

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04012

研究課題名(和文) 新しい中赤外波長帯光ファイバ光源とその医用・産業用光センシング応用

研究課題名(英文) Novel mid-infrared light sources and their applications to medical and industrial sensings

研究代表者

山下 真司 (YAMASHITA, SHINJI)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：40239968

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、代表者の山下がこれまで進めてきたカーボンナノチューブ(CNT)・グラフェン短パルスレーザおよび分散チューニング波長掃引レーザなどの高機能モード同期光ファイバレーザの研究を中赤外波長帯(波長2-5 $\mu\text{m}$ )に展開し、それらを分光分析・光コヒーレンストモグラフィ(OCT)・ライダーなどの医用・産業用光センシングへと応用した。ナノカーボンを用いて中赤外波長帯短パルスと広帯域光SCコム発生に成功し、ガス分光分析に応用した他、新たな中赤外モード同期法も提案した。また、分散チューニングレーザをガス分光分析およびOCTに応用し、デジタル信号処理によるOCT・ライダーの性能改善を示した。

研究成果の概要(英文)：The principal investigator has proposed and been working on highly functional mode-locked fiber lasers, such as short-pulse fiber lasers using carbon nanotube (CNT) or graphene, and dispersion-tuned wavelength swept lasers. This study aims at the new developments of these highly functional mode-locked fiber lasers towards mid-infrared (MIR) wavelength regions, and new applications to medical and industrial sensings, such as spectroscopy, optical coherence tomography (OCT), and Lidar. We have succeeded in generating MIR short pulse and broadband SC comb, and applied it to the spectroscopy. We also proposed novel mode locking method. We applied the dispersion-tuned lasers to spectroscopy and OCT, and also showed the performance improvement of OCT and Lidar with the aid of digital signal processing.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光ファイバレーザ モード同期 中赤外 カーボンナノチューブ グラフェン

### 1. 研究開始当初の背景

フェムト秒領域の高強度短パルスは、非常に高いエネルギーが短時間に集中するため、理学的・工学的に有用な種々の現象を起こすことができ、微細加工・分光・計量・レーザ顕微鏡・レーザイメージングなどに応用されてきている。またフェムト秒パルスを正常分散領域の高非線形光ファイバに入射するとスーパーコンティニウム(SC)現象によりスペクトルが大きく(場合によっては1オクターブ以上)広がったSC光周波数コムが実現でき、分光・計量や光コヒーレンストモグラフィ(OCT)などの光源として重要な役割を果たしている。

フェムト秒領域の短パルス発生には固体レーザでも光ファイバレーザでも、受動モード同期が用いられる。フェムト秒パルス発生のためには、高速かつ飽和強度の低い可飽和吸収素子(SA)が必須である。代表者の山下らはカーボンナノチューブ(CNT)・グラフェンなどのナノカーボン型可飽和吸収素子を提案している。

一方、光強度変調器へ外部から信号をかけることによりモード同期をかける方法もあり、これは能動モード同期と呼ばれる。代表者の山下らは、能動モード同期と分散の組み合わせによる分散チューニングという手法により、高速波長掃引光源が実現できることを示している。

### 2. 研究の目的

本研究では、代表者の山下がこれまで進めてきたCNT・グラフェン短パルスレーザおよび分散チューニング波長掃引レーザなどの高機能モード同期光ファイバレーザの研究を中赤外波長帯(波長2-5 $\mu\text{m}$ )に展開し、それらを分光分析・光コヒーレンストモグラフィ(OCT)・ライダーなどの医用・産業用光センシングへと応用するものである。

中赤外波長帯はこれまでに光ファイバレーザが用いられてきた波長1-1.5 $\mu\text{m}$ 帯に比べて散乱が小さく、またさまざまなガスの吸収線があるという特徴がある。一方、申請者の山下が進めてきた技術は利得媒質さえあれば光波長を選ばないという大きな特徴がある。本研究ではこれらの技術を利用して中赤外波長帯で高機能モード同期光ファイバレーザを実現し、微量ガス分光分析、高深達OCT、高速・高分解能ライダーシステムを構築し、その医用・産業・環境応用を進める。

### 3. 研究の方法

(1) ナノカーボンモード同期光ファイバレーザによる中赤外波長帯短パルスと広帯域光SCコム

波長2 $\mu\text{m}$ 帯のツリウム(Tm)ドープ光ファイバを利得媒質として用いたナノカーボン(グラフェンもしくはCNT)モード同期光ファイバレーザを実現し、フェムト秒領域の短パルスを発生させる。さらに、それをシード

パルスとして用いて非線形光ファイバ中で中赤外波長帯広帯域SC光周波数コムを発生させる。

(2) 中赤外波長帯分散チューニング波長掃引レーザ

Tmドープ光ファイバもしくは中赤外波長帯半導体光増幅器(SOA)を利得媒質として用い、さらに光ファイバもしくはチャープ光ファイバグレーティング(CFBG)を高分散媒質として、光変調器により分散チューニングをかけることにより中赤外波長帯で広帯域・高速波長掃引光源を実現する。

(3) 微量ガス分光分析・OCT・ライダーへの応用

中赤外波長領域での計測はさまざまな微量のガスなどを検出できるため、上記2種類の光源を用いて微量ガス分光分析システムを構築する。また、OCTシステム、ライダー距離計測システムへの応用も同時に進める。

### 4. 研究成果

図1に示すようなCNT-SAを用いた波長2 $\mu\text{m}$ 帯モード同期Tmドープファイバレーザを構成し、分散を調整することでソリトン、ストレッチパルスソリトン、および散逸ソリトンパルスを出力することができることを初めて示した。そのストレッチパルスソリトンを用いてSC光周波数コムを発生し、それを二酸化炭素の分光計測への応用も報告している(図2)。また、グラフェンSAを用いることでもモード同期パルスの生成に成功した。さらに、アデレード大学との共同研究として、波長3.5 $\mu\text{m}$ 帯Erドープ光ファイバレーザのグラフェン受動モード同期を世界で初めて実現している。

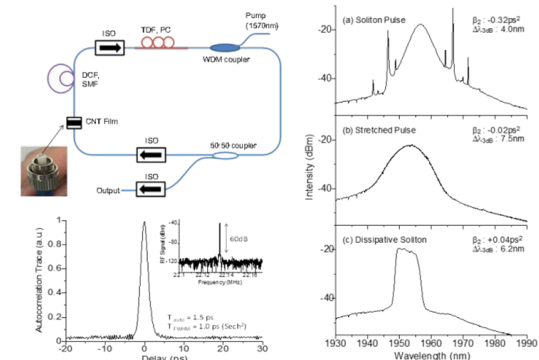


図1 波長2 $\mu\text{m}$ 帯CNTモード同期ファイバレーザ

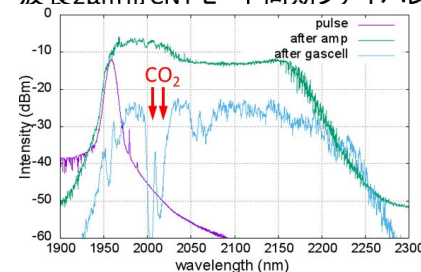


図2 波長2 $\mu\text{m}$ 帯でのSC光周波数コム発生とガス分光応用

さらに、新しい能動モード同期法として図3に示すような励起光変調法を提案し、4psの短パルス発生に成功した。また、光変調器を用いたハイブリッドモード同期 Figure-9 ファイバレーザを提案し、1ps以下の安定な短パルス発生が可能であることを示している(図4)。デュアルコム分光のための光源としてCNT-SAを用いた波長2 $\mu\text{m}$ 帯の双方向発振 Tm ドープ受動モード同期光ファイバレーザの安定な動作を世界で初めて実現している(図5)。パルス幅は1.2psで繰り返し周波数約22MHzであり、CWとCCWの繰り返し周波数差は約600Hzであった。

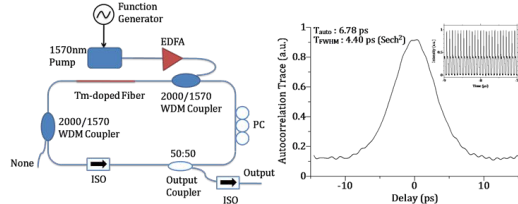


図3 励起光変調能動モード同期ファイバレーザ

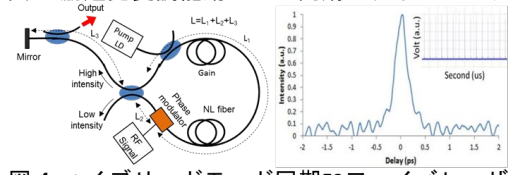


図4 ハイブリッドモード同期F9ファイバレーザ

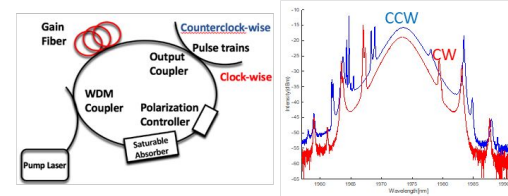


図5 双方向発振受動モード同期ファイバレーザ

また、Tm ドープ光ファイバを利得媒質として用いた波長 2 $\mu\text{m}$  帯分散チューニングによる広帯域・高速波長掃引光源については、全偏波維持光ファイバにより構成し、分散媒質として単一モード光ファイバ(SMF)を用いることで100Hz程度までのスイープ光源を実現した(図6)。これをガス分光分析に応用する検討も進めた。

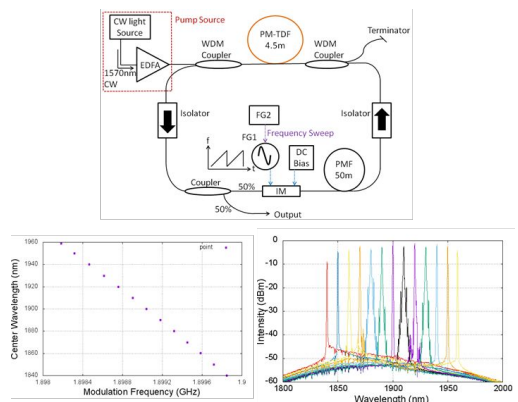


図6 波長2 $\mu\text{m}$ 帯分散チューニングレーザ

OCTへの応用については、分散チューニング波長掃引光源を用いたSS-OCTについて、図7に示すようにデジタルコヒーレント光受信による複素信号処理を用いてフルレンジ

SS-OCT を初めて実現した。これは波長掃引非線形の補償も可能という特長も持っている。

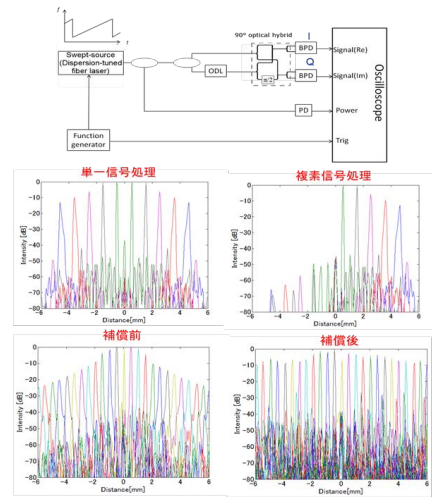


図7 デジタルコヒーレント光受信によるSS-OCTの性能改善

ライダーについては、AMCWライダーにおいて、距離分解能を落とさずに測定距離を広げることができるデジタル信号処理手法を提案し、性能改善を実証した(図8)。

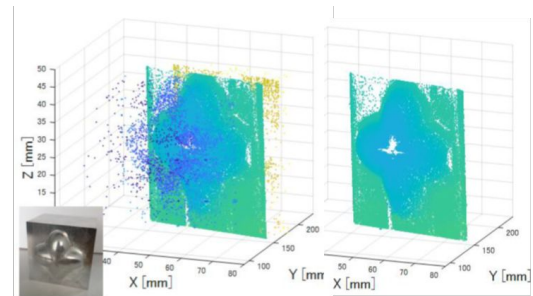


図8 AMCWライダーにおけるエイリアシング除去

## 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 6 件)

- [1] Y. Wang, A. Shaiful, E. D. Obraztova, A. S. Pozharov, S. Y. Set, S. Yamashita, "Generation of stretched pulses and dissipative solitons at 2 $\mu\text{m}$  from an all-fiber mode-locked laser using carbon nanotube saturable absorbers." *Optics Letters*, vol.41, no.16, pp. 3864-3867, Aug. 2016.
- [2] Y. Takubo, T. Shirahata, and S. Yamashita, "Optimization of a dispersion-tuned wavelength-swept fiber laser for optical coherence tomography," *Applied Optics*, vol.55, no.27, pp.7749-7755, Sept. 2016.
- [3] Y. Wang, S. Y. Set, S. Yamashita, "Active mode-locking via pump modulation in a Tm-doped fiber laser," *APL Photonics*, vol.1, 071303, Oct. 2016.
- [4] Y. Takubo and S. Yamashita, "Spectral

- control of a dispersion-tuned wavelength-swept laser," *Electronics Letters*, vol.53, no.2, Jan. 2017.
- [5] Y. Wang, W. Ni, S. Y. Set and S. Yamashita, "Mode-locked thulium-doped fiber laser using a single-layer-graphene-covered tapered fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no.11, pp.913-915, June 2017.
- [6] S. Yamashita, "Dispersion-tuned swept lasers for optical coherence tomography (Invited)," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Special Issue on Fiber Lasers, May/June 2018, to be published.
- [学会発表](計 43 件)
- [1] Y. Takubo and S. Yamashita, "Enhancement of OCT imaging depth by pulse-modulated dispersion-tuned swept fiber laser," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2015*, San Jose, USA, no. STh4L.3, May, 2015.
- [2] T. Honda, Y. Wang and S. Yamashita, "Dispersion management in nanotube mode-locked, compact linear-cavity fiber laser", *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) 2015*, Busan, South Korea, no. 26A3\_2, 24-28 Aug. 2015.
- [3] Y. Wang, A. Shaif-ul, E. D. Obraztsova, A. S. Pozharov, and S. Yamashita, "Dissipative soliton generation at 2 $\mu$ m from a mode-locked fiber laser using CNT", *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) 2015*, Busan, South Korea, no.27A1\_2, 24-28 Aug. 2015.
- [4] S. Yamashita, "Short-pulse fiber lasers using carbon nanotube and graphene (invited)," *NanoCarbon Workshop of PKU-UTokyo*, Tokyo, Japan, 21 July 2015.
- [5] W. Ni, Y. Wang, and S. Yamashita, "Graphene-covered microfiber for passive mode-locking at 1.55  $\mu$ m and 2  $\mu$ m," *20th Microoptics Conference (MOC '15)*, Fukuoka, Japan, 25-28 Oct. 2015.
- [6] S. Yamashita, "Carbon Nanotube and Graphene Photonics (Plenary talk)," *2015 Australian and New Zealand Conference on Optics and Photonics (ANZCOP 2015)*, Adelaide, Australia, 31 Nov.-3 Dec. 2015.
- [7] S. Yamashita, "Advanced Fiber Laser Technologies and Applications (invited)," *RCAST-AICT Joint Workshop "Research Activities Today ~ Thinking of Industry-Academia-Government Collaboration and Social Contributions ~"*, Tokyo, Japan, 5 Jan. 2016.
- [8] Y. Wang, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Thulium-doped fiber laser actively mode locked by modulated pumping," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016*, San Jose, USA, no., 5-10 June 2016.
- [9] W. Ni, B Xu, A. Martinez, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Simplified all-polarization maintaining fiber laser mode-locked in the all-normal dispersion regime," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016*, San Jose, USA, no., 5-10 June 2016.
- [10] T. Shirahata and S. Yamashita, "Full-range measurement and nonlinear sweep compensation in SS-OCT using digital coherent receiver," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2016*, San Jose, USA, no., 5-10 June 2016.
- [11] S. Yamashita, "Nanocarbon materials for short pulse lasers (invited)," *Lasers, Applications, and Technologies (LAT) conference*, Minsk, Belarus, no. LTuA1, 26-30 Sept. 26-30, 2016.
- [12] S. Yokokawa, Y. Wang, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Mode-locked Er-doped fiber laser by pump modulation beyond emission lifetime limit," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2017*, no. SM4L.1, San Jose, USA, May 24-28, 2017.
- [13] Y. Wang, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Pump-to-signal modulation transfer in a Tm-doped fiber for active mode-locking," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2017*, no.SM4L.4, San Jose, USA, May 24-28, 2017.
- [14] T. Honda, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Effects of Non-reciprocal Phase Bias in Figure-8/9 Fiber Lasers," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2017*, no.SM4L.7, San Jose, USA, May 24-28, 2017.
- [15] S. Yamashita, "Nanocarbon materials for short-pulse fiber lasers (Keynote speech)," *Frontiers of Nanochemistry 2017 (FNC-2017)*, Beijing, China, June 9-11, 2017.
- [16] S. Yamashita and S. Y. Set, "Nanocarbon materials for short pulse lasers (invited)," *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) 2017*, no.2-4Q-1, Singapore, Aug. 1-4, 2017.
- [17] J. Hongbo, Y. Wang, S. Y. Set, S. Yamashita, "Bidirectional mode-locked soliton fiber laser in 2 $\mu$ m using CNT saturable absorber," *OSA Topical Meeting on Advanced Solid State Lasers (ASSL)*, no.JM5A.21, Nagoya, Japan, 2-5 Oct. 2017.
- [18] T. Shirahata, S. Y. Set, and S. Yamashita, "Signal reconstruction in SS-OCT using compressed sensing", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2018*, no.ATu3L.2, San Jose, USA, May 13-18, 2018.
- [19] Y. Shirakura, K. Takiguchi, S. Yamashita, and S. Y. Set, "Figure-9 fiber laser with

- phase bias by frequency shifter”, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2018, no.SF3K.4, San Jose, USA, May 13-18, 2018.
- [20] 山下真司, “計測・センシングのための光ファイバ光源技術(招待講演),” 日本学術振興会第179委員会第40回研究会, 弘済会館, 東京, 2015年10月9日.
- [21] 田久保勇也, 山下真司, “高速・広帯域波長可変光ファイバレーザとそのOCT応用(招待講演),” 電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス研究会, 東京農工大学, 東京, 2015年11月25日.
- [22] 白畑卓磨, 山下真司, “OCT応用のための分散チューニングレーザの狭線幅化の研究”, 第57回光波センシング技術研究会講演会, no.LST57-28, 東京理科大学森戸記念館, 東京, 2016年6月14,15日.
- [23] 山下真司, セットジイヨン, “モード同期光ファイバレーザとその応用(招待講演),” 第7回超高速フォトニクスシンポジウム, 情報通信研究機構, 東京, 2016年12月7日.
- [24] 山下真司, “OCTの原理・現状と新規波長掃引光源によるOCTの試み(招待講演)” OPIE'17 メディカル&イメージング特別セミナー, パシフィコ横浜, 2017年4月19日.
- [25] 深津智耀, 本田知恭, セットジイヨン, 山下真司, “対称位相ノ周波数変調を用いた9の字型(Figure-9)モード同期光ファイバレーザ,” レーザー学会ファイバレーザ技術専門委員会第8回委員会, 大阪大学, 2017年7月14日.
- [26] 山下真司, “分散チューニング波長掃引レーザによる光コヒーレンストモグラフィ(招待講演),” 第145回微小光学研究会, vol.35, no.3, pp. 43-54, 東京大学, 2017年9月26日.
- [27] 山下真司, セットジイヨン, “受動ノ能動モード同期光ファイバレーザとその応用(招待講演),” 超高速光エレクトロニクス研究会, 電気通信大学, 東京, 2017年11月17日.
- [28] Yu Wang, Alam Shaif-ul, Elena D. Obraztsova, Anatolii S. Pozharov, Shinji Yamashita, “Dispersion management in mode-locked fiber lasers at 2um using CNT,” 電子情報通信学会2015年ソサエティ大会, 東北大学, 仙台, no.C-4-17, 2015年9月8-11日.
- [29] Weijian Ni, Yu Wang, Shinji Yamashita, “Passive mode-locking at 1.55um and 2um using graphene-covered microfiber,” 電子情報通信学会2015年ソサエティ大会, 東北大学, 仙台, no.C-4-18, 2015年9月8-11日.
- [30] 本田知恭, 王宇, 山下真司, “CNTモード同期ファイバファブリペロレーザでの分散制御による波形・スペクトル変化,” 電子情報通信学会2015年ソサエティ大会, 東北大学, 仙台, no.C-4-19, 2015年9月8-11日.
- [31] 白畑卓磨, 山下真司, “OCT応用に向けた分散チューニングファイバレーザの点像関数のシミュレーション,” 電子情報通信学会2015年ソサエティ大会, 東北大学, 仙台, no.C-4-29, 2015年9月8-11日.
- [32] 永田翼, 白畑卓磨, Set S.Y, 山下真司, “デジタルコヒーレント技術を用いたFMCW反射光計測,” 第63回応用物理学学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, no.21p-H116-17, 2016年3月19-22日.
- [33] 白畑卓磨, 山下真司, “デジタルコヒーレント受信を用いたSS-OCTのFull range測定,” 第63回応用物理学学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, no.21p-P15-4, 2016年3月19-22日.
- [34] Yu Wang, Sze Set, Shinji Yamashita, “Influence of pumping noise on thulium-doped fiber lasers,” 第63回応用物理学学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, no.21a-S611-19, 2016年3月19-22日.
- [35] 山下真司, 田久保勇也, “高速・広帯域分散チューニング波長掃引レーザとそのOCT応用(招待講演),” 電子情報通信学会2016年ソサエティ大会, 北海道大学, 札幌, no. CI-1-8, 2016年9月20-23日.
- [36] 王宇, セットジイヨン, 山下真司, “ポンプ変調による能動モード同期Tmファイバレーザ,” 第77回応用物理学学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ, 新潟, no.14p-P2-4, 2016年9月13-16日.
- [37] 王宇, セットジイヨン, 山下真司, “トリウムドープファイバ中のポンプ光の強度変調による信号光の変調強度の検討,” 第64回応用物理学学会学術講演会, no.14p-P6-2, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月14日-17日.
- [38] 本田知恭, 深津智耀, セットジイヨン, 山下真司, “位相変調誘起 Figure9ファイバレーザ,” 第64回応用物理学学会学術講演会, no.14p-P6-3, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月14日-17日.
- [39] 鈴木昂平, 津田幸宏, セットジイヨン, 山下真司, “ガス分光に向けた中赤外波長掃引分散チューニング光ファイバレーザ,” 第64回応用物理学学会学術講演会, no.14p-P6-5, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月14日-17日.
- [40] 横川翔子, 王宇, 林寧生, セットジイヨン, 山下真司, “励起寿命を超えた励起光直接変調による能動モード同期Erドープ光ファイバレーザ,” 第64回応用物理学学会学術講演会, no.16a-P14-9, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月14日-17日.
- [41] Jiang Hongbo, Yu Wang, Sze Y. Set, Shinji Yamashita, “All-fiber 2um wavelength bi-directional mode-locked laser,” 第78回応用物理学学会秋季学術講演会, 福岡国際



会議場, 福岡, no.5a-C14-4, 2017年9月5-8日.

[42] 深津智耀, セットジイヨン, 山下真司, “音響光学変調器を用いた Figure 9 ファイバレーザ,” 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場, 福岡, no.5a-C14-5, 2017年9月5-8日.

[43] 白倉勇紀, 滝口耕司, セットジイヨン, 山下真司, “音響光学変調器を用いた 9 の字型ファイバレーザの最適化,” 第 65 回応用物理学会学術講演会, no.17p-B403-1, 早稲田大学, 2018年3月17日-20日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: パルス光源及びパルス光を発生させる方法

発明者: セットジイヨン, 山下真司, 王宇

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2016-106828

出願年月日: 2016年5月27日

国内外の別: 国内

名称: 光ファイバレーザ装置

発明者: 山下真司, セットジイヨン, 本田知恭

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2017-034063

出願年月日: 2017年2月24日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cntp.t.u-tokyo.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 真司 (YAMASHITA, Shinji)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号: 40239968

### (2) 研究分担者

セット ジイヨン (SET, Sze Yun)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号: 20530827

### (3) 連携研究者

保立 和夫 (HOTATE, Kazuo)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 60126159

柿木 章伸 (KAKIGI, Akinobu)

東京大学・医学部附属病院・講師

研究者番号: 60243820

(4) 研究協力者

( )