

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287145

研究課題名(和文) レーザー誘起プラズマ波を用いた新しい超高強度超短パルスレーザーの研究

研究課題名(英文) Ultrahigh-peak-power laser by using a laser-induced plasma wave

研究代表者

河仲 準二 (Kawanaka, Junji)

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：50264362

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：高性能、高品質の励起光用・信号光用レーザーを開発し、これを用いて後方ラマン散乱試験を行なった結果、顕著な後方ラマン信号は得られなかった。測定した生成プラズマの発光時間や密度などから600psの相互作用の間、安定にプラズマを維持できず、また、生成プラズマの密度が低いことが予測された。また、変動するプラズマ条件を考慮した数値シミュレーションにより裏付けされた。これにより今後の指針として励起光用レーザーの短パルス化(ピコ秒)と励起光強度の高強度化により短時間での効率良い相互作用が重要であることを明らかにした。高密度化については固体ターゲットの採用が効果的であると予想した。

研究成果の概要(英文)：Raman back scattering in plasma has been tried as a novel high peak power laser by using our developed original laser systems. The Raman signal has not been detected clearly. Interaction time of 600 ps, which is decided by the pulse duration of the pump beam, have been observed to be too long for unstable laser-induced plasma and the plasma density was low. These led to an ineffective energy conversion of Raman back scattering. Our numerical calculation with experimental data agreed with that. It has been clearly shown that shortening the pulse duration of the pump laser from 600 ps to 1 ps enables efficient Raman back scattering with more than two-order higher laser intensity and short interaction duration. In addition, replacement of the gas with a solid-state target as plasma source increases the plasma density for further energy conversion.

研究分野：レーザー工学

キーワード：ラマン圧縮 ラマン増幅 超短パルスレーザー 超高強度レーザー プラズマ科学 量子エレクトロニクス

1. 研究開始当初の背景

パルスレーザーの高強度化はレーザーエネルギーの増力化と短パルス化によって達成されてきた。現在ではチャープパルス増幅(Chirped Pulse Amplification, CPA)法によって、ピコ秒～フェムト秒のパルス時間幅で 10PW 級の超高強度レーザーが世界各国で開発され、欧州の ELI 計画やロシアの XCELS 計画では 0.2EW を目標とした概念設計が行われていた。これらのレーザーが作り出す超高強度場を利用して相対論的クーロン爆発や固体内イオン加速、電子陽電子対生成など相対論的プラズマ物理、宇宙物理、核物理、量子電磁力学、素粒子物理などの最先端分野において学術的・技術的広がりをもたらすものとして期待されていた。

このような超短パルス高強度レーザーの発生手法として不可欠な CPA 法は、増幅中の光学素子の光誘起破壊や B 積分値による波面歪みを避けるために増幅前後でパルス時間幅の伸長および圧縮を行う。このため、光学システムが複雑化し、使用する光学素子も多種多様となる。0.2EW を目指す前述の大型計画では、2kJ(@10fs)以上のレーザーエネルギーが必要であり、光学素子の大きさは光誘起破壊や波面歪みを避けるためにメートルサイズが要求されている。この要求はエクサワット出力に対してはさらに厳しいものとなる。この大型化は多種多様のすべての光学素子に要求され、入手困難もしくは入手期間の長期化やコストの増大を招く。さらに CPA 法に沿った光学システムはいっそう巨大化、複雑化し、開発・運用のコストはさらに増大する。従って従来の固体素子を主とした CPA 法を使ってエクサワットを超える次世代の超高強度超短パルスレーザーを実用化するには制約が多い。

2. 研究の目的

従来の固体光学材料に比べて数桁高い光誘起破壊閾値を持つプラズマをレーザー増幅媒質として超短パルスレーザー光を時間伸長することなく増幅する手法を新規に提案した。本研究課題では、レーザー誘起プラズマ波を利用した超短パルスレーザー増幅の基礎研究を行う。従来にない高繰り返し高出力のレーザーシステムを開発し誘導ラマン散乱による超短パルスレーザー増幅過程を解明しその有効性を検証することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究課題では、まず、プラズマ波による誘導ラマン散乱に必要な超高強度超短パルスレーザー装置を開発し、レーザー誘起プラズマ波による後方ラマン散乱実験により基礎データを収集すると同時に、ラマン散乱の実用モデルを構築し理論解析と比較検討してラマン散乱過程を解明する。

4. 研究成果

既存レーザー装置の改良・増設により本研究課題に必要な励起光用および信号光用レーザー装置を開発した。励起光用レーザーはフェムト秒ファイバーレーザー発振器からのパルスを時間伸長した後、多段の低温 Yb:YAG 増幅器によりエネルギー増幅し最大 1J のパルスエネルギーを繰り返し周波数 100Hz で得る。初段の増幅器として冷却型パルス伸長器を組み込んだ再生増幅器でミリジュール級出力に増力するとともにパルス時間幅をナノ秒にまで時間伸長し、次段の 4 パス増幅器で 40mJ 程度にまでエネルギー増幅する。最終段の 1J、100Hz 増幅システムの光学配置を図 1 示す。独自開発したアクティブミラー型多段増幅器 (i-TRAMs) はギフォード・マクマホン冷凍機によって 70K に冷却され、最大ピーク強度 2.5 kW、励起時間 1 ms、繰り返し周波数 100Hz のファイバーカップル半導体レーザー (LD) 2 台によって励起された。前段増幅器からの種光は 2 つのイメージリレーを介して i-TRAMs 入射時に鉛直方向にわずかに角度がつくようにすることで、光スイッチング素子を使わない単純な構成で i-TRAMs を 4 パスしエネルギー増幅される。図 2 と図 3 に増幅されたパルスエネルギーの LD 励起出力依存性と空間ビーム強度分布を示す。100Hz 動作時に最大で 1.05 J のパルスエネルギーが得られた。0.8 J 以上の増幅エネルギーでは増幅率の低下が見られる。これは i-TRAMs の蛍光スペクトル観測から i-TRAMs の温度上昇による Yb:YAG レーザー下準位の再吸収の発生に伴うレーザー損失の増加が原因であった。空間ビーム強度分布は局所的な不均一性が発生しておらず安定した増幅が得られた。パルス幅は約 600 ps であった。

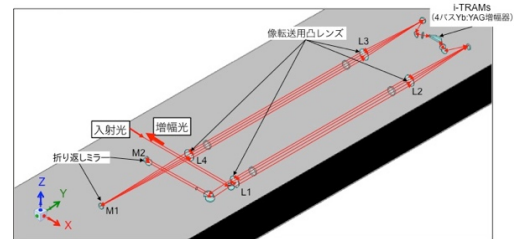


図1 1J、100Hz 増幅器の光学レイアウト(励起光用レーザー)

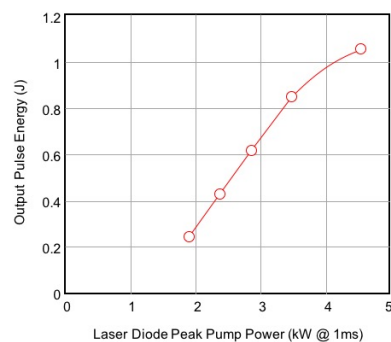


図2 励起出力 (LD) に対する増幅パルスエネルギー (励起光用レーザー)

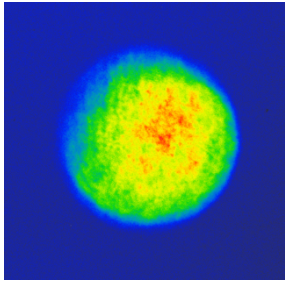


図3 空間ビーム強度分布（励起光用レーザー）

一方、信号光用レーザーは以下のようにして得た。励起光用レーザーと同じフェムト秒ファイバーレーザー発振器からの出力を LD 励起された Yb:CaF₂ を用いたマルチパス増幅器によりチャープパルス増幅を行い、パルス時間圧縮後に約 1 mJ, 220 fs のレーザーパルスを得た。これを 1~3 気圧のアルゴンガスを封入した長さ 1 m のホローコアファイバーに集光、入射することによりコヒーレント白色光を発生させ分散補正することにより 20fs 以下のパルスを得てこれを信号光用レーザーとして用いた。図4に白色光発生のための実験装置図を示す。また、図5にアルゴンガス圧を変化させた時の白色光スペクトルの変化を示す。3 気圧の時に 300nm 以上の広帯域白色光が得られた。

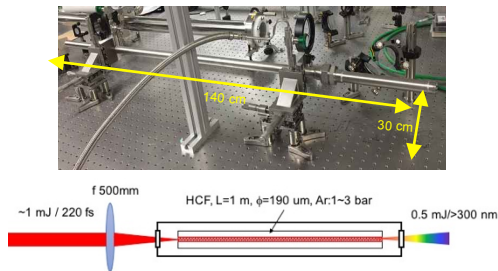


図4 フェムト秒レーザーによるコヒーレント白色光発生装置図

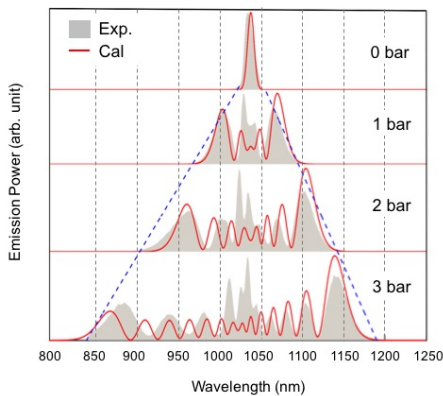


図5 コヒーレント白色光スペクトルのアルゴンガス圧依存性

得られた白色光をチャープミラーの複数回反射により分散補正を行いパルス圧縮した結果、25fs の超短パルス光が得られた。図6に周波数分解光ゲート法 (FROG) の計測結果を示す。これを信号光用レーザーとして使用

した。

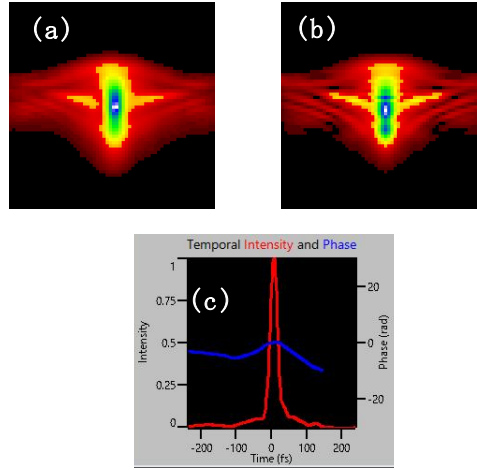


図6 FROG による計測結果 (a)FROG トレース、(b)構築された FROG トレース、(c)構築されたパルス時間波形と位相

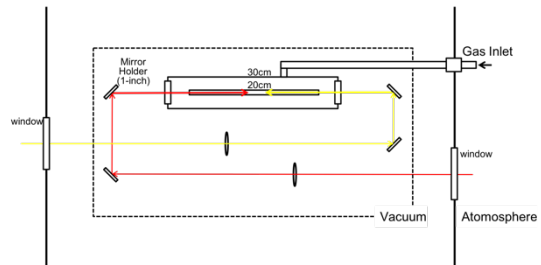


図7 プラズマ波を用いた後方ラマン散乱実験図

図7に示す光学レイアウトにより励起光用・信号光用レーザーを用いて後方ラマン散乱試験を行なった結果、顕著な後方ラマン信号は得られなかった。この結果、再度、レーザー光の精密な計測を行なった。励起光源である 1J, 100Hz で動作する半導体レーザー励起固体レーザーは 600ps のパルス時間幅であり、また、信号光用レーザーについても新たに高感度の 3 次自己相関計測を用いてパルスコントラストやパルス時間幅を測定し高いパルスコントラストとガウス状のパルス時間波形を確認し問題のないことがわかった。次に、生成プラズマの発光時間や密度などをプローブ光によって測定したところ、信号光と相互作用する 600ps の時間幅において急減に変化することと、生成プラズマの密度が低いことを確認した。このため後方ラマン散乱条件を満たす相互作用時間・空間は極めて短いことが予想され、変動するプラズマ条件を考慮した簡易数値シミュレーションを行ったところ、当初予想より 2桁程度低くなることが示された。従って、効率良い後方誘導ラマン散乱のためには励起光用レーザーのピコ秒へと短パルス化するとともに励起高強度をあげることが必要であることがわかった。同時に、ピコ秒領域の極めて短時間の相互作用時間であることから信号光用レーザーと励起光用レーザーの

精密な同期と、両レーザー間の時間ジッターの大幅な低減が必要であることが明らかとなった。また、プラズマ密度についてはプラズマ生成材料を気体から固体ターゲットに変更することにより高密度化を図るとともに、限られたプラズマの時空間を極めて効率的に利用できることが明らかとなった。

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 10 件)

- ① S. Tokita, M. Divoky, H. Furuse, K. Matsumoto, Y. Nakamura, M. Yoshida, T. Kawashima, and J. Kawanaka, "Generation of 500-mJ nanosecond pulses from a diode-pumped Yb:YAG TRAM laser amplifier," *Optical Materials Express*, Vol. 4, Issue 10, pp. 2122-2126 (Oct 2014).
- ② K. Fujioka, Y. Fujimoto, K. Tsubakimoto, J. Kawanaka, I. Shoji, and N. Miyanaga, "Partially deuterated potassium dihydrogen phosphate optimized for ultra-broadband optical parametric amplification," *Journal of Applied Physics* vol. 117 Issue 9 (Mar 2015).
- ③ M. Divoky, S. Tokita, S. Hwang, T. Kawashima, H. Kan, A. Lucianetti, T. Mocek, and J. Kawanaka, "1-J operation of monolithic composite ceramics with Yb:YAG thin layers: multi-TRAM at 10-Hz repetition rate and prospects for 100-Hz operation," *Optics Letters* Vol. 40, Issue 6, pp. 855-858 (Mar 2015).
- ④ K. Fujioka, A. Sugiyama, Y. Fujimoto, J. Kawanaka, N. Miyanaga, "Ion diffusion at the bonding interface of undoped YAG/Yb:YAG composite ceramics," *Optical Materials* vol. 46, pp. 542-547 (Aug 2015).
- ⑤ X. Guo, S. Tokita, K. Hirose, T. Sugiyama, A. Watanabe, K. Ishizaki, S. Noda, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, "Demonstration of a photonic crystal surface-emitting laser pumped Yb:YAG laser," *Opt. Lett.* Vol. 41, No. 20, 4653 (October 15 2016).
- ⑥ S. Hwang, S. Tokita, T. Kawashima, H. Nishioka, and J. Kawanaka, "Hundred-picosecond narrowband chirped-pulse generation in an Yb:YAG regenerative amplifier using transmission gratings," *Japanese Journal of Applied Physics* 55, 122702 (November 4, 2016).
- ⑦ X. Guo, S. Tokita, K. Fujioka, H. Nishida, K. Hirose, T. Sugiyama, A. Watanabe, K. Ishizaki, S. Noda, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, "High-beam-quality, efficient operation of passively Q-switched Yb:YAG/Cr:YAG laser pumped by photonic-crystal surface-emitting laser," *Appl. Phys. B* 123: 194 (15 June 2017).
- ⑧ X. Guo, S. Tokita, X. Tu, Y. Zheng, and J. Kawanaka, "Prospects of obtaining terawatt class infrared pulses using standard optical parametric amplification," *Laser Phys.* 27, 025403 (11 January 2017).
- ⑨ X. Guo, S. Tokita, K. Yoshii, H. Nishioka, and J. Kawanaka, "Generation of 300 nm bandwidth 0.5 mJ pulses near 1 μ m in a single stage gas filled hollow core fiber," *Optics Express* vol. 25, No. 18, pp. 21171-21179 (4 Sep. 2017).
- ⑩ X. Guo, S. Tokita, and J. Kawanaka, "12 mJ Yb:YAG/Cr:YAG microchip laser," *Optics Lett.* 43 Issue 3, pp. 459-461 (1 Feb. 2018).

[学会発表] (計 37 件)

- 1 (invited) J. Kawanaka, "Ultrabroadband parametric amplification by using a partially deuterated KDP pumped with a cryogenic laser," *Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2014)*, Nizhny Novgorod, Russia, 17 July. - 23 July (2014).
- 2 (invited) J. Kawanaka, "Basic Research of Cryogenic High Power Lasers and Short Review of Ceramic Lasers in Japan," *The 20th International Symposium on High Power Laser Systems & Applications (HPLS & A)*, Chengdu, China, 25-29 August (2014).
- 3 S. Tokita, M. Divocky, S. Hwang, T. Kawashima, A. Lucianetti, and J. Kawanaka, "1 J Multi-TRAM Cryogenic Yb:YAG Amplifier," *OSA Topical Meeting, Advanced Solid-State Lasers (ASSL)*, Shanghai, China 16-21 November, AF1A.2 (2014).
- 4 S. Tokita, M. Divoky, S. Hwang, T. Kawashima, A. Lucianetti and J. Kawanaka, "Generation of 1-J nanosecond pulses from a diode-pumped Yb:YAG TRAM laser amplifier", *10th Laser Ceramics Symposium (LCS)*, Wroclaw, Poland, 1 - 5 Dec. (2014).
- 5 S. Hwang, S. Tokita, and J. Kawanaka, "Development of picosecond Yb:YAG

- amplifiers for OPCPA pumping,” 第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会（北海道大学札幌キャンパス、2014 年 9 月 17 日（水）～ 20 日（土））
- 6 時田茂樹、マーティン・ディボッキー、スンイン・ファン、川嶋利幸、西岡一、河仲準二、” 1J, 100Hz 低温冷却 Yb:YAG-TRAM マルチパス増幅器”、第 75 回応用物理学学会秋季学術講演会（北海道大学札幌キャンパス、2014 年 9 月 17 日（水）～ 20 日（土））
 - 7 時田茂樹、マーティン・ディボッキー、スンイン・ファン、川嶋利幸、西岡一、河仲準二、” 1J, 100Hz 低温 Yb:YAG-TRAM マルチパス増幅器の開発”、レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会、（東海大学高輪校舎 2015 年 1 月 11 日～12 日）
 - 8 スンイン・ファン、時田茂樹、河仲準二、” 透過型回折格子対を用いたチャーピング再生増幅器の開発(2)”、レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会（東海大学高輪校舎 2015 年 1 月 11 日～12 日）
 - 9 吉井健登、Xiaoyang Guo、伊山功一、時田茂樹、吉田実、川嶋利幸、西岡一、河仲準二、” 高出力超短パルス OPCPA システムの開発 — 希ガス充填中空ファイバによる広帯域種光発生 —”、第 63 回応用物理学学会春季学術講演会（東京工業大学 大岡山キャンパス、2015 年 3 月 19 日（土）～ 22 日（火））
 - 10 (invited) J. Kawanaka, S. Tokita, K. Iyama, T. Kawashima, and H. Nishioka, “1 J, 100 Hz, diode-pumped Yb:YAG ceramic laser for OPCPA pumping,” The 11th Laser Ceramics Symposium (LCS 2015), Xuzhou, China, 30 Nov. - 4 Dec., (2015).
 - 11 S. Tokita, M. Divoky, S. Hwang, T. Kawashima, H. Nishioka, A. Lucianetti, J. Kawanaka, “1 J, 100 Hz Multiple Active-Mirror Laser Amplifier Using YAG/Yb:YAG Composite Ceramics,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’ 15), Yokohama, Japan, 23-25 Apr., (2015).
 - 12 S. Tokita, S. Hwang, T. Kawashima, H. Nishioka, J. Kawanaka, “Pulse stretching in a cryogenic-Yb:YAG regenerative amplifier using transmission gratings,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’ 15), Yokohama, Japan, 23-25 Apr., (2015).
 - 13 S. Tokita, M. Divoky, S. Hwang, K. Iyama, T. Kawashima, H. Nishioka, and J. Kawanaka, “Development of 1 J, 100 Hz Yb:YAG laser amplifier system for OPCPA pumping,” The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Busan, South Korea, 24 - 28 Aug. (2015).
 - 14 S. Tokita, S. Hwang, T. Kawashima, H. Nishioka, and J. Kawanaka, “Pulse stretching in a narrow-band Yb:YAG regenerative amplifier using transmission gratings”, The 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Busan, South Korea, 24 - 28 Aug. (2015).
 - 15 S. Tokita, K. Iyama, M. Divoky, S. Hwang, T. Kawashima and J. Kawanaka, “1 J, 100 Hz TRAM amplifier and ultra broadband OPCPA,” High-Energy-Class Diode-Pumped Solid-State Workshop (HEC-DPSSL), Stirin, Czech Republic, Oct. 13-16 (2015).
 - 16 K. Iyama, S. Tokita, T. Kawashima, J. Kawanaka, “Wavefront properties of 1 J TRAM amplifier,” High-Energy-Class Diode-Pumped Solid-State Workshop (HEC-DPSSL), Stirin, Czech Republic, Oct. 13-16 (2015).
 - 17 (invited) J. Kawanaka, S. Tokita, K. Iyama, T. Kawashima, and H. Nishioka, “High power diode-pumped solid-state lasers by using cryogenic Yb:YAG composit ceramics,” to be presented in The Second International Symposium on High Power Laser Science and Engineering (HPLSE 2016) at Suzhou, China on 15-18 March 2016.
 - 18 K. Yoshii, S. Tokita, X. Guo, K. Iyama, M. Yoshida, T. Kawashima, H. Nishioka, J. Kawanaka, “Development of ultra-broadband frontend light source for OPCPA using partially-deuterated KDP crystals,” The 10th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS 2016) at Jeju, Korea on 10-14 May 2016.
 - 19 X. Guo, S. Tokita, K. Hirose, T. Sugiyama, A. Watanabe, K. Ishizaki, S. Noda, J. Kawanaka, “Photonic Crystal Surface Emitting Laser Direct-Pumped Cryogenically Cooled Yb:YAG Oscillator,” The 5th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’ 16) at Yokohama, Japan on 17-20 May 2016.
 - 20 K. Iyama, S. Tokita, T. Kawashima, J. Kawanaka, “Development of 1 J Yb:YAG TRAM amplifier cooled by GM cryocooler,” The 5th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’ 16) at Yokohama, Japan on 17-20 May 2016.
 - 21 吉井健登、Xiaoyang Guo、伊山功一、時田茂樹、吉田実、川嶋利幸、西岡一、河仲準二、” 部分重水素置換 KDP 結晶を用いた OPCPA システムの開発 —希ガス充填中空ファイバによる広帯域種光発生 —”、第 77 回応用物理学学会秋季学術講演会（新潟 朱鷺メッセ、2016 年 9 月 13 日（火）～16 日（金））

- 22 伊山功一、時田茂樹、西岡一、川嶋利幸、兒玉了祐、河仲準二、” OPCA 励起用 1 J, 100 Hz, sub-ns Yb:YAG レーザー増幅器の開発”、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（新潟 朱鷺メッセ、2016 年 9 月 13 日（火）～16 日（金））
- 23 X. Guo, S. Tokita, K. Hirose, T. Sugiyama, A. Watanabe, K. Ishizaki, S. Noda, J. Kawanaka, “PCSEL pumped passively Q switched Yb:YAG laser”、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会（新潟 朱鷺メッセ、2016 年 9 月 13 日（火）～16 日（金））
- 24 (invited) J. Kawanaka, S. Tokita, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, K. Fujioka, S. Motokoshi, M. Yoshimura, N. Miyanaga, R. Kodama, ” Exploring High Pulse Energy, High Rep. Rate Laser in the Next Generation,” 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPS-DPP), Jinniu Hotel, Chendu, China on 18-23 Sep. 2017, L-I11.
- 25 X. Guo, S. Tokita, H. Nishida, K. Hirose, T. Sugiyama, A. Watanabe, K. Ishizaki, S. Noda, N. Miyanaga, and J. Kawanaka, “Highly beam quality PCSEL pumped Yb:YAG laser with near theory limited slope efficiency,” The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’ 17), Yokohama, Japan, 18-21 Apr., 2017.
- 26 S. Tokita, K. Iyama, T. Kawashima, K. Fujioka and J. Kawanaka, “Sub-ns, 1J Yb:YAG TRAM mutipass amplifier for OPCA pumping,” The 6th Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS’ 17), Yokohama, Japan, 18-21 Apr., 2017.
- 27 X. Guo, S. Tokita, K. Iyama, K. Yoshii, K. Fujioka, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, J. Kawanaka, “Broadband TW class OPCA system pumped by frequency doubled cryogenically cooled Yb:YAG laser,” 10th International HEC-DPSSL Workshop, Noboribetsu, Japan, 23-26 May, 2017.
- 28 S. Tokita, K. Iyama, X. Guo, K. Yoshii, M. Okamoto, T. Kawashima, K. Fujioka, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, R. Kodama, H. Nishioka, and J. Kawanaka, “Development Status of GENBU laser,” 10th International HEC-DPSSL Workshop, Noboribetsu, Japan, 23-26 May, 2017.
- 29 K. Iyama, S. Tokita, T. Kawashima, J. Kawanaka, “Development of sub-ns, 1J Yb:YAG TRAM multipass amplifier,” 10th International HEC-DPSSL Workshop, Noboribetsu, Japan, 23-26 May, 2017.
- 30 X. Guo, S. Tokita, K. Iyama, K. Yoshii, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, J. Kawanaka, “DPSSL Pumped Broadband TW Class OPCA System,” The 24th Congress of International Commission for Optics

(ICO-24), Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, 21-25 Aug., 2017.

- 31 X. Guo, S. Tokita, K. Yoshii, M. Nishio, and J. Kawanaka, “Efficient second harmonic generation of ~200 fs pulse at 1 μ m,” Advanced Solid State Lasers (OSA, ASSL), Nagoya, Aichi, Japan 1-5 Oct., JTh2A.29 (2017).

他

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：レーザー装置、レーザー増幅器及びレーザー発振器

発明者：時田茂樹、河仲準二、伊山功一、川嶋利幸

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2016-109963

出願年月日：平成 28 年 6 月 1 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 4 件）

名称：MULTI-BEAM COMBINING APPARATUS

発明者：Kawanaka Junji, Miyanaga Noriaki, Chosrowjan Haik, Furuse Hiroaki, Fujita Masayuki, Izawa Yasukazu, Hamamoto Koichi, Yamada Takahiro

権利者：同上

種類：特許

番号：US2015138618A1（国際出願番号 PCT/JP2013/050837）

取得年月日：May 21, 2015

国内外の別：米国、欧州、ロシア、中国

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河仲 準二 (KAWANAKA Junji)

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：50264362

(2) 研究分担者

時田 茂樹 (TOKITA Shigeki)

大阪大学・レーザー科学研究所・講師

研究者番号：20456825

西岡 一 (NISHIOKA Hajime)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授

研究者番号：70180586