

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5月15日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360038

研究課題名（和文）小型可搬な広帯域波長可変中赤外レーザーの開発研究

研究課題名（英文）Research and development of a compact and mobile wide tunable MIR lasers

研究代表者

平等 拓範（TAIRA TAKUNORI）

分子科学研究所・分子制御レーザー開発研究センター・准教授

研究者番号：50216595

研究成果の概要（和文）：本研究では、プロジェクト開始前に我々が世界で初めて可能とした中赤外域における広帯域波長可変・高輝度光源の小型・可搬化を目指し、励起源となる Nd:YAG レーザーのマイクロチップ化と ZGP-DFG に必要な $3\mu\text{m}$ 域波長可変シード光源の PPMgLN による全固体化を進め良好な結果を得た。なおその成果の一部を内外で報告したところ、研究代表である平等は 2010 年に米国光学会（OSA）フェロー、同年第 34 回（社）レーザー学会業績賞（論文賞）、2011 年に米国電気電子学会（IEEE）シニアメンバー、2012 年 1 月には国際光工学会（SPIE）フェローの各賞を受賞するなど高い評価を得た。

研究成果の概要（英文）：In this project, we have investigated the basic research toward a compact and mobile mid-infrared (MIR) laser based on our firstly demonstrated a wide tunable and high-brightness MIR laser

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学、工学基礎・応用光学、量子光工学

キーワード：量子エレクトロニクス、マイクロチップレーザー、セラミックレーザー、Nd:YAG 非線形光学波長変換、擬似位相整合（QPM）、PPMgLN、中赤外光発生

1. 研究開始当初の背景

中赤外域の光は、いわゆる分子指紋領域に相当し、分子科学における基礎研究から、大気に混入した温暖化ガス、危険物質・汚染物質、さらには質量分析との組み合わせによる生体分子・DNA の分析・解析までが可能となるため、この光領域における高輝度光源の開発が多方面から望まれている。中赤外、特に、波長にして $5\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ に至る領域

には適当な光源は存在せず、専ら FEL（自由電子レーザー）を用いた基礎的実験に限られていた。

2. 研究の目的

本研究では、中赤外域における分光研究の高度化、実用化に貢献すべく我々が世界で初めて可能とした中赤外域における広帯域波長可変・高輝度光源の小型・可搬化を目指し、

励起源となる Nd:YAG レーザーのマイクロチップ化と ZGP-DFG に必要な 3 μ m 域波長可変シード光源の PPMgLN による全固体化を目指し、必要となる要素技術の確立、さらには気相クラスターの赤外分光による有用性の検証を目的として実施した。

3. 研究の方法

本研究では、以下の手順で各要素に分け研究を進めた。

- (1) 高性能セラミック Nd:YAG マイクロチップ MOPA の研究開発
- (2) 2- μ m 縮退波長及び 3- μ m 域波長可変 PPMgLN-OPO/MOPA の研究開発
- (3) 5~10- μ m 域波長可変 ZGP-DFG の研究開発
- (4) 気相クラスターの赤外分光によるシステム性能評価

4. 研究成果

(1) 高性能セラミック Nd:YAG マイクロチップ MOPA の研究開発

まず、高濃度 Nd:YAG セラミックレーザーを用いて、繰り返し周波数 1kHz 以上の高ビーム品質 AO-Q スイッチレーザーを目指し検討した。100Hz 以下では約 8mJ の良好なノーマル発振を得たが、繰り返しを 1kHz にまで上げた場合は、1mJ 以下と急激に低下した。一方で、高濃度 Nd:YAG セラミックレーザーにおいて、Cr:YAG の結晶方位を適切に選択する事で出力 3mJ の直線偏光レーザー出力を得る事に成功した。計画の MOPO 構成よりも遥かに小型で安定動作が期待できるようになっただけでなく、1kHz 動作でも 2mJ 以上の出力を世界で始めて達成し、性能面でも当初計画を超える成果を得た。

(2) 2- μ m 縮退波長及び 3- μ m 域波長可変 PPMgLN-OPO/MOPA の研究開発

QPM 素子にて波長可変動作を行うため、傾斜による光路長変化につき検討した。波長 2128nm との DFG により 5~12 μ m 波長可変動作を行うには、3- μ m 域波長可変範囲を 2600~3700nm にする必要がある。そのためには PPMgLN を少なくとも 20° 以上傾斜調整しなければならず、そのための分極反転法を開発した。

一方で、高出力化のため新材料である PPMgLT についても検討を行い、実際に PPMgLT による 100mJ のナノ秒 OPO に世界で始めて成功した。

(3) 5~10- μ m 域波長可変 ZGP-DFG の研究開発

ZGP-DFG による 5~10 μ m 域の広帯域波長動作実現のための励起光源として、ナノ秒動作広帯域連続波長可変高出力 PPMgLN/OPO

の検討および実験的確認を行った。16mm 幅×5mm 厚×40mm 長の傾斜角 20° の傾斜型大口径 PPMgLN 素子の回転によって、3ミクロン帯全域で連続可変な高出力 OPO を実現した。

一方で、ZGP-DFG による 5~10 μ m 域の広帯域波長動作の高性能化を検討した。特に ZGP に施すコーティングの耐性が重要であることに注目し、検討を行った結果、システムの通常の利用 (2 μ m<30mJ) でのダメージを低減でき、赤外分光の安定な動作を確保できるようになった。

(4) 気相クラスターの赤外分光によるシステム性能評価

気相クラスター赤外分光のための 5~10 μ m 域の広帯域波長動作を目指した。システムの最適化により通常の利用 (2 μ m<30mJ) でのダメージを低減でき、2000cm⁻¹において最大値 2.6mJ が得られただけでなくスペクトル分解能も従来の 1.5cm⁻¹から 0.4cm⁻¹まで向上できた。

以上、プロジェクト開始前に我々が世界で初めて可能とした中赤外域における広帯域波長可変・高輝度光源の小型・可搬化を目指し、励起源となる Nd:YAG レーザーのマイクロチップ化と ZGP-DFG に必要な 3 μ m 域波長可変シード光源の PPMgLN による全固体化を進め良好な結果を得た。なおその成果の一部を内外で報告したところ、研究代表である平等は 2010 年に米国光学会 (OSA) フェロー、同年第 34 回 (社) レーザー学会業績賞 (論文賞)、2011 年に米国電気電子学会 (IEEE) シニアメンバー、2012 年 1 月には国際光工学会 (SPIE) フェローの各賞を受賞するなど高い評価を得た。

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) S. Hayashi, K. Nawata, H. Sakai, T. Taira, H. Minamide, and K. Kawase "High-power, single-longitudinal-mode terahertz-wave generation pumped by a microchip Nd:YAG laser," Opt. Express, vol. 20, no. 3, pp. 2881-2886 (2012). **査読有**
- 2) T. Taira, "Domain-controlled laser ceramics toward Giant Micro-photonics [Invited]," Opt. Mater. Express, vol. 1, no. 5, pp. 1040-1050 (2011). **査読有**
- 3) 平等拓範, 「高輝度マイクロチップレーザーとエンジン点火」, レーザー研究, vol. 38, no. 8, pp. 576-584 (2010). **査読有**

- 4) H. Ishizuki and T. Taira, "High energy quasi-phase matched optical parametric oscillation using Mg-doped congruent LiTaO₃ crystal," *Opt. Express*, vol. 18, no. 1, pp. 253-258 (2010). 査読有
 - 5) M. Miyazaki, J. Saikawa, H. Ishizuki, T. Taira, and M. Fujii, "Isomer selective infrared spectroscopy of supersonically cooled *cis*- and *trans*-*N*-phenylamides in the region from the amide band to NH stretching vibration," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 11, pp. 6098-6106 (2009). 査読有
- 〔学会発表〕(計 26 件)
- 1) 石月秀貴, 平等拓範, 「マイクロチップレーザー励起光パラメトリック中赤外光源」, 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学 (東京), 2012 年 3 月 15 日.
 - 2) 平等拓範, 「マイクロ固体フォトニクスによるテラヘルツ波光源の最先端」, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, TKP 仙台カンファレンスセンター (宮城), 2012 年 1 月 30 日.
 - 3) T. Taira, "Ceramic lasers and laser materials toward giant micro-photonics," 2nd EOS Topical Meeting on Lasers (ETML'11) (Invited), Hotel la Residenza (Italy), 27 September (2011).
 - 4) T. Taira, "Large aperture QPM devices toward giant micro-photonics," 22nd General Congress of the International Commission for Optics (ICO-22), William O. Jenkins Convention Centre (Mexico), 15 August (2011).
 - 5) S. Hayashi1, T. Taira, "High - power, single - longitudinal - mode terahertz - wave generation pumped by a microchip Nd:YAG laser," 2011 Nonlinear Optics (NLO), Marriot Kauai Beach Resort (USA), 20 July (2011).
 - 6) H. Ishizuki, T. Taira, "Fabrication of slant quasi phase matching structure in Mg-doped congruent LiNbO₃," 2011 Nonlinear Optics (NLO), Marriot Kauai Beach Resort (USA), 18 July (2011).
 - 7) T. Taira, "Large aperture QPM devices for giant micro-photonics," 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS'11) (Invited), Congress Centre and Hotels Ilidza (Bosnia and Herzegovina), 11 July (2011).
 - 8) T. Taira, "Giant microphotonics: large aperture PPMGLN," Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique (JNCO) (Invited), University of Provence, Campus St Charles (France), 7 July (2011).
 - 9) H. Ishizuki, T. Taira, "Characterization of high-energy optical-parametric oscillation by using periodically poled Mg-doped congruent LiTaO₃," CLEO/Europe-EQEC 2011, ICM-International Congress Centre (Germany), 26 May (2011).
 - 10) N. Pavel, M. Tsunekane, K. Kanehara and T. Taira, "Composite all-ceramics, passively Q-switched Nd:YAG/Cr4+:YAG monolithic micro-laser with two-beam output for multi-point ignition," CLEO 2011, Baltimore Convention Center (USA), 2 May (2011).
 - 11) 平等拓範, "The art of age microchip lasers - toward giant micro-photonics -," 『光の日』公開シンポジウム 2011, 森戸記念館 (東京), 2011 年 3 月 8 日.
 - 12) P. Loiseau, T. Taira and, G. Aka, "Review and evaluation of the nonlinear capabilities of RECOB (RE = Y, Gd) oxyborate crystals for SHG," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Photonics (ASSP), Ceylan Intercontinental Istanbul Hotel (Turkey), 15 February (2011).
 - 13) T. Taira, "Anisotropic laser ceramics toward giant micro - photonics," OSA Topical Meeting on Advanced Solid-State Photonics (ASSP), Ceylan Intercontinental Istanbul Hotel (Turkey), 15 February (2011).
 - 14) T. Taira, "Anisotropic ceramics as a next generation laser," 6th Laser Ceramics Symposium, Factory Hotel (Germany), 7 December (2010).
 - 15) 平等拓範, 「受動 Q スイッチ型 μ チップレーザーの高輝度化とエンジン点火」, 第 34 回レーザー協会セミナー, 中央大学駿河台記念館 (東京), 2010 年 11 月 18 日.
 - 16) 平等拓範, 「マイクロ固体フォトニクスの展開-高輝度マイクロチップレーザーとエンジン点火などの応用-」, 第 78 回研究会 (第 50 回レーザー技術セミナー), トヨタ産業技術記念館 (愛知), 2010 年 11 月 17 日.
 - 17) 宮崎充彦, 齊川次郎, 石月秀貴, 平等拓範, 藤井 正明, 「ZGP/PPLN/色素レーザーによる中赤外波長可変レーザーを用いた超音速分子線レーザー分光」, 日本光学会年次学術講演会, 中央大学駿河台記念館 (東京), 2010 年 11 月 9 日.
 - 18) 平等拓範, 「ジャイアントマイクロフォトニクスの拓く世界」, レーザー衝撃と応用技術専門委員会, 浜松ホトニクス東京支店 (東京), 2010 年 10 月 4 日.
 - 19) T. Taira, "Laser ignition of combustion engines for cleaner vehicles (Plenary)," ICALEO - International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics,

- Anaheim Marriott Hotel (USA), 27 September (2010).
- 20) T. Taira, "Micro solid-state photonics – new photonics by micro-domain controlled materials," E-MRS 2010 Fall Meeting, Warsaw University of Technology (Poland), 14 September (2010).
 - 21) T. Taira, "Advanced laser ceramics toward giant micro photonics," The 16th international conference on crystal growth/14th international conference on vapor growth and epitaxy (ICCG-16/ICVGE-14), Beijing International Convention Center (China), 12 August (2010).
 - 22) T. Taira, "Giant micro-photonics: domain controlled optical materials," 4th International Workshop on Photonic and Electronic Materials, Donostia International Physics Center (Spain), 7 July (2010).
 - 23) H. Ishizuki, "Continuously tunable, high-energy mid-infrared optical-parametric," oscillation by angular tuning of PPMgLN with tilted QPM structures, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2010), San Jose McEnery Convention Center (USA), 18 May (2010).
 - 24) T. Taira, "Next generation of laser ceramics toward giant micro-photonics," The 7th Asia Pacific Laser Symposium (APLS2010), Seogwipo KAL Hotel (Korea), 14 May (2010).
 - 25) 平等拓範, 「高輝度マイクロチップレーザー」, 光電相互変換第 125 委員会「本委員会第 208 回研究会」, 東京理科大学 (東京), 2010 年 5 月 12 日.
 - 26) H. Ishizuki, J. Saikawa, and T. Taira, "Broadly and continuously tunable, high-energy optical parametric system by angular tuning of tilted QPM structures," CLEO 2009, Baltimore Convention Center, Maryland (USA), 4 June (2009).

[図書] (計 2 件)

- 1) 平等拓範, 「先端固体レーザー」, レーザー学会編, オーム社, pp. 33-147 (2011).
- 2) 平等拓範, 「光エレクトロニクスとその応用」, 日本学術振興会 光エレクトロニクス第 130 委員会編, オーム社, 6.1.1 レーザーとレーザー光, pp. 177-189, 6.1.2 固体レーザーと応用上の特質, pp. 189-222, 6.2.2 ビーム計測, pp. 247-266, 6.3.4 波長変換, pp. 289-314, 7.2.6 マイクロ固体フォトニクス, pp. 422-442 (2011).

[その他]

ホームページ等

「平等准教授に国際光工学会 (SPIE) フェロー授与」

<http://www.ims.ac.jp/topics/2011/120104.html>

「ジャイアントマイクロフォトニクスの創成とレーザー点火」

<http://www.ims.ac.jp/topics/2011/110704.html>

「OSA フェロー 2010」

http://www.osa.org/Awards_and_Grants/Fellow_Members/Recent_Fellows/2010_Fellows.aspx

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平等 拓範 (TAIRA TAKUNORI)

分子科学研究所・分子制御レーザー開発研究センター・准教授

研究者番号 : 50216595

(2) 研究分担者

石月 秀貴 (ISHIZUKI HIDEKI)

分子科学研究所・分子制御レーザー開発研究センター・助教

研究者番号 : 90390674