

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05301

研究課題名（和文）波長2 $\mu$ m帯レーザー加工用、高エネルギー超短パルスTmファイバー発振器の開発

研究課題名（英文）Development of high energy short pulse Tm fiber oscillator and processing application

研究代表者

戸倉川 正樹（Tokurakawa, Masaki）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：80728246

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではW型屈折率分布分散制御Tm添加ファイバーを用いた、ストレッチパルスモード同期レーザーを開発し、パルス幅サブpsの4 nJ出力を達成した。またさらなる高出力化のためダブルクラッドTm:ZBLANファイバーを用いたMamyshev発振器やモード同期Tm固体レーザーの開発にも取り組み、後者では最短パルスの発生に成功した。さらに大口径ファイバー増幅器を用いた平均出力7 W、パルスエネルギー700 $\mu$ J、パルス幅42 nsのレーザー加工光源を開発し、ポリマー材料の切断・融着実験およびSi、Geウエハのステルス加工実験を行い、波長2  $\mu$ mパルス光源のレーザー加工データを取得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波長2 $\mu$ m帯正常分散Tmファイバーを用いたストレッチパルスモード同期レーザーの開発を行いサブpsパルスを4nJのパルスエネルギーにて得ることに成功した。また固体レーザーでは最短パルスの発生に成功した。さらにナノ秒領域の平均出力7 W、エネルギー700 $\mu$ J、パルス幅42 nsの高エネルギー動作は世界的に見ても高い値であり、ポリマー材料のレーザー加工やSi、Geのステルス加工実験を行えた意味は大きい。ステルス加工はSiでは1.5 $\mu$ m帯のレーザー光を用いても可能であるが、Geは吸収を持つため難しく、我々の知る限りでは波長2  $\mu$ m帯パルスレーザーを用いたGeのステルス加工は初めての報告である。

研究成果の概要（英文）：In the research project, we have developed an stretched pulse mode-locked laser with a dispersion controlled Tm silica fiber. A sub-ps pulse duration with 4 nJ pulse energy was obtained. For further power scaling double clad Tm:ZBLAN fiber Mamyshev oscillator and mode-locked Tm solid state laser were studied. The Tm solid laser system enabled generation of the shortest pulse duration of Tm lase ever reported. In addition, we developed a Q switched Tm fiber laser system with an average power of 7W, pulse energy of 700  $\mu$ J and pulse duration of 42 ns. With the ns light source, we demonstrated laser processing, cutting and welding of polymers and stealth processing of Si and Ge wafers.

研究分野：レーザー工学

キーワード：Tmファイバーレーザー レーザー加工 ステルス加工 2 $\mu$ mレーザー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 波長 2  $\mu\text{m}$  帯 Tm レーザー光は既存の波長 1 $\mu\text{m}$ Yb レーザーでは困難なポリマー材料の溶接・切断加工や、シリコン、ゲルマニウムなどの半導体材料の 3 次元加工などへの応用が期待されていた。また波長 10  $\mu\text{m}$  の CO<sub>2</sub> レーザーなどと比較すると、集光特性に優れより高精度な加工が可能で、さらに一般的なファイバーでの引き回しも可能であり扱いやすいといった特徴が知られていた。しかし市販の波長 2  $\mu\text{m}$  光源は連続発振のものが多く、特にナノ秒やフェムト秒光源となるとその平均出力、パルス幅、パルスエネルギーは限られており、加工実験データも非常に少なかった。

(2) 特にフェムト秒領域のファイバー発振器を考えると、得られるパルス幅やエネルギーはその発振モード(発振器の分散値)に強く依存し、一般に正常分散ファイバーを利用すると、共振器内のパルス伸縮によりピーク光強度が低下し、より高いパルスエネルギーの発生が可能となり、波長 1  $\mu\text{m}$  帯 Yb ファイバーレーザーでは 2018 年には正常分散を用いた Mamyshev 発振器からの直接発生により 140 nJ もの高パルスエネルギー、かつ 40 fs 以下まで圧縮可能なパルス出力が得られていた(表 1)。しかし波長 2  $\mu\text{m}$  帯においては一般的なシリカファイバーは大きな異常分散を示し、このような高エネルギーで短パルスな動作は実現されていなかった。

申請者は 2018 年に Tm フッ化物(ZBLAN)ファイバーのコア径を制御することにより正常分散とした、世界初の波長 2  $\mu\text{m}$  帯全正常分散 Tm : ZBLAN ファイバーレーザーによる短パルス nJ エネルギー動作を実現したが、これを改良発展させることにより一層の短パルス化、高出力化が可能となると考えられた。

**表 1. 波長 1~1.5  $\mu\text{m}$  帯モード同期ファイバー発振器の主な特性比較**

	Pulse energy	Dispersion	Pulse duration (fs)
ソリトンモード同期	< 0.5 nJ	異常分散	~100s
ストレッチパルスモード同期	< 3 nJ	~0 分散	~50 (圧縮後)
<b>全正常分散モード同期</b>	<b>&lt; 20 nJ</b>	<b>全正常分散</b>	<b>~70 (圧縮後)</b>
<b>Mamyshev 発振器</b>	<b>~ 140 nJ</b>	<b>全正常分散</b>	<b>~40 (圧縮後)</b>

## 2. 研究の目的

本研究の目的は大きく分けら(1)波長 2  $\mu\text{m}$  帯の超短パルス光源の開発と(2)それを用いた加工応用である。

(1)波長 2 $\mu\text{m}$  帯超短パルス発振器から得られるレーザー光のパルス幅、パルスエネルギー、平均出力を向上させるため、理学的な理解を深め出力スケールを明らかにするとともに、工学的な新規光源の開発を行う。またレーザー加工応用を進めるためナノ秒-フェムト秒で  $\mu\text{J}$  以上のパルスエネルギーを有する扱いやすい加工光源を開発する。

(2)開発した光源を用いて各種ポリマーや半導体材料に対してレーザー加工実験を行い、波長 2  $\mu\text{m}$  光源の特性を生かした新規レーザー加工応用を開拓する。

## 3. 研究の方法

(1)波長 2 $\mu\text{m}$  帯の高出力な超短パルスファイバーレーザーを開発するにはこの波長帯で正常分散を有する利得ファイバーを利用することがカギとなるため、

W 型屈折率分布による分散制御を用いた正常分散 Tm 添加シリカーファイバーを用いストレッチパルスモード同期レーザー開発を行った。このファイバーは共同研究先シンガポール NTU の Prof. Seongwoo より提供された。

材料分散の少ない Tm:ZBLAN ファイバーを用いた Mamyshev レーザー開発を行った。ダブルクラッド構造のファイバーを用いて安価なレーザーダイオード励起を可能とし、さらに Mamyshev 機構によるモード同期の実現による一層の高出力を狙った。

ファイバー以外の選択肢を考えて固体媒質を用いたレーザーの開発を行った。こちらは利得媒質を共同研究先ドイツ IKZ の Dr. Krankel より提供を受けた。

加工実験を行うため音響光学変調器を用いてナノ秒パルス幅で 100 $\mu\text{J}$  以上の出力が可能なファイバーレーザーシステムを開発した。

(2)上で開発した光源を用いてポリマー材料や半導体材料を対象として繰り返しや周波数やパルスエネルギーを変化させて、レーザー加工実験を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 波長 2 μm 帯の高出力な超短パルスレーザーの開発

W型屈折率分布分散制御 Tm 添加シリカーファイバーを用いたストレッチパルスモード同期レーザー開発

共同研究先シンガポール NTU の Prof. Seongwoo より提供された分散制御ファイバーを用いて図1に示される、非線形偏光回転を利用した、ストレッチパルスモード同期レーザーを開発した。この時 UHNA7 と SMF28 ファイバーの長さを調節し分散量変化させその影響を調べた。分散量を 0.057 ps<sup>2</sup> としたとき最大パルスエネルギー4 nJ がサブ ps のパルス幅で得られた。現在のファイバーコア径から考えると数 10nJ までの高出力化が期待される。

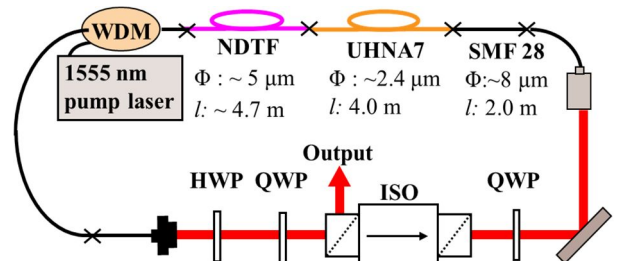


図1 分散制御 Tm ファイバーを用いたストレッチパルスモード同期レーザー

Tm:ZBLAN ファイバーを用いた Mamyshev レーザー開発  
ダブルクラッド Tm:ZBLAN ファイバーを用いて図2に示される Mamyshev 型レーザー発振器を構築した。これは共振器中に中心波長の異なる二つのバンドパスフィルタ BPF1, 2 を有しており、超短パルス発振時に非線形光学効果によってスペクトルの拡大が発生した場合のみにレーザー発振が可能となる構成である。まずはこの構成から BPF2 を除いた状態でモード同期発振をこころみたところ、パルス発振が確認されたが、ジャイアントパルスによるファイバー端面の損傷が発生してしまった。ファイバー端面の再研磨を行い、同様の実験を行ったが再び同様の破壊現象が起きてしまい、ファイバー端面の破壊を防ぐエンドキャップなどの処理が必要であることがわかった。

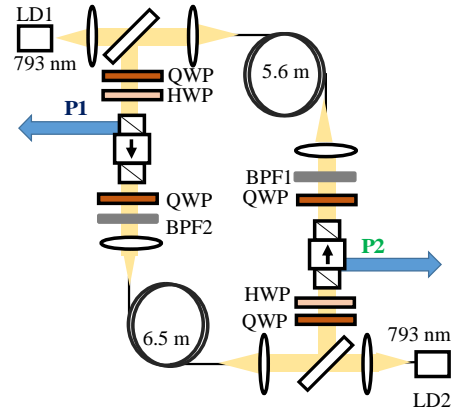


図2 Tm : ZBLAN ファイバーを用いた Mamyshev レーザー

##### カーレンズモード同期 Tm 固体レーザーの開発

レーザー共振器内で2種類以上の利得媒質を用いる複合利得媒質レーザーによる利得の広帯域化とカーレンズモード同期による高速変調効果を用いたモード同期レーザーの開発を行った。分散補償鏡を用いた損失の低減も行った結果パルス幅 41fs という現在までに報告されている Tm 添加固体レーザーにおける最短パルスの発生に成功した(図3)。この研究ではドイツ IKZ の Dr. Krankel より利得媒質の提供を受けた。

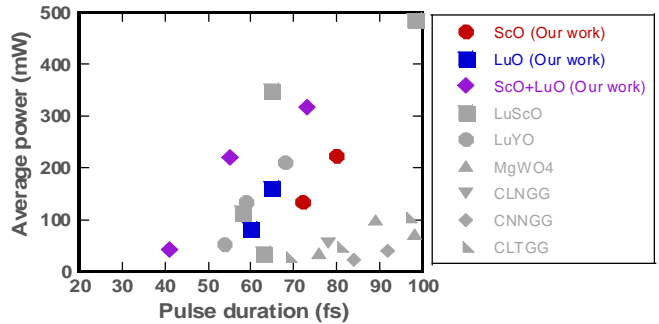


図3 Tm 添加超短パルス固体レーザーのパルス幅と平均出力

##### ナノ秒ファイバーレーザーシステムの開発

レーザー加工実験のため図4に示される音響光学変調器(AOM)を用いたナノ秒 Q スイッチレーザーシステムを構築した。発振器と増幅器からなり、発振器では AOM によって、パルスの繰り返し周波数やパルス幅を変化させることが可能であり、増幅器ではコア径 25μm の大口径 Tm 添加ファイバーを利用し 10 kW 以上の高いピーク光強度を可能としている。この系において 42 ns のパルス幅で最大パルスエネルギー700 μJ, 平均出力 7 W を得ることができた(表2)。

表2 ナノ秒レーザー増幅特性

Rep. rate. (kHz)	P <sub>average</sub> (W)	Δt (ns)	E <sub>p</sub> (μJ)	P <sub>peak</sub> (kW)
30	9.3	121	310	2.6
10	7	42	700	16.6

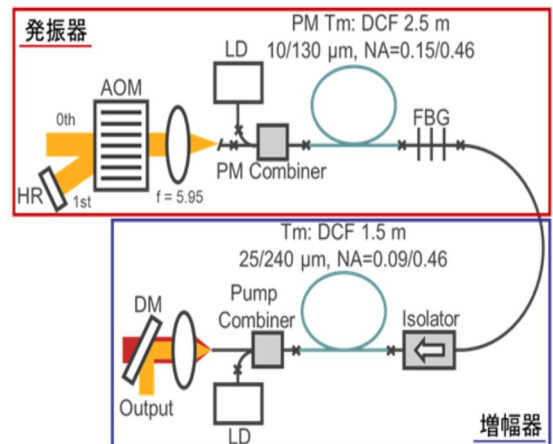


図4 ナノ秒ファイバーレーザーシステム

## (2) レーザー加工実験

開発したナノ秒レーザーを用い各種ポリマーや半導体材料に対してレーザー加工実験を行った．  
ポリアセタール(POM)，ポリプロピレン(PP)の加工実験．

厚さは両試料とも 0.5 mm であり，光源の繰り返し周波数を 30 kHz とし補助剤なしで試料表面に 25  $\mu\text{m}$  径で集光している．平均出力と加工ステージの移動速度を変化させて観察された加工痕を図 5 にそれぞれ示す．POM では出力 2.2 W，加工ステージ移動速度 0.125mm/s 時に切断が確認された．出力の低下や加工ステージ移動速度の上昇を行うと，より微細な加工痕が確認された．PP では出力 2.2 W，加工ステージ移動速度 0.125 mm/s, 0.25mm/s では一度溶解切断され，冷却後に再凝固し切断痕が繋がることが確認された．

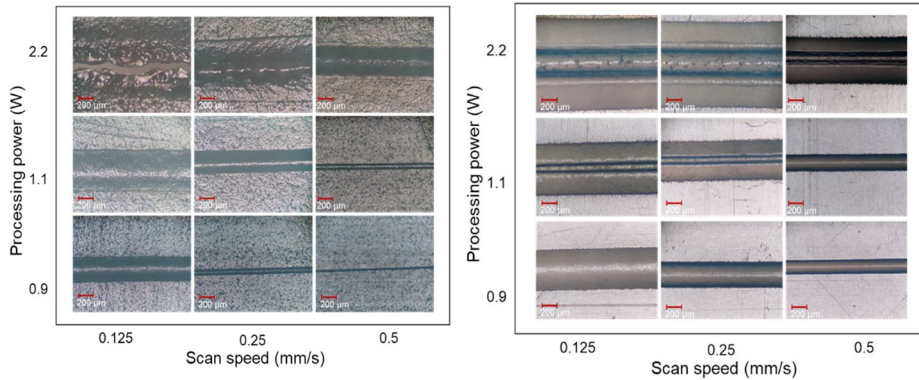


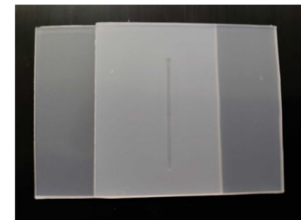
図 5 (左) ポリアセタール, (右)ポリプロピレンの加工痕

## ポリマー材料の溶着実験

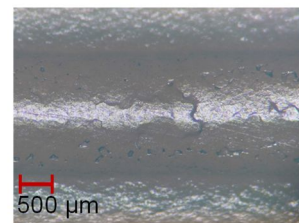
試料はポリプロピレン(PP)，ポリスチレン(PS)，ポリカーボネート(PC)を用い，光源出力は 5.1 W，ステージ移動速度は 0.25 mm/s とした．結果一覧を表 3，図 6 に示す．PS と PC では同種材料，異種材料ともに接合が可能であったが，PP においては同種材料においてのみ接合が確認された．これは PP が結晶性樹脂であることに対して，PS, PC は非結晶性樹脂であり，粘土差が大きく拡散が起きづらかったことが原因と考えられる

表 3 接合実験結果一覧

試料材	PP	PS	PC
PP	○		
PS	×	○	
PC	×	○	○



溶着後ポリアセタール画像



表面(レーザー入射面)

図 6 融着されたポリマー

## Si および Ge 基板の stealth 加工

ナノ秒加工光源を繰り返し周波数 10 kHz，平均出力 7W，ピークパワー16.6 kW とし，Si, Ge 基板裏面に集光しレーザー加工実験を行った．このとき図 7 に示される結果が得られ，Si, Ge 共にレーザー光入射側表面には加工痕が発生しておらず，裏面の集光点付近においてのみ加工痕が確認された．このときレーザーの繰り返し周波数を 30 kHz とし，平均出力を 9 W と増加させ，ピークパワーは 2.6 kW 低下させると加工痕は形成されなかった．また形成された加工痕を見ると Ge に比べ Si は小さかった．これは 2  $\mu\text{m}$  光の 2 光子吸収に相当する 1  $\mu\text{m}$  における Si 吸収係数が Ge に比べて 1 桁以上小さいためと推測される．これを考えると Si のステルス加工においては 1.5  $\mu\text{m}$  帯の Er レーザー光がより適している可能性があるが Ge においては波長 1.5  $\mu\text{m}$  帯では線形吸収が大きいため，ステルス加工が難しく，波長 2  $\mu\text{m}$  帯レーザーを使うことに利点があると考えられる．

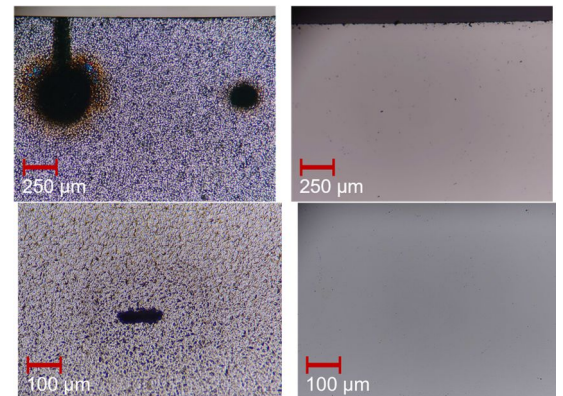


図 7 (上) Ge, (下)Si wafar のステルス加工痕  
左側が裏面集光部であり，表面の入射面である．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 戸倉川正樹、鈴木杏奈、矢津田匠海	4. 巻 28
2. 論文標題 レーザー加工のための波長2 $\mu$ m帯短パルスTmレーザー光源の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 レーザー加工学会誌	6. 最初と最後の頁 3-8
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 A. Suzuki, C. Kraekel and M. Tokurakawa	4. 巻 13
2. 論文標題 High quality-factor Kerr-lens mode-locked Tm:Sc203 single crystal laser with anomalous spectral broadening	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 52007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab88c3	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 該当する
1. 著者名 戸倉川 正樹	4. 巻 29
2. 論文標題 波長2 $\mu$ m帯ナノ秒、フェムト秒短パルス Tmレーザー光源の開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 天田財団「FORM TECH REVIEW 2019」 29, 105-110	6. 最初と最後の頁 105-110
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Masaki Tokurakawa, Hiromu Sagara, and Henrik Tunnermann	4. 巻 27
2. 論文標題 All-normal-dispersion nonlinear polarization rotation mode-locked Tm:ZBLAN fiber laser	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19530-19535
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.27.019530	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Anna Suzuki, Christian Krankel and Masaki Tokurakawa	4. 巻 13
2. 論文標題 High quality-factor Kerr-lens mode-locked Tm:Sc203 single crystal laser with anomalous spectral broadening	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 52007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab88c3	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19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Anna Suzuki, Masaki Tokurakawa, Christian Kraenkel
2. 発表標題 Kerr-lens mode-locked Tm <sup>3+</sup> :RE203
3. 学会等名 ALPS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Kikuchi, A. Suzuki, M. Tokurakawa
2. 発表標題 1650 nm broad-stripe diode in-band pumped Tm:Lu203 ceramic laser
3. 学会等名 ALPS2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 杏奈、Christian Kraenkel、戸倉川 正樹
2. 発表標題 Tm:RE203(RE=Lu, Sc)複合利得媒質を用いたカーレンズモード同期レーザーによる サブ 9 サイクルパルス 発生
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内園 裕也、佐藤 匠、Chen Yuhao、Sidharthan Raghuraman、Woo Seong Yoo、戸倉川 正樹
2. 発表標題 波長2 $\mu$ 帯正常分散 $T_m$ ファイバーを用いたモード同期レーザーの開発
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地音、鈴木杏奈、戸倉川正樹
2. 発表標題 波長1650 nmLD励起 $T_m$ :Lu203セラミックレーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会 第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 匠、Yuhao Chen、Raghuraman Sidharthan、Seong Yoo、戸倉川 正樹
2. 発表標題 $T_m$ 添加分散設計シリカファイバーを用いたストレッチパルスモード同期レーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会 第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 杏奈、Kraenkel Christian、戸倉川 正樹
2. 発表標題 $T_m$ 添加媒質を用いた複合利得発振器
3. 学会等名 レーザー学会 第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢津田匠、原田有生、戸倉川正樹
2. 発表標題 nsパルスQスイッチTmファイバーレーザー
3. 学会等名 レーザー学会 第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木杏奈、Christian Krankel, 戸倉川 正樹
2. 発表標題 Tm添加複合利得媒質を用いたカーレンズモード同期レーザー
3. 学会等名 第5回超高速光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤 匠, Yuhao Chen, and R. Sidharthan, Seongwoo Yoo, 戸倉川 正樹
2. 発表標題 分散設計Tm添加シリカファイバーを用いた0分散近傍での非線形偏波回転モード同期レーザーの開発
3. 学会等名 第5回超高速光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢津田 匠海、原田有生、戸倉川 正樹
2. 発表標題 非線形散乱フィードバックを用いたサブ100 uJナノ秒Tmファイバーレーザー
3. 学会等名 レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 佐藤 匠、Yuhao Chen, and R. Sidharthan, Seongwoo Yoo, 戸倉川 正樹
2. 発表標題 分散制御Tm添加シリカファイバーを用いた0分散近傍での非線形偏波回転モード同期レーザーの開発
3. 学会等名 レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.Yatsuda, M.Tokurakawa
2. 発表標題 Few ns Q-switched Tm fiber laser
3. 学会等名 ALPS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Uchizono, T.Sato , Y. Chen, R. Sidharthan, S. W. Yoo, M.Tokurakawa
2. 発表標題 2 μm mode-locked lasers with normal dispersion Tm doped gain fibers
3. 学会等名 ALPS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸倉川 正樹、原田 有生
2. 発表標題 AOMを用いたQスイッチTmファイバーレーザ
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木 杏奈、戸倉川 正樹
2. 発表標題 カーレンズモード同期Tm3+:Lu203セラミックレーザーの開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木杏奈、Christian Keankel, 戸倉川 正樹
2. 発表標題 共振内スペクトル広帯域化を伴うモード同期 Tm:Sc203 laser レーザ
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Anna Suzuki, Masaki Tokurakawa, and Christian Krankel
2. 発表標題 High Quality-Factor Kerr-lens Mode-locked Tm:Sc203 Laser with anomalous spectral broadening
3. 学会等名 CLEO Europe (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiromu Sagara and Masaki Tokurakawa
2. 発表標題 All-normal-dispersion mode-locked Tm:ZBLAN fiber laser
3. 学会等名 CLEO Europe (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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			
シンガポール	Nanyang Technological University			
ドイツ	Leibniz-Institute for crystal growth			