

令和 5 年 5 月 24 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05370

研究課題名(和文) 新しい加工・計測領域を開拓する雑音状パルスレーザーの発振機序解明と実用化要素研究

研究課題名(英文) Oscillation mechanism elucidation and practical use elemental technology research on noise-like pulse laser that develops new processing and measurement region

研究代表者

吉田 実 (Yoshida, Minoru)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：50388493

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：レーザーには連続波とパルスの2種類の発振形態が存在している。何れも、周波数と位相を人間が制御した電磁波である。本研究では、第3の発振形態として、光パルスを雑音の集団のように発生させ、周波数と位相を無秩序に変化させることを狙った。一方で、レーザーの特長である輝度ならびに指向性の高さを確保させた。このための共振器を新規に開発している。

開発した雑音状パルスはから得られる高い非線形性を利用し、波長が1200から2100nmに広がる、スペクトルの平坦性が高い高輝度な白色光の発生に成功している。従来の単一の短パルス列で行われていた類似光源を凌駕した安定性を得るなど、新しい効果と応用を確認している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ファイバ出力型レーザーの特長は、高い輝度(狭い面積から高い光出力を得られる)であるが、安定性や雑音特性に課題があり、平均化などの処理が必要であった。本研究において開発したファイバ型雑音状パルス光源は、従来型レーザー光源の短所を補う新規性を有している。

本光源により得られる白色スペクトルは、これまでのレーザーでは得られない高安定かつなだらかな波長特性を有しており、ハロゲンランプに置き換えが可能である。それと同時にレーザーの特長である高輝度を有しており、研究分野ならびに産業分野における各種計測の精度とスループットの向上が期待でき、新規分野の開拓と生産性の向上に寄与できる。

研究成果の概要(英文)：Two forms of oscillation exist in lasers: continuous wave and pulsed. Both are electromagnetic waves whose frequency and phase are controlled by humans. In this study, as a third form of oscillation, we aimed to generate optical pulses like a group of noises and to change the frequency and phase in a disorderly manner. On the other hand, the brightness and directionality, which are the characteristics of lasers, were ensured. The resonator that generates these pulses has been newly developed.

The developed noise-like pulses have been successfully used to generate high-brightness white light with a broad wavelength spread from 1200 nm to 2100 nm and with high spectral flatness, using the high nonlinearity obtained from the developed noisy pulses. New effects and applications are confirmed, such as obtaining stability that surpasses that of similar conventional light sources that have been done with a single short pulse train.

研究分野：光ファイバ

キーワード：光ファイバ ファイバレーザー パルスレーザー 雑音状パルス パルス群 フェムト秒パルス 広帯域光源 非線形光学効果

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 雑音状パルスレーザー発振の技術的な背景

レーザーの発振形態には、連続波とパルスが存在する。連続波発振は、電気回路の直流に相当し、一定の光出力を発生し続ける発振形態である。パルス発振は、時間的に集中した出力を発生させる。また、パルス発振は、さらに二つに分類される。ひとつは Q スイッチと呼ばれる、レーザー媒質にエネルギーを蓄積しつつ、共振器を構成したりしなかったりすることにより、共振器が構成された初期に集中したエネルギーを放出させる方式で、ナノ秒程度の時間幅と高いピーク出力が得られ、加工用途などに用いられている。もう一つはモードロックと呼ばれ、光波を構成するスペクトル成分の位相を揃えることにより、ピコ秒からフェムト秒程度の短パルスを発生させるパルス発振であり、パルスの繰り返し周波数は共振器の構成により固定される。

雑音状パルスは、連続波とパルス(特にモードロック)発振の中間に位置する第三の発振形態と言えるパルスを発する。雑音状パルスの特徴的な点は以下の 2 点である。

- ・短パルスの集団が発生し、ナノ秒程度の広い包絡線を生じる。
- ・集団状の短パルスであるため、強い非線形性を有することが予想される。

雑音状パルスは、その存在が確認されたのは 2005 年以前であるが、上記の特徴が想定されながらも十分に活用がなされていなかった。その理由として、発生の困難さや再現性と安定性を得ることの難しさがある。

(2) 雑音状パルスが有する課題と解決のための背景

仮に雑音状パルスを安定に発生させることができれば、高い非線形性を利用した新規な光学効果の実用化や、単一のパルスで構成される短パルスレーザーの、ピークパワーの高さに起因するエネルギー伝送特性の上限の打開につなげることが可能と考え、本研究課題を設定して研究を開始した。

研究代表者の研究室は、光ファイバを利用した光増幅ならびに高出力レーザーの開発などを進めており、本研究課題を遂行するために必要となる測定装置をはじめとする研究プラットフォームが存在していたことも研究課題を設定する理由の一つであった。特に、非線形光学効果を利用あるいは抑制するための光ファイバ応用技術を開発しており、今回はファイバ中で発生する非線形光学効果を応用することにより雑音状パルスの発生とその応用を進めた。

2. 研究の目的

光ファイバを利用して構成されるレーザーは、光がファイバ中に閉じ込められており、空間光を利用していない。そのため、ソリッドステートな電子回路に似た安定性と再現性の良さを有している。安定性は、短期的な安定性と長期的な安定性に分類できるが、いずれも良好である。一方で、ファイバは長尺な導波路であるため、温度や振動の影響を受けやすいと点が課題である。また、これまでの研究からは、雑音状パルスの発生は報告されていたが、実用に耐えられる安定性とロバスト性が得られるか否かも不明な状態であった。

上記の現状を考慮し、本研究では、光ファイバを利用した雑音状パルス発生に関して以下の課題を解決することとした。具体的には導波路の長さを活用した光ファイバの非線形性を利用しつつ、ファイバが有する不安定性を相殺する光学系の開発と応用を進めた。これらの課題を解決するために、主に次の 3 つの項目を開発の柱として研究を進めた。

- (1) 不安定性の要因解明と安定な雑音状パルス発生に必要な要素の究明
- (2) 雑音状パルスの高出力化
- (3) 雑音状パルスの発生スペクトル域の拡大と広帯域光源への応用

3. 研究の方法

パルス発振を行うための共振器にはいくつかの構成が提案されており、サブピコ秒の短パルスの発生も進められている。一方で、雑音状パルスの発生方法について学術的な指針が存在しておらず、発振器の開発から開始した。

(1) 雑音状パルス発生のための発振器(共振器)開発

パルス発振を雑音化させるためには、高い非線形光学効果を利用して、増幅媒質に蓄積されたエネルギーを複数のパルスに分割してパルス化して取り出す必要がある。効率的かつ安定にパルス発振可能な光学系を開発した。

(2) 発振特性向上のための要素解明

単パルス発振の場合は、共振器を構成するファイバの波長分散は零分散を軸に検討するが、雑音状パルスの場合は、分散やモードフィールド径等の依存性もよくわかっていない。多くのパルスレーザーのように、発振を起動させるためのトリガが必要か否かもわかっていない。基本特性

を理解し、安定性などの基礎的特性向上のためのデータ取得を行った。また、共振器内の波長分散を自由に検討できる 1.55 μm 帯のみならず、正常分散しか選択できない波長 1 μm 帯においても発振の検討を行った。

(3) 雑音状パルスの出力向上

応用分野にかかわらず、光源の高出力化は測定や加工速度の改善ならびに信号対雑音比の向上に寄与する。出力向上のための励起入力依存性やパルス繰り返し周波数の増加に必要な条件の調査などを実施した。

(4) 応用としての広帯域光源の開発

ハロゲンランプなどの広帯域光源に代替可能な高輝度な光源の開発が望まれている。これまでも短パルスを利用した広帯域光源としてスーパーコンティニウム (Supercontinuum: SC) 光源が開発されていたが、雑音状パルスを利用しても同様の効果が得られるはずであり、この開発を行った。

4. 研究成果

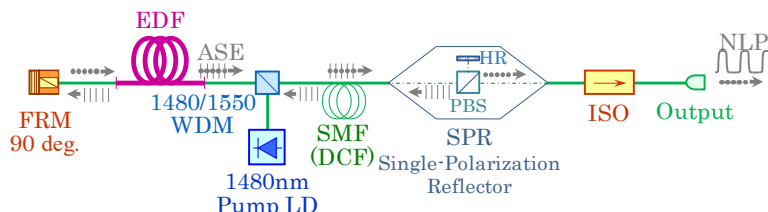
(1) 雑音状パルス発生のための共振器構成

① 発振器の構成と発振機序

今回の課題で開発し、研究の主軸として使用した雑音状パルス発生のための共振器構成を図 1 に示す。全てのファイバに、偏波面を保存しない構造のファイバを利用している。波長 1480nm の励起 LD により増幅媒質となる Er をドープしたファイバ (EDF) を励起すると、増幅された自然放出光 (ASE) が発生する。無偏光な ASE は図中右へ伝搬し、紙面に対して縦方向の偏波は偏波ビームスプリッタ (PBS) を通過し、アイソレータを経て外部に廃却される。紙面に対して平行な偏波成分は PBS により反射され、高反射鏡 (HR) により反射され PBS を経て左方向へ返される。左方向に伝搬する単一偏波となった ASE 光は、EDF で増幅され、ファラデー回転鏡 (FRM) により、偏波面を 90 度回転させられた上で反射され、縦方向の偏波となり右方向へ伝搬する。再び EDF により増幅された後、PBS へ向かう。FRM により、紙面に対して平行方向と縦方向の入れ替えを行うため、共振器内のファイバの状態に依存する複屈折の影響を相殺して、縦方向の偏波となり PBS に入射するため、HR により反射された ASE 光もここで廃却され、共振器として成立しない。

上記の説明のように、図 1 は強固に共振器を構成しない。すなわち、発振器として成り立たない光学構成であるが、共振器内の光強度の揺らぎに起因して、時間的に強度の高い成分が発生し、その成分による非線形屈折率が生じると FRM による偏波補償が行われない偏波変動が発生し、その成分は HR と FRM の間に閉じ込められ、共振器として成立する。極めて強度の高いパルスが発生するまで EDF の反転分布が誘導放出に消費されないため、一旦発振を開始するとバースト状のパルスが発生し、短パルスのバンチ (集団) が生じる。これらが雑音状パルス (NLP) として出力される。

本共振器構成はいくつかの思索を重ねることで完成度の高い雑音状パルス発生装置となったが、目的に依存してこの構成を変更して実験を行った。



NLP: Noise-like Pulse
 EDF: Er-doped fiber, SMF: Single-mode Fiber
 DCF: Dispersion-compensating Fiber
 WDM: Wavelength Division Multiplexer
 ASE: Amplified Spontaneous Emission
 ISO: Isolator, FRM: Faraday Rotator Mirror
 PBS: Polarizing Beam Splitter, HR: High Reflectivity Mirror

図 1 開発した雑音状パルス発生光学系

② 基礎的な発振特性

得られた雑音状パルスの発振特性の例を図 2 以下に示す。図 1 の HR をファイバ接続により PBS から離れた位置に設けることにより、雑音状パルスの包絡線パルス幅を最も広げた時間波形を図 2 に示す。約 19 ns の概ね矩形な時間波形を得られている。このパルス幅はパルス群の包絡線である。このときのパルス繰り返し周波数は 1.93 MHz であった。包絡線パルス幅は、励起入力に依存し、高励起化によりパルス幅が広がり、各パルスのエネルギーが増加する。

HR を図 1 に示す構成にすることにより、PBS から HR 間の光路が機械的に固定されるため、発振特性は安定化する。一方で、パルス幅は 1 から 2 ns 程度と短くなり、時間波形は指数関数的な減衰部分が中心となる。

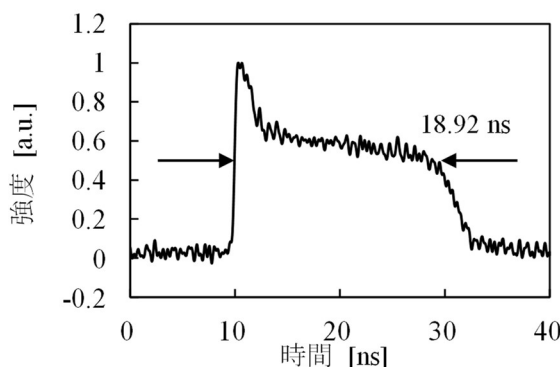


図 2 雑音状パルスの時間波形

(2) 共振器構成と発振特性

① 波長分散特性

波長 1.55 μm 帯は、正常分散と異常分散の何れの分散も選択可能であり、EDF および SMF は異常分散、分散補償ファイバ(DCF)および、非線形性を高めるためのモードフィールド径が SMF の 1/4 程度(約 20 μm^2)のファイバを正常分散として接続し、全長の分散値が-24 fs/nm となる様に構成した。一方、1 μm 帯は-1500 fs/nm の大きな正常分散とした。図 3 に 1.55 μm 帯の自己相関波形とスペクトルを示す。自己相関波形は狭い時間幅のスパイクと広い土台部分で構成されており、その強度が概ね 2 対 1 となり、雑音状パルスである事がわかる。スペクトル半値全幅は 84 nm 程度まで広がっており、内包されるパルス幅はサブピコ秒程度であることが予想できる。

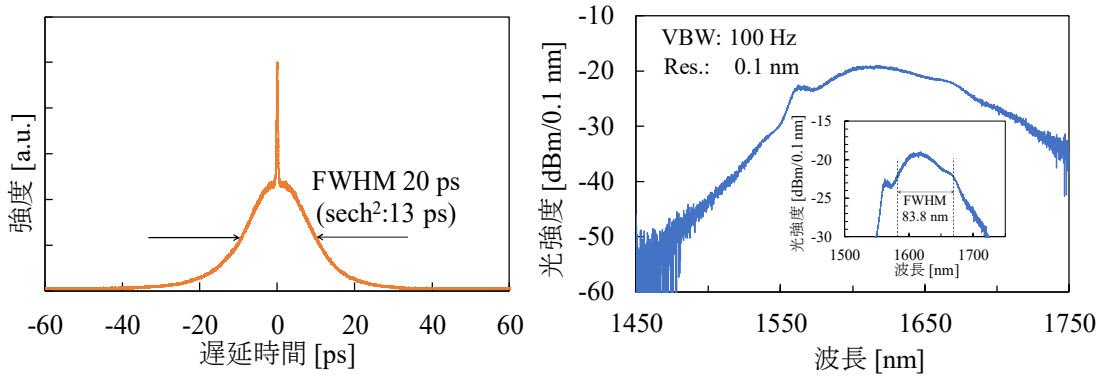


図 3 共振器内波長分散がほぼ零における (左)自己相関波形 (右)スペクトル

1 μm 帯の共振器は、図 1 の共振器から増幅用ファイバを EDF から Yb ドープファイバに、励起光源を 980 nm 帯に、他のデバイスも 1 μm 帯用に変更し、さらに高い正常分散値に耐えられるように非線形性を高めるファイバ構成とした。発振スペクトルを図 4 に示す。1030 nm 付近に雑音状パルスが発生しており、1070 nm 付近は誘導ラマン散乱である。波長分散を利用した時間分解により、何れも 1 ns 程度のパルス幅を持つことが確かめられている。この結果から、本共振器は分散に対して高い耐力を有することがわかる。

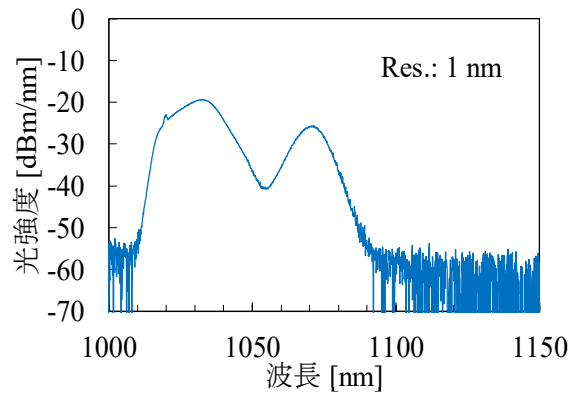


図 4 1 μm 帯発振パルスのスペクトル

② 共振器長

非線形性を利用したパルス発振では、ある程度のピーク出力が必要となるため高繰り返し化が困難な場合がある。雑音状パルス発生におけるパルス特性を確認するため、共振器を構成するファイバを短尺化し、高繰り返し化の検討を行った。最も発振が容易な 2 MHz 程度から、共振器長を 1/5 程度まで短尺化した。その結果、ファイバの特徴である導波路の長尺さを利用した非線形性は低下しているため、使用するファイバの有効コア断面積の組み合わせを最適化する必要はあったが、10 MHz での発振が可能となった。また、発振周波数が 2、5、10 MHz において、パルス幅が 1.22、0.57、0.43 ns と変化し、高繰り返し化によりパルスあたりに割り付けられるエネルギーが低下し、パルス幅が狭くなっていることがわかる。これは、前述の励起入力依存性と同様の作用であると考えている。

③ 発振閾値とヒステリシス

レーザーの発振出力の特徴は、励起入力の増加に対して閾値を以て出力が直線的に増加する点にある。連続波の場合はこれが成り立つが、パルスの場合は様子が異なる。特に、図 1 に示す雑音状パルスの発振では、発振が容易ではない光学系のため、非線形光学効果の発現が不可欠である。そこで、発振閾値近傍の、励起入力の増加と減少に対する発振状態の変化を評価した。

1 μm 帯雑音状パルス発振の、励起入力に対する平均出力の変化を図 5 に示す。励起入力を増加させると、励起入力 98 mW で雑音状パルスとしてパルス発振する。その後、励起入力を増加させると平均出力は単調に高くなる。次に、励起入力を減少させると 79 mW までパルス発振を維持

するが、励起入力をそれ未満に低下させるとパルス発振が停止する。励起入力増加時と減少時で発振閾値に 19 mW の差が存在し、ヒステリシスを形成している。このヒステリシスはパルス発振開始励起入力の約 20% に相当する。パルス発振が開始することに起因する高ピーク出力化によって、一旦パルス化するとその後は非線形光学効果による可飽和吸収効果が維持され、容易にパルス発振が解除されないことを示している。

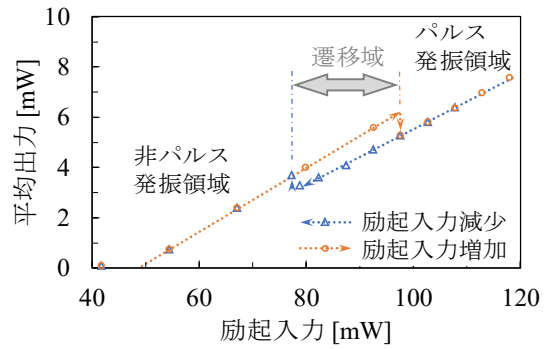


図 5 雑音状パルス発振特性のヒステリシス

(3) 高出力化と安定性

応用を考え、高出力化の二つのアプローチを行った。一つ目の手法として、1 μm 帯の励起入力を高め発振出力を高めた。図 6 に測定結果を示す。パルス閾値の 2.4 倍まで励起入力を高めても飽和傾向を見せず微分効率 12.5% で直線的に出力が増加し、最大変換効率率は 9.8% と高く、さらに、パルス発振を維持し続けているという二つの特徴を有する。これは、単パルスのモードロックとは様子が異なっており、励起入力の増加に対して雑音状パルスの包絡線時間幅を広げ、内部の短パルス数を増加させていることに起因しているものと考えている。また、異なる高出力化手法としてパルス発振器出力をパワーアンプで増幅する方法を想定している。前述のようにパルス繰り返し周波数の増加にも成功しており、周波数を 5 倍に増すことで平均出力は 5 倍まで高められる可能性がある。また、ファイバ光学系を利用したパルスの通倍化の検討も進めている。

実用上は光出力の安定性も重要である。波長 1.55 μm 帯における平均出力 150 mW の雑音状パルス源を開発し、3 時間にわたり出力安定性を評価した結果を図 7 に示す。出力変動は全幅で最大 1.1% ($\pm 0.025\text{dB}$) となっており、高い安定性を得られることがわかる。

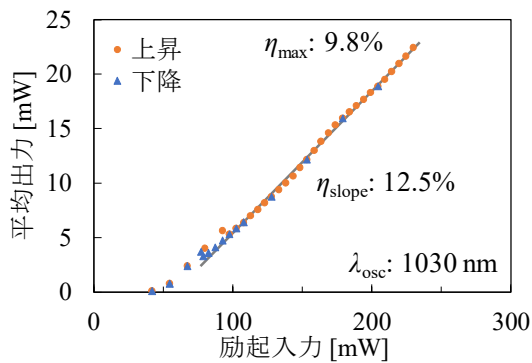


図 6 励起入力に対するパルス出力の変化

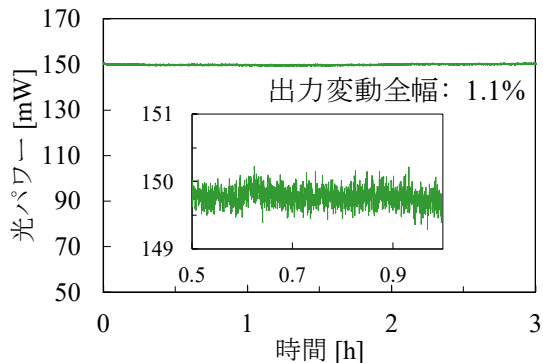


図 7 パルス出力の経時安定性

(4) 雑音状パルスの応用

発振波長 1.55 および 1 μm 帯の雑音状パルスの応用として、高非線形ファイバに入力し SC 光発生を試みた。図 8 に示す 1 μm 帯は短波長域に限定した高効率な出力を得ている。図 9 に示す 1.55 μm 帯は 1150 から 2100 nm まで広がっていることが別の計測で確認されている。1400 nm 帯のリプルは水の吸収である。平坦なスペクトルかつ一時間の最大偏差が 0.20dB と高安定でありコア径 10 μm の SMF から高輝度光を得られるため、光計測の高速化と低雑音化が両立できる。

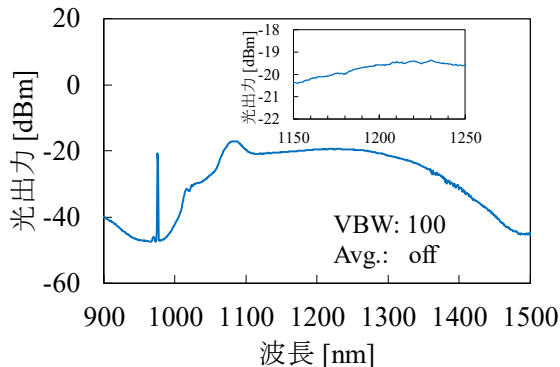


図 8 1 μm 帯 SC 光のスペクトルと平坦性

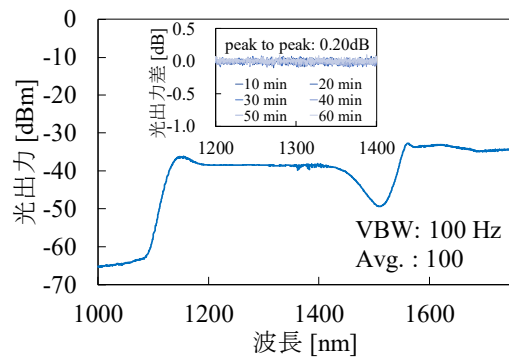


図 9 1.55 μm 帯 SC 光スペクトルと安定

<引用文献>

宮崎麻琴、吉田実、関口翔大、非偏波保持ファイバを使用した 1.55 μm 高安定ノイズライクパルスファレーザの開発、レーザー研究、Vol. 51、No. 3、2023、pp. 176-180

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 宮崎麻琴、吉田実、関口翔大	4. 巻 51
2. 論文標題 非偏波保持ファイバを使用した1.55 μm高安定ノイズライクパルスファレーザの開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 176-180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Yusuke, Yamazaki Tetsuya, Yoshida Minoru	4. 巻 32
2. 論文標題 Development of all-fiber coherent beam combining optical system toward higher output of the fiber laser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Laser Applications	6. 最初と最後の頁 022077 ~ 022077
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2351/7.0000058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 西林慶，吉田実
2. 発表標題 位相受動整合コヒーレント加算光学系によるフェムト秒パルスレーザーの高エネルギー化
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 豊貞友翔，西林慶，田辺将大，吉田実
2. 発表標題 全ファイバ型フェムト秒パルスレーザーの共振器内総分散による出力特性の評価
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新崎公太良, 垣之内大稀, 田辺将大, 吉田実
2. 発表標題 干渉による波長分散測定法の検討
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田辺将大, 吉田実, 鈴木喜晴, 関口翔大
2. 発表標題 全ファイバ型1.55 μm 帯高繰り返しノイズライクパルス光源の開発
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 垣之内大稀, 吉田実, 鈴木喜晴, 関口翔太
2. 発表標題 スペクトル平坦性の高い1 μm 帯受動モード同期ファイバレーザーの開発
3. 学会等名 令和4年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田実, 宮崎麻琴, 藤澤米敏, 西林慶, 関口翔大
2. 発表標題 光ファイバを利用した光パルスの発生とその応用
3. 学会等名 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西林慶, 吉田実
2. 発表標題 フェムト秒パルスレーザーを用いた全ファイバ型CPA光学系による高出力化の検討
3. 学会等名 令和3年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 垣之内大稀, 藤澤栄敏, 西林慶, 吉田実
2. 発表標題 光ファイバ内で生じる誘導ブリルアン散乱の抑制と利用に向けた特性評価
3. 学会等名 令和3年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田辺将大, 西林慶, 藤澤栄敏, 吉田実, 鈴木喜晴, 関口翔大
2. 発表標題 ノイズライクパルスを種光とするスーパーコンティニューム光の帯域拡大に関する検討
3. 学会等名 令和3年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤澤栄敏, 吉田実(近畿大), 鈴木喜晴, 関口翔大
2. 発表標題 全ファイバ型1 µm帯受動モード同期レーザーにおけるパルスの生成と特性評価
3. 学会等名 令和3年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hitoshi Nakano, Minoru Yoshida
2. 発表標題 High stability of frequency and robustness of noise-like pulse fiber laser
3. 学会等名 Laser Precision Microfabrication (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Yamazaki, Minoru Yoshida
2. 発表標題 Broadband pulsed fiber laser for suppression of stimulated Brillouin scattering
3. 学会等名 Laser Precision Microfabrication (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野仁志、吉田 実
2. 発表標題 非線形偏波回転を用いたモード同期レーザーの発振形態を判別可能なシミュレータの開発
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠藤かのこ、中野仁志、吉田 実
2. 発表標題 高安定ノイズライクパルスファイバレーザーにおける発振特性の評価
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎哲也、吉田 実
2. 発表標題 パルスファイバレーザの高出力化に向けた低雑音なEDFAの最適化
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 全ファイバ型1 μ m帯受動モード同期パルスファイバレーザの開発
2. 発表標題 藤澤栄敏、吉田 実
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一ノ瀬博明、吉田 実
2. 発表標題 パルスレーザーを用いた微細加工における加工痕形状の繰り返し周波数依存性
3. 学会等名 令和元年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

近畿大学機能光回路研究室
<https://www.ele.kindai.ac.jp/laboratory/yoshida/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------