す。PCF1 と PCF2 の非線形係数は、それぞれ 1060 nm で 12 (Wkm)^{-1} および 37 (Wkm)^{-1} である。用いた実験装置は図 4 である。入射光は繰返し周波数 100 MHz のモード同期 Yb ファイバ発振器を使用した。増幅器には、励起強度を変化させることで平均パワーで数 W まで高品質な状態で連続的に増幅可能なダブルクラッド Yb ファイバ増幅器(DC-YbFA)を用いた。入射パルス光の中心波長は 1035 nm、フーリエ変換限界の自己相関パルス幅は 262 fs、実時間に換算したパルス幅は 170 fs であった。以後、パルス幅の値は実時間に換算した値を示す。出射光のスペクトル分布は光スペクトルアナライ

ザーで観測した。

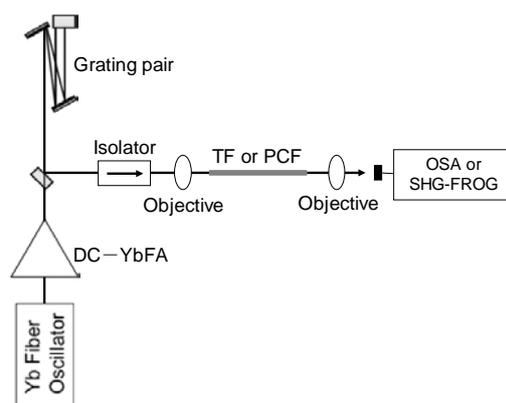


図 4 スーパーコンティニウム発生実験の構成図

4. 研究成果

プリズム対と SESAM を用いた LD 励起受動モード同期 Yb:YAG セラミックレーザの開発を行った。波長 1033.5 nm および 1048.3 nm にて受動モード同期を達成した。波長 1033.5 nm では、透過率 $T = 0.1\%$ の出力結合ミラーを用いて、SESAM によるモード同期により平均出力 25 mW、パルス幅 286 fs のパルスが得られた。これは波長 1030 nm では最も短いパルス幅である。波長 1048.3 nm では、透過率 $T = 0.1\%$ の出力結合ミラーを用いて、平均出力 25 mW の最も短いパルス幅 233 fs が得られた。図 5 にこの時の相関波形を示した。

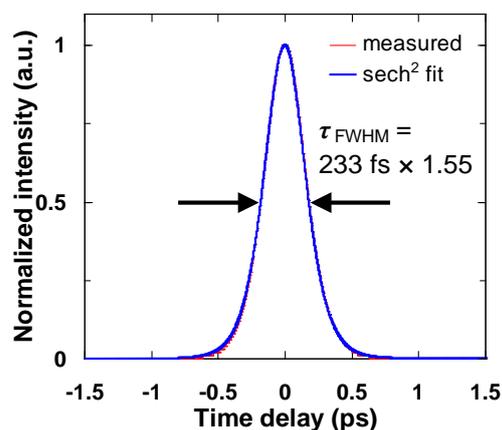


図 5 モード同期 Yb:YAG セラミックレーザの相関波形

これは国内外の報告が無い、最初の受動モード同期 Yb:YAG セラミックレーザであり、カーレンズモード同期を除いたセラミックレーザの中で 233 fs が最も短いパルスである。

また、フェムト秒 Yb:YAG セラミックレーザにおいて二波長同時モード同期を動作させ検証を行なった。二つの強いレーザ利得ラインである波長 1033.6 nm および 1047.6 nm においてモード同期が同時に起こった。それぞれのパルス幅は自己相関器を用いて 380 fs であると求まった。スペクトル幅は波長 1033.6 nm において 4.50 nm、波長 1047.6 nm において 3.08 nm が得られた。測定された二波長同時モード同期の状態において、波長 1033.6 nm および 1047.6 nm の成分がそれぞれ同時に独立してモード同期している。この二波長同時モード同期は Yb 添加固体レーザでは実現された例が国内外に無く、本研究が初めてである。

図 6 に改良した集光系に加えて分散補償系に GTI ミラー及びチャープミラーを用いた場合にモード同期発振した際の (a) 自己相関波形と (b) 発振スペクトルを示す。励起パワー 25 W 時に、中心波長 1050 nm、平均出力パワー 3.80 W、スペクトル幅 3.18 nm、パルス幅 433 fs、時間帯域幅積は 0.329 であった。また、図 7 のパルス列より、繰り返し周波数は 90.9 MHz であり、これらの数値より、パルスエネルギーは 41.8 nJ、ピークパワーは 96.5 kW であった。図 8 に最高出力 3.80 W 時の入出力特性を示す。励起パワー 4 W (出力パワー 183 mW、矢印) から励起パワー 25 W (出力パワー 3.80 W) まで安定したモード同期発振を実現した。この時のスロープ効率 は 17.9% であった。

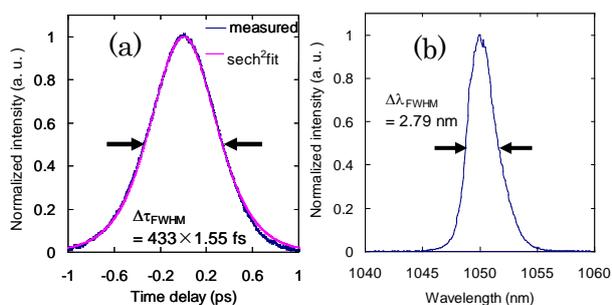


図 6 分散補償系に GTI ミラーとチャープミラーを用いた際のモード同期発振時の (a) 発振スペクトル、(b) 自己相関波形

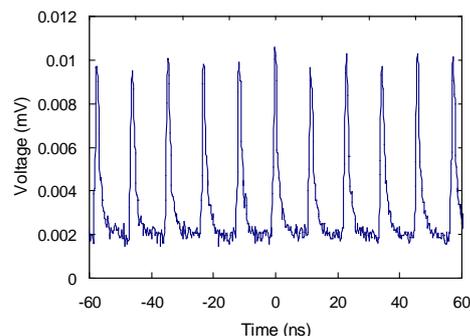


図 7 平均出力パワー 3.80 W 時のパルス列

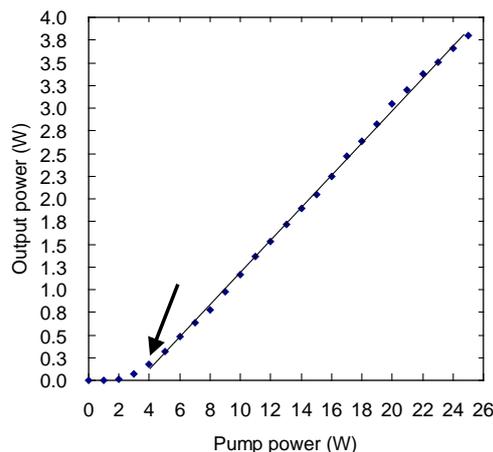


図 8 モード同期 Yb:YAG の入出力特性

更なる高出力化、短パルス化のために図 2 における CM2 と GTIM2 の配置交換後アライメントを行いモード同期発振させた。その時の自己相関波形と発振スペクトルを図 9(a),(b) に示す。励起パワー 25 W の時、平均出力パワー 3.92 W、スペクトル幅 3.18 nm、パルス幅 379 fs、時間帯域幅積 0.328、繰り返し周波数 87 MHz より、パルスエネルギー 43.1 nJ、ピークパワー 118.9 kW が得られた。

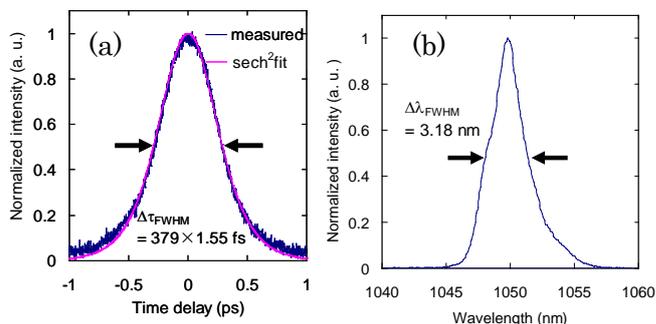


図 9 GTIM2 と CM2 の配置を交換した時の (a) 自己相関波形 (b) 発振スペクトル

最後に別の Yb 系レーザを用いてスーパーコンチニウム (SC) 光を発生した。図 10

に得られた SC スペクトルを示す。結合効率は PCF1 の場合は 20%、PCF2 の場合は 14%であった。黒色実線は長さ 1m の PCF1 に 250mW 入力した場合である。黒色破線は 1 m の PCF2 に 250 mW 入力した結果、灰色実線は長さ 0.15 m の PCF2 に 750 mW 入力した結果である。PCF1 の GVD 特性は、ゼロ分散波長から比較的離れた短波長側と長波長側では分散量は大きい。そのため、SC 発生におけるスペクトル成分は分散量の小さいゼロ分散波長付近に集中して広がる。PCF2 は GVD 特性がゼロ分散かつ極値を持つ特性を有し、入射波長付近において広帯域で低い正常分散値を示している。さらに、非線形係数は PCF1 よりも約 3 倍大きい。そのため、SC 発生におけるスペクトル成分は 250 mW の低パワー入射でも、比較的広い波長域で検出される。図 11 にこの時の SC 光の位相スペクトルを示す。この図より PCF2 のほうが PCF1 より滑らかな位相曲線を示しているため、位相変調器を用いてパルス圧縮するには有利であることが分かった。

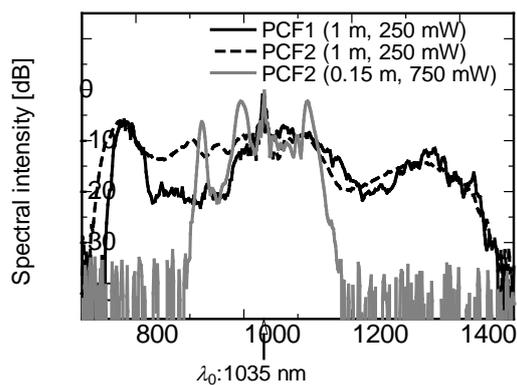


図 10 SC 光の強度スペクトル

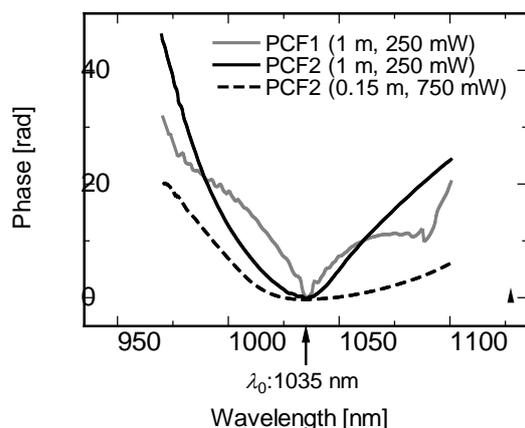


図 11 SC 光の位相スペクトル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

① Hiroyasu Sone, Dai Yoshitomi, Xiangyu Zhou, Yasuhiro Harada, Shinki Nakamura, Fatemeh Abrishamian, Ryo Kasahara, Kosuke Kikuchi, Kenji Torizuka, "Spectra and Phases of Supercontinuum Pulses Generated in Tapered Fiber and Photonic-Crystal-Fiber with Low Dispersion," レーザー研究, Vol. 39, No. 11, 862-865, 2011, 査読有

② 曾根宏靖, 原田康浩, 今井正明, 辻 寧英, 中村真毅, 「重水中テーパファイバーからのスーパーコンティニューム光パルスのスペクトルと位相の数値解析—テーパウエスト長による影響」, 光学, Vol. 40, No. 8, 439-447, 2011, 査読有

③ Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "Dual-wavelength mode-locked Yb:YAG ceramic laser in single cavity," Optics Express, Vol. 18, No. 2, 1479-1486, 2010, 査読有

④ Shinki Nakamura, Hiroaki Yoshioka, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "Broadly Tunable Yb³⁺-doped Y₃Al₅O₁₂ Ceramic Laser at Room Temperature," Japanese Journal of Applied Physics, Part 1, Vol. 48, No. 6, 060205-1-060205-3, 2009, 査読有

⑤ Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "Diode-pumped mode-locked Yb:YAG ceramic laser," Optics Express, Vol. 17, No. 11, 8919-8925, 2009, 査読有

〔学会発表〕(計 10 件)

① 曾根宏靖, 原田康浩, 中村真毅, 吉富大, 高田英行, 笠原亮, 引田雄翔, 鳥塚健二, 「低分散フォトニック結晶ファイバーを用いたスーパーコンティニューム光発生」第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 15 日, 東京

② 引田雄翔, 中村真毅, 小川貴代, 和田智之, 「モード同期 Yb 添加 YAG セラミックレーザーの高出力化」第 19 回電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2011. 11. 19, 日立

③ Hiroyasu Sone, Dai Yoshitomi, Xiangyu

Zhou, Kosuke Kikuchi, Ryo Kasahara, Fatemeh Abrishamian, Shinki Nakamura, Yasuhiro Harada, Kenji Torizuka, "Spectral intensities and phase distributions of supercontinuum pulses generated in low-dispersion fibers," in 21th International Conference on Optical Fiber Sensors, Ottawa, Canada, May 15-19, 2011, paper 7753-294.

④ 中村真毅, 吉岡宏晃, 興雄司「フェムト秒 Yb:YAG セラミックレーザーの開発および応用に関する研究」レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 2011 年 1 月 10 日, 東京

⑤ Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "Dual-Wavelength Mode-Locked Yb:YAG Ceramic Laser in Single Cavity," in Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2010), San Jose, California, USA, May 16-21, 2010, paper CTuV5.

⑥ 曾根宏靖, 吉岡宏晃, 吉富 大, 周 翔宇, 中村真毅, 原田康浩, 今井正明, 鳥塚健二「重水中テーパファイバーによるスーパーコンティニウム発生のメカニズムの検証」第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 19 日, 東海大

⑦ 吉岡宏晃, 中村真毅, 小川貴代, 和田智之「2 波長同時モード同期 Yb:YAG セラミックレーザー」第 70 回応用物理学学会学術講演会, 2009. 9. 11, 富山

⑧ Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "233-fs Mode-locked Yb:YAG Ceramic Laser," in Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEOpr2009), Shanghai, China, Aug. 30-Sept. 3, 2009, paper WF1-3.

⑨ Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "Diode-Pumped Mode-locked Yb:YAG Ceramic Laser," in Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2009), Baltimore, MD, USA, May 31-June 5, 2009, paper JThE57.

⑩ 吉岡宏晃, 中村真毅, 小川貴代, 和田智之「LD 励起受動モード同期 Yb:YAG セラミックレーザー」第 56 回応用物理学関係連合講演会, 2009 年 4 月 1 日, つくば

[図書] (計 2 件)

① Shinki Nakamura, "Chapter 20, Comparison between Finite-Difference

Time-Domain Method and Experimental Results for Femtosecond Laser Pulse Propagation," in 『Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission』, F. J. Duarte, Ed. (出版社 Intech, Rijeka, Croatia, December 2010), pp. 449-492, ISBN 978-953-307-242-5.

② Shinki Nakamura, "Chapter 23, High-power and High Efficiency Yb:YAG Ceramic Laser at Room Temperature," in 『Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics』, Bishnu Pal, Ed. (出版社 Intech, Rijeka, Croatia, February 2010), pp. 513-528, ISBN 978-953-7619-82-4.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 真毅 (NAKAMURA SHINKI)
茨城大学・工学部・准教授
研究者番号：90323211

(2) 研究分担者

曾根 宏靖 (SONE HIROYASU)
北見工業大学・工学部・助教
研究者番号：00333667