

令和元年5月27日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18868

研究課題名(和文)高安定短パルス受動・能動ハイブリッドモード同期光ファイバレーザとその応用

研究課題名(英文)Hybrid mode-locked fiber lasers and their applications

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) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、受動モード同期光ファイバレーザとして最近注目されている9の字(Figure-9)型レーザ(F9L)について、通常用いられる非相反位相シフタを光変調器で置き換えることを考案し、本研究で実施した。光位相変調器を用いた構成を試作し、パルス幅210fs、スペクトル幅17.94nm、繰り返し周波数は1.54MHzのモード同期短パルスを得た。光位相変調器に代えて光周波数シフタを用いた構成では、光周波数シフタの駆動周波数38.58MHz、ポンプパワー41mWでパルス幅1.9ps、スペクトル幅1.3nmで繰り返し周波数は3.73MHzのモード同期短パルスを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案のF9Lは、受動モード同期と能動モード同期のもつ特長を両立させており、受動モード同期のもつフェムト秒領域での超短パルス発生能力と、能動モード同期のもつパルスの高安定性(低ジッタ・低強度雑音)および高繰り返し周波数化(~10GHz)という特長を両立する優れた短パルス光ファイバレーザが実現できた。このような高安定な短パルス光源は特に計測・計量において重要であり、今後、高繰り返し周波数SCコム計量・計測、非線形光学顕微鏡、およびRZパルス光通信などのシステムの光源としての応用を計画している。

研究成果の概要(英文)：In this project, we proposed to replace the non-reciprocal phase shifter commonly used in Figure-9 fiber lasers (F9L) with optical modulators. We first made an experiment using an optical phase modulator in the F9L, and obtained mode-locked pulse trains with the pulse duration of 210fs, the spectral width of 17.94nm, and the repetition rate of 1.54MHz. We also performed an experiment using as optical frequency shifter in the F9L, and succeeded in generating stable mode-locked pulses at the shift frequency of 38.58MHz and the pump power of 41mW. The pulse duration was 1.9ps, the spectral width was 1.3nm, and the repetition rate was 3.73MHz.

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 非線形ループミラー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ピコ秒・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。また高強度短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。これまでは高強度短パルス光源としては、チタンサファイアレーザに代表される固体レーザが用いられてきたが、最近の技術の進展により短パルス光ファイバレーザでもフェムト秒領域の高強度短パルスを発生できるようになってきている。光ファイバレーザは固体レーザに比較して、Wall-plug効率がよくグリーンである、ビーム品質が良い、放熱が良く冷却が不要、コンパクト、ポータブル、低コスト、高信頼性、といった多くの長がある。しかしながら現状では安定性や繰り返し周波数の点で問題も存在する。

ピコ秒・フェムト秒領域の短パルス発生には受動モード同期が用いられてきた。レーザ共振器中にモード同期素子として高速な可飽和吸収素子(SA)を置くことでレーザの縦モードを同期させ、ピコ秒からフェムト秒領域のパルス列を得ることができる。このとき繰り返し周波数は共振器長に反比例し、典型的には数10MHzである。このような短パルス発生のためには、高速なSAが必須である。ピコ秒・フェムト秒光ファイバレーザに用いられているSAとしては従来から光ファイバ型や半導体型SAが用いられてきており、さらに第三のSAとして申請者の山下らが提案した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SAがある。

受動モード同期がモード同期素子としてSAによる高速な自己強度変調効果を用いるのに対して、光変調器へ外部からRF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。能動モード同期では通常、パルス幅はピコ秒(典型的には数10ps)領域に留まるが、高安定RF信号源を用いることで発生するパルスの安定性が高く、また高調波モード同期と呼ばれる手法によりパルスの繰り返し周波数を上げることできる。

2. 研究の目的

本研究は、光ファイバレーザにおいて受動モード同期と能動モード同期のもつ長を両立させることのできる受動・能動ハイブリッドモード同期光ファイバレーザからの高安定な短パルス発生を実現し、その計量・計測・通信への応用を図るものである。これまでの短パルス光ファイバレーザにはピコ秒・フェムト秒領域のパルスが発生可能な受動モード同期光ファイバレーザ(繰り返し周波数の典型値:数10MHz)と、パルス幅は数10psにとどまるが高繰り返し周波数化(10GHz以上)と低ジッタ・低雑音化が可能な能動モード同期光ファイバレーザがある。短パルス光ファイバレーザは従来の大型の短パルス固体レーザに比べれば、コンパクト・高ビーム品質・低コストなど多くの利点をもつが、現状では安定性や繰り返し周波数の点で問題も存在する。本研究はこの問題点を受動モード同期と能動モード同期とを組み合わせたハイブリッドモード同期とすることで解決しようとするものである。

3. 研究の方法

本研究で検討するレーザは、最近注目されている9の字型レーザ(Figure-of-9 Laser: F9L)をベースにした受動・能動ハイブリッドモード同期光ファイバレーザである。受動モード同期光ファイバレーザ用の光ファイバ型可飽和吸収素子(SA)としては、パルスによる自己位相変調(SPM)効果に基づく非線形位相回転(Nonlinear Polarization Rotation: NPR)を利用したものが一般的であるが、このレーザ構成では原理的に共振器内の偏波コントローラが必要で、偏波の安定性が問題となっていた。偏波が安定な偏波維持光ファイバで構成できるレーザ構成としては20年以上前から非線形ループミラー(Nonlinear Loop Mirror: NOLM)あるいは非線形増幅ループミラー(Nonlinear Amplifying Loop Mirror: NALM)を利用した8の字型レーザ(Figure-of-8 Laser: F8L)がよく知られている。これは光ファイバカップラと光ファイバ(NALMの場合には増幅用光ファイバが加わる)からなる光ファイバループミラーの動作が、光が弱い場合には反射するが、光が強い場合には時計回り(CW)と反時計回り(CCW)光の強度の差(NOLMの場合にはカップラの分岐比の違い、NALMの場合には増幅と非線形の順番の違い)に起因するSPMによる非線形位相シフトが生じるため、透過するようになることを利用したSAである。しかしながら、F8Lはモード同期しきい値が高いためこれまではあまり用いられてこなかった。2014年にF8Lを改良したF9Lがドイツのグループにより提案され、最近注目を浴びており、幾つかのグループが論文を発表している。F9LではNALM部分に非相反位相シフタ(非相反偏波回転素子、ファラデー回転子)を挿入し、CWパルスとCCWパルスに逆の非相反位相シフトを与える。これによりCWとCCW光間に位相バイアスを与えることができ、位相バイアスを適切に選べばSAの飽和強度を下げてモード同期しきい値を低減できると同時に、NALMの動作を反転、つまり低強度成分が透過して高強度成分が反射するようにできるため、F8L(NALMと光ファイバリングにより構成)よりもより簡易なF9L(NALMとミラーにより構成)とすることができる。本研究でのメインのアイデアは、このF9Lの非相反位相シフタを光位相変調器(Phase Modulator: PM)もしくは周波数シフタで置き換えることである。

PMを用いる場合(図1(a))、光位相変調器は基本的に両方向の光に変調をかけることができ

るため、CW パルスと CCW パルスが光位相変調器部分を通るタイミングが異なれば、RF 電気信号によりそれぞれに異なる、つまり非対称な位相シフトを与えることができる。このためには光位相変調器は NALM の中央部分ではなく、端（光ファイバカップラ部分）から近いところに置く必要がある。図 1(a)に示すように CW 光に対して端から長さ L_1 、CCW 光に対して端から長さ L_2 のところに光位相変調器を置くとし ($L_1 > L_2$)、さらに端から左側のミラーまでの長さを L_3 とする。正弦波での位相変調を考えた場合、CW パルスと CCW パルスへ与える位相差が最大になるのは、図 1(b)に示すように CW パルス列が CCW パルス列のちょうど中間に来るときである。これは、共振器長 $L = L_1 + L_2 + 2L_3$ として、

$$L_1 - L_2 = L/2 \Rightarrow 2L_3 = L_1 - 3L_2 \quad (1)$$

を満たすときに成り立つ。ただし、この条件から多少ずれても得られる位相差が減少するだけである。このとき、RF 電気信号の周波数は、共振器長で決まる自由スペクトル間隔(FSR)と同じ、もしくは後述のようにその整数倍

$$f_{RF} = N \cdot FSR = Nc/nL \quad (c:光速, n:光ファイバの屈折率, N:整数) \quad (2)$$

に合わせる必要がある。与える位相差 $\Delta\phi$ の大きさは位相変調器に与える RF 電気信号の大きさを調整する。

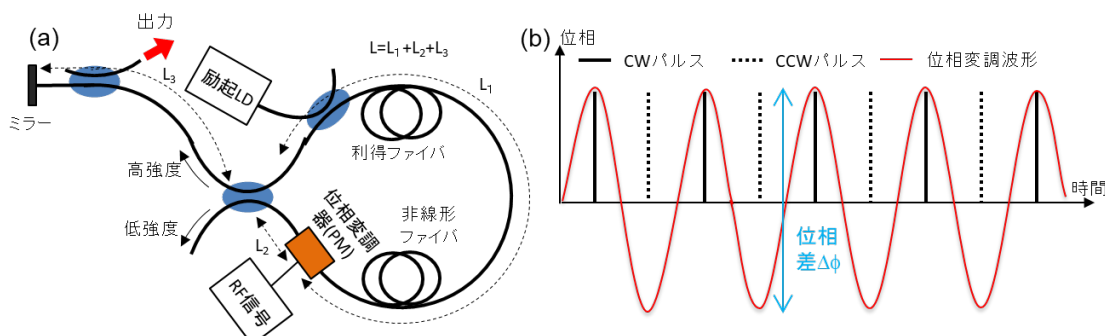


図1 位相変調を用いたF9L (a)構成 (b)位相変調によるパルスと変調のタイミング

非相反偏波回転素子は受動的に CW と CCW 光に位相差を与えるデバイスであるが、本提案方式は CW と CCW パルスの時間差を調節することで位相変調器により能動的に位相差を与えるものである。線形な光ファイバループミラーで同様に CW と CCW 光に非対称な位相変調をかけるとループの反射率が変化する、つまり強度変調がかかることが光ファイバセンサ、特に光ファイバジャイロ(FOG)などの分野ではよく知られている。またこの強度変調を利用した能動モード同期光ファイバレーザ（非線形性を利用していないので受動モード同期ではない）も提案されている。一方、この方式は、光位相変調器により CW と CCW パルスに時間的に位相差を与えて NALM（もしくは NOLM）の位相バイアスを調整できると同時に、光位相変調器とループミラーによる強度変調により能動モード同期をかける方式でもあるため、高調波能動モード同期 ($f_{RF} = N \cdot FSR$, N はモード次数) も可能である。このように本方式は受動モード同期と能動モード同期のもつ特長を両立させることのできる受動・能動ハイブリッドモード同期光ファイバレーザであると言える。

光位相変調器としては高速ナリチウムニオブ酸(LN)導波路型位相変調器が適していると考えられるが、光ファイバジャイロのために実用化されている光カップラと位相変調器を LN 導波路上に集積化した I-FOG チップを利用することも可能である。また、いくつか提案されている光ファイバ型位相変調器を用いることができれば、高出力・高信頼性の観点から有利である。位相変調器に与える RF 電気信号は必ずしも正弦波である必要はなく、パルスや三角波・矩形波を用いる、もしくは共振器長により位相差を最大化するように波形を歪ませる、なども可能である。

同様の原理による CW と CCW パルス光間の非対称位相シフトは、位相変調の代わりに光に Δf の周波数変化を与える光周波数シフタを用いても実現できる。図 1(a)の位相変調器を図 2(a)のように周波数シフタで置き換える。これを図 1(b)のように位相変調の観点から見ると、

$$\phi = 2\pi\Delta f t \quad (3)$$

であるが、位相を $\pm\pi$ の間のみで考えると図 2(b)のように鋸波状の位相変調と考えることができる。周波数シフタが NALM 内の非対称な位置にあるとすれば、図 2(b)に示すように CW と CCW パルス光は異なる位相シフトを受ける。位相差 $\Delta\phi$ が常に同じになるためには、RF 電気信号の周波数は位相変調の場合と同じく

$$f_{RF} = N \cdot FSR = Nc/nL \quad (c:光速, n:光ファイバの屈折率, N:整数) \quad (4)$$

である必要がある。このときの位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta f \cdot n(L_1 - L_2)/c \quad (5)$$

で与えられる。したがって位相差は周波数シフタの位置により調整できる。

光周波数シフタとして第一に考えられるのは音響光学変調器(AOM)であり、数十 MHz 程度の光周波数シフトが得られる。この他に高速な LN 導波路型単一側波帯(SSB)変調器を利用することもできる。また、いくつか提案されている光ファイバ型周波数シフタを用いることができれば、高出力・高信頼性の観点から有利である。

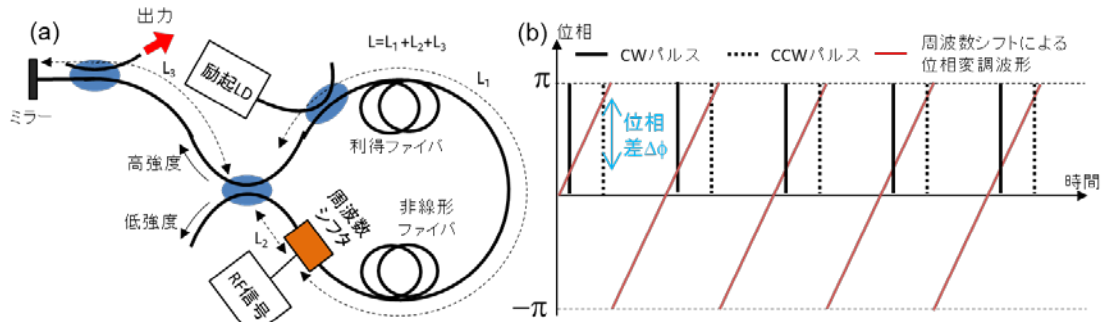


図2 周波数シフタを用いたF9L (a)構成 (b)周波数シフトによるパルスと変調のタイミング

4. 研究成果

PM を用いた場合の実験系を図 3(a) に示す。系は全て偏波維持(PM) ファイバで構成されており、偏波維持シングルモードファイバ(PM-SMF)34m をファイバフェルルール型ミラー(反射率99%)とNALMで挟むことでリニア型の共振器を構成している。NALMは、3dBカップラとゲイン用のErファイバ(PM-EDF)5m、PM-SMF25m、分散シフトファイバ(PM-DSF)20m、位相変調器で構成されている。NALMの透過側ポートは出力として利用されている。ポンプパワー250mWで位相変調を加えることでモード同期が実現された。変調周波数1.64MHzでの出力パルスの光スペクトラムを図3(b)、自己相関波形(差込図にオシロスコープのパルス列)を図3(c)、RFスペクトラムを図3(d)に示す。オートコリレータの分解能は25fs、平均回数は32回である。パルス幅(Sech型)は210fs、スペクトル幅は17.94nm、帯域時間積は0.469であった。繰り返し周波数は1.54MHz、RFスペクトルのSN比は50dB、パルスパワーは3.4pJであった。モード同期は複数の変調周波数で実現し、1.64MHzを除く $1.64 \pm n \times 約 0.1\text{MHz}$ でモード同期が実現した。実現したどのモード同期でも繰り返し周波数は1.64MHzであり、分数モード同期が起こっていると考えられる。

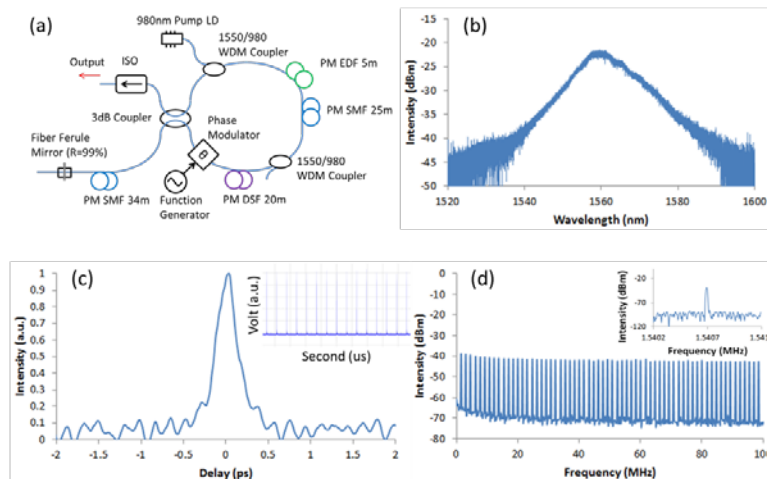


図3 位相変調を用いたF9L実験
(a)実験系 (b)出力光スペクトラム (c)自己相関波形 (d)RFスペクトラム

周波数シフタを用いた場合の実験系を図4(a)に示す。9の字型レーザは全てPMファイバで構成されており、NALMと反射率99%のファイバフェルルールミラーからなる。NALMは3dB光カップラ、Er添加ファイバ(EDF)1.5m、シングルモードファイバ(SMF)36mと周波数シフタ(AOM)からなり、EDFのポンプ光源として980nmの半導体レーザが用いられている。AOMはCWパルスとCCWパルスの位相差を発生させるためにカップラの近くに配置し、任意波形発生器と電気アンプによって駆動した。出力として8:2カップラをミラーとNALMの間に配置した。

AOMの駆動周波数38.58MHz、ポンプパワー41mWでモード同期発振したパルスを計測した。図4(b)は出力パルスの光スペクトル、図4(c)は自己相関波形、図4(d)はRFスペクトルである。光スペクトル形状はパルスがソリトンであることを示しており、その半値全幅は1.3nmである。パルスの繰り返し周波数は3.73MHz、RFスペクトルのSN比は70dBである。出力光の平均パワーは0.13mWであった。自己相関波形から計算されるパルス幅はsech²型パルスを仮定すると3.9psであるが、その波形は非対称になっている。これは出力強度が弱くオートコリレータの感度を高くするため測定時間が長くなり、正確な測定ができなかったためと考えられる。フーリエ限界パルスを仮定するとスペクトル幅よりパルス幅は1.9psと計算される。

AOMの駆動周波数を36MHzから44MHzまで変化させてモード同期閾値の変化を計測した結果を図4(e)に示す。グレーの領域はパルス発振せず、緑色の領域ではQスイッチで動作した。また赤色の領域では不安定なモード同期が観測された。この系における(5)式の Δf の係数

は $L_1=44\text{m}$ 、 $L_2=2\text{m}$ として 1.32rad/MHz であるので、 2π の位相差は 4.76MHz のシフト量変化に相当する。これは閾値変化の周期とよく一致しており、(5)式にしたがって NALM における CW パルスと CCW パルスの位相差が変化していることがわかる。

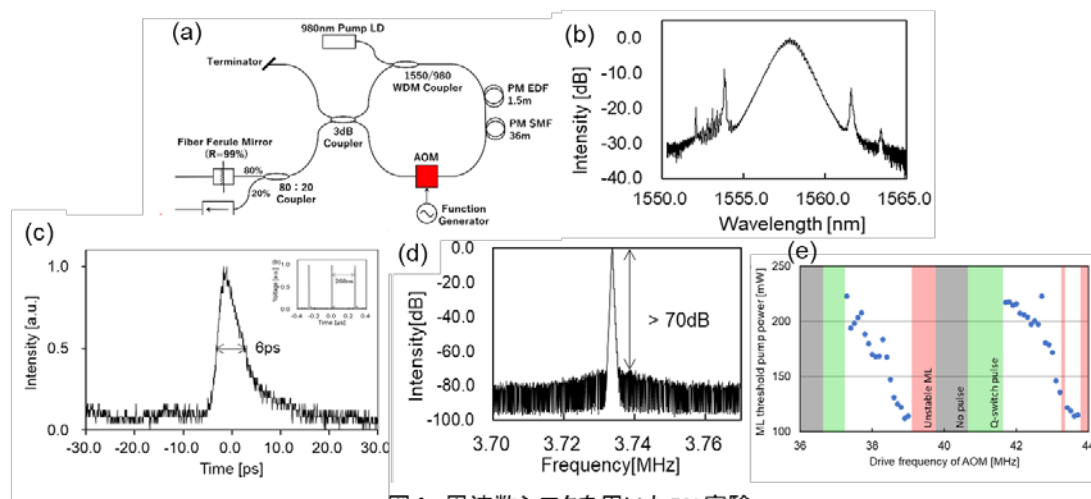


図4 周波数シフトを用いたF9L実験
(a)実験系 (b)出力光スペクトラム (c)自己相関波形 (d)RFスペクトラム
(e)シフト周波数とモード同期しきい値の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 12 件)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 深津智耀、本田知恭、セットジイオン、山下真司, "対称位相/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.
- [4] 深津智耀, セットジイオン, 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.
- [5] 山下真司, セットジイオン, "受動/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.
- [6] 白倉勇紀, 滝口耕司, セットジイオン, 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.
- [7] 溝口慧, 白畑卓磨, セットジイオン, 山下真司, "PM-Figure 8 Laser の最適化について," レーザ学会「ファイバレーザ技術」専門委員会第2回委員会, 休暇村支笏湖, 北海道, 2018年7月26-27日.
- [8] 白畑卓磨, 溝口慧, セットジイオン, 山下真司, "減衰器による8の字型レーザの最適化," 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, no.19a-PA3-3, 2018年9月18-21日.
- [9] 溝口慧, 白畑卓磨, セットジイオン, 山下真司, "偏波維持8の字型レーザの共振器内ロスによるソリトン発振," 第79回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 名古屋, no.19a-PA3-4, 2018年9月18-21日.
- [10] 山下真司, セットジイオン, 滝口耕司, 白倉勇紀, 深津智耀, 本田知恭, "光変調器を用いた Figure-9 ファイバレーザ (招待講演)," レーザー学会第525回研究会「ファイバレーザ技術」, 名古屋大学, 名古屋, 2018年11月16日.
- [11] 溝口慧, 白畑卓磨, セットジイオン, 山下真司, "Figure 8 Laser の発振条件の考察," レーザー学会第525回研究会「ファイバレーザ技術」, 名古屋大学, 名古屋, no.P6, 2018年11月16日.
- [12] 溝口慧, 白畑卓磨, 金磊, セットジイオン, 山下真司, "8の字型レーザにおける非線形増幅ループミラーの変調強度依存性," 応用物理学会春季学術講演会, 東京工業大学, 東京, no.12a-PA2-1, 2019年3月9-12日.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：光ファイバーレーザー装置

発明者：山下真司,セツトジイオン, 本田知恭

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2017-034063

出願年：2017 年

国内外の別： 国内

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：セツト ジ・イオン

ローマ字氏名：Set Sze Yun

所属研究機関名：東京大学

部局名：先端科学技術研究センター

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：20530827

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。