

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 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：2014～2016

課題番号：26390090

研究課題名(和文) 高エネルギー効率化を可能とする国産技術中心の位相结合ファイバレーザーの高出力化

研究課題名(英文) Development of fiber laser that enables high-energy-efficiency and improvement of output power that mainly used domestic technology

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：ファイバレーザーは、高性能であり、産業への応用が進められている。通常用いられるダブルクラッド型ファイバレーザーではなく、国産技術で開発可能な単一モードファイバを用いた光部品を利用し、高出力化を目指した。

位相结合技術を開発し、複数のファイバレーザーを単一の共振器として駆動させた。その際、必要となる技術の開発に成功した。

以下の技術の開発に成功した。ファイバ長を20nm程度の高い精度で制御する技術。出力の不均一なレーザーを位相结合する技術。任意の数のレーザーを位相结合し、任意の出力を得る技術。最終的に、5台のファイバレーザーモジュールを位相结合し、出力として5.09 Wを達成し目標を満たした。

研究成果の概要(英文)：Fiber lasers have high performances. Therefore, the fiber lasers are applied in manufacturing fields. We developed the high power fiber laser without using the double-clad fiber technology. Five fiber laser modules (FLMs) were combined to single fiber laser cavity by our coherent-cavity-combining technologies.

In this research, we achieved the development of below indispensable technology concerning the coherent-cavity-combining systems. High precision fiber length control system that has resolution of 20 nm. The combining methods of arbitrary number of fiber laser module. Finally, we achieved 5.09 W laser output power from a single single mode fiber by combined five FLMs.

研究分野：工学

キーワード：ファイバレーザー 位相加算 位相结合 コヒーレント加算 コヒーレント共振器結合 光ファイバ
ファイバ中の位相制御 全単一モードファイバ構成ファイバレーザー

1. 研究開始当初の背景

加工分野における要求は、加工速度、加工精度、加工対象材料の拡大などで近年高まりを見せている。これに伴い機械加工分野におけるレーザーの用途が拡大している。特に、金属材料の溶接や切断、さらには炭素繊維強化プラスチック (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) や、セラミクスとセラミクス基複合材料 (CMC: Ceramic Matrix Composites) などの難加工材料の切断なども、従来の刃物を利用した切削加工では困難であることが知られており、レーザーの適用が期待されている。また、三次元造形 (Additive Manufacturing) 等においても熱源としてレーザーの利用が検討されている。

大型の材料や構造物の切断ならびに溶接においては、大きな熱量を供給できるレーザーが求められ、ビーム品質よりも大出力であることが優先される。一方、レーザーの応用範囲は広がりを見せており、マーキングや微細加工などにおいて、高ビーム品質でありながら、出力の高いレーザーに対する要求が高まっている。

従来の空間光を用いたレーザーでは、高いビーム品質を維持し続けるために光学系の調整などが不可欠であった。一方、光ファイバを利用した光学系でレーザーを構築すると、次の様なメリットがある。まず、光学系が全てファイバならびにファイバ型光学系となっているため、光軸のずれなどが生じない。さらに塵埃などの影響を受けないため、運用途中のメンテナンス頻度が低くなる。

また、ファイバ型光学系の特徴として、光をコア内部に閉じ込めているため、光の品質を表す指標の一つである横モードが、コアの構造 (コア径およびコアとその周囲のクラッドとの屈折率差など) で決定できるため、横モードを制御するための光学系とそれを駆動するための微動装置などが不要になると共に、エネルギー効率が高くなる。また、レーザーを発生させるために不可欠な光を増幅する媒質 (ガラスや結晶) の体積あたりの表面積が極めて大きくなるため、放熱のための冷却水が不要になるなどの副次的ではあるが、実用上重要なメリットがある。

これらの特徴を持つファイバレーザーであるが、ファイバレーザーは断面積が狭いために、光増幅に必要な入力エネルギー (励起エネルギー) を入射するための面積も狭く、大きな励起エネルギーを投入できないため大出力化が困難であった。

この問題を解決するために、ダブルクラッド型のファイバレーザーが開発された。ダブルクラッド型ファイバレーザーは、ファイバ断面中で広い断面積を持つクラッドに励起光を入射し、コアを励起することによって大出力のレーザー発振を得ようとするものである。しかしながら、ダブルクラッド構造は米国で発案された物であり、また、コアの励起光吸収を高め、高出力化するために多くの

横モードが伝播するマルチモードコア構造を用いている。ダブルクラッドファイバを励起する手法とファイバレーザー製品に関してはロシアならびに欧州の企業が力を発揮している。さらに、励起に用いられる出力エリアの広い半導体レーザー (LD: Laser Diode) 技術も海外において開発が先行している。これらにより、高出力ファイバレーザー分野において日本は後塵を拝しているのが現状である。

2. 研究の目的

前記の技術的、あるいは産業面で既に進みつつある現状を踏まえて本研究を進めた。具体的には、小型の加工機やマーカールならびに微細加工用途でポリウムゾーンとなり得る、連続波出力が5Wのファイバレーザーを、ダブルクラッドファイバを用いずにシングルモードファイバのみで構成することを目的とする。

シングルモードファイバを用いて光学系を構成すれば、コア内には単一の横モード (基本モード) しか伝搬できず、最も高いビーム品質を安定に得ることが可能となる。そのため、加工対象物表面において単位面積あたりのパワーが最大となる輝度分布を得ることができ、加工能率の向上も可能となる。

さらに、通信分野に強みを持つ日本が得意とする通信用シングルモードファイバならびにその部品を利用することで、完成したファイバレーザーを商用化する際に、国内の光産業の活性化につながることも期待できる。

3. 研究の方法

単一モードファイバは、前述の様にコア径が小さく、その直径は9 μm 程度である。これにより、大きな励起光パワーを導入することができず、ファイバレーザー単体の出力が高められない。これを解決するために、複数のファイバレーザー共振器を単一の共振器として動作させ、単一ファイバから得られる出力を高められる技術を開発する。この技術を、位相結合、あるいはコヒーレント共振器結合と呼ぶ。

本研究で実施した、主な解決すべき課題と解決のための方法を下に記す。

- (1) 共振器の長さ制御の高精度化と高安定化
結合するファイバレーザーの数を増やす場合、少なくとも波長の10分の1程度の高分解能で光ファイバ長を制御する必要がある。従来、ファイバ型の干渉計を組むなど類似した目的のために、ピエゾ素子にファイバを巻き付けて伸縮させる技術が用いられていたが、しかしながら、ピエゾ素子は高い電圧を必要としかつ高価であること、また、本課題の研究代表者によるこれまでの研究成果から、光ファイバは細い媒質であるが固体であるため、ファイバ内は音響的にも静かであり、高速制御が不要であることなどを明ら

かにしており、これら前提に新しいファイバ長の制御方式を開発する。

また、光ファイバは高い可撓性が特徴である、そのため、変形並びに温度変化などの影響によりファイバに複屈折が発生し、光の電界の振動方向である偏波面の変動が生じる。偏波変動の抑制も実用的な位相結合には不可欠である。

(2)共振器結合数の自由度拡大

従来の類似した研究では、ファイバ型共振器の共振器結合に用いるファイバカブラの入力と出力のポート数が 2×2 であることが前提となっている。これを多段接続する構成では、結合させる増幅媒質の数が 2^n 倍となってしまう。

必要とするファイバレーザー出力を得るために用いる最適な増幅媒質の数を、増幅媒質の出力に適した任意の数に設定できるようにするための技術を開発する。

(3)高出力化の検討

本研究課題の最大の目的である、全単一モードファイバ構成による高出力化の実証を行う。予算の減額の影響があったため、予定していた単一モジュールの出力である 5 W を目標とすることとした。将来的には、 5 W のモジュールを組み合わせることで、 10 、 15 W 等の出力を得られる。また、前記(2)との組み合わせにより、任意の出力を得ることが可能となる。

高出力化のために、非線形性の影響を受けて制御不能な位相の変化などが生じないことを確認しつつ、コヒーレント共振器結合を実施する。同時に、励起光源の損傷防止などの対策も取る必要がある。

4. 研究成果

(1)共振器の長さ制御の高精度化と高安定化

位相結合(コヒーレント共振器結合)の基本構成を図1および図2に示す。

図1が位相結合ファイバレーザーの最小単位である。3dBカブラは、左あるいは右のポートから入射される伝搬光を、対向する二つのポートに均等に分岐し、出力する。ファイバレーザーモジュール(FLM)は、図2に示す構造になっており、光を増幅するErドープファイバ(EDF)と励起源となる波長 1480 nm の半導体レーザー(LD)、励起光と発振光を合分波するWDMカブラ、ならびにレーザー発振光を反射する高反射(HR)鏡を備えている。

レーザー光は、HRと図1の出力結合鏡(OC: 反射率はフレネル反射による約 4%)の間で反射を繰り返して、増幅され、定在波を作ることによりレーザーとなる。なお、ARは斜め研磨(APC)研磨された無反射終端となっている。

このとき、FLM1およびFLM2各々で構成される枝部分の長さが等しく、3dBカブラにおける偏波面が一致していれば、レーザー光は

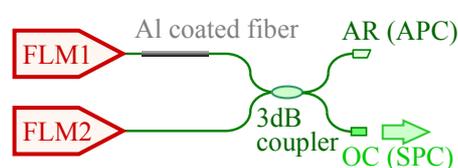


図1 位相結合光学系の基本構成
OC: 出力結合鏡、AR: 無反射終端

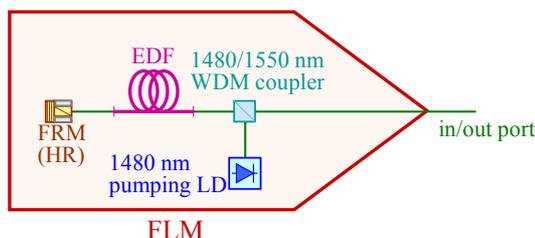


図2 ファイバレーザーモジュール構成
EDF: Erドープファイバ
FRM: ファラデー回転鏡(高反射)
WDM: 波長合分波カブラ

AR側に出力されることなく、全てOC側に集中する。この作用によってOCには二台のFLM出力が合波され、単一FLMによる出力の2倍の出力を得られ、これを多段化することで高出力化が可能となる。

前述のファイバ長ならびに偏波面変動を抑制するため、HRに偏波面を 90 度回転させて反射させるファラデー回転鏡を用いた。これにより直交する二つの偏波は偏波変動の影響を均等に受け、3dBカブラにおいて安定な偏波状態を維持し、結合効率は安定化する。

ファイバ長の変化は、ファイバの石英倉都度上に直接アルミニウムを被覆したAlコートファイバに電力を印加することで 20 nm 程度の高精度なファイバ長制御が可能となった。

3図に二台のFLMの共振器を結合した際の、

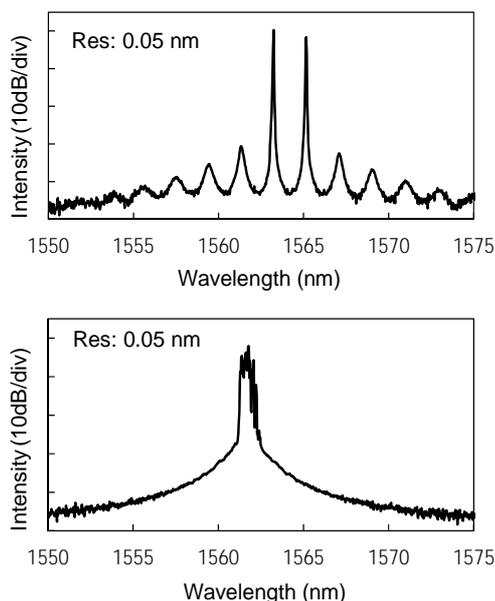


図3 共振器長さによるスペクトルの相違
共振器長さ 上: $440 \mu\text{m}$ 、下: $0 \mu\text{m}$

共振器長差に対する出力スペクトルの変化を示す。共振器長差が 440 μm の場合、各 FLM が作り出す異なる縦モード間隔を持つ縦モードがビートを形成しているが、共振器長差が測定限界以下(従来の研究成果から予想される値として 20 nm 未満)となると、二つの FLM が発生するレーザー光の縦モードが完全に一致し、スペクトルは単一のファイバレーザーとほぼ等しくなっている。これらの結果より、位相結合に必要な高い精度で共振器長を制御する技術が確立できたことがわかる。

(2) 共振器台数の自由度拡大

レーザーの出力を任意に設定するために、FLM の数を自由に設定できることは重要である。これまでの手法は 2x2 カプラの分岐比が 50:50 となる物を用いて同一出力の FLM を結合する構成であった。そこで、分岐比が不均一な 2x2 カプラ素子を用いて、出力の異なる FLM ユニットの出力を単一ポートに合波する検討を行った。

実験構成を図 4 に示す。FLM1~4 を位相結合し、4 台分の出力を合波した後に更に単体の FLM5 を合波する構成となっている。ここで、FLM1~4 の合波と、FLM5 の合波には、分岐比が 80:20 の不均等なカプラを用いた。(図 4 ではカプラの不要なポートは省略している) 使用した FLM 単体の出力は 505 mW である。

評価の結果、合波出力として 2200 mW を得ることができた、結合効率率は 90.2% を得ており、全ての合波が効率よく実施できていることがわかる。また、使用したカプラの過剰損失は 0.286dB であり、これを補償した結合効率率は 96.3% となり、極めて高い効率となる。また、このときの発振出力の最大変動幅は 0.04dB と安定であることから、共振器として安定に動作していることがわかる。

これらの結果より、FLM の出力比あるいは、FLM を組み合わせたユニットの出力比とカプラ素子の分岐比を一致させることにより、任意の出力を持つ位相結合ファイバレーザーを構築可能であることを明らかにした。

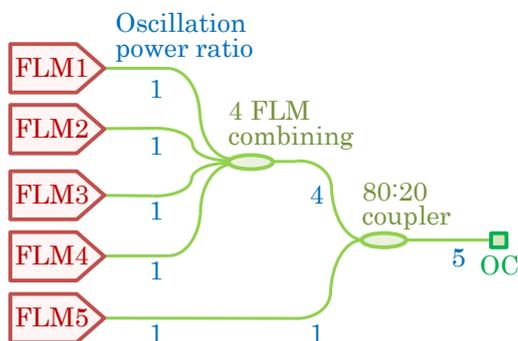


図 4 出力の異なる FLM の位相結合系

(3) 高出力化の検討

本研究の最も重要な課題は、全単一モードファイバ構成で 5 W の出力を得ることである。これが可能となれば、5 W のユニットの組み合わせにより、必要とする適切な出力を得ることが可能となる。

位相結合ファイバレーザーの高出力化のために、励起源に 800 mW の高出力な励起用 LD を 2 台用いた高励起な FLM の構成を図 5 に示す。偏波合波器(PBC)を用いて 2 台の励起 LD の出力を合成した励起光を、WDM カプラを介して EDF に入力し励起している。

FLM の励起構成として、励起 LD を 4 台として EDF を両端から各 2 台の LD を用いて励起する双方向励起とする構成も考えられる。しかしながら対向する励起源が発する励起光が EDF に吸収されずに残存する成分が 100mW を越えるため、逆方向から励起 LD モジュールに入射する光がモジュール内のアイソレータを加熱し、光軸ずれを生じることが明らかとなった。その対策として、新たなアイソレータを LD モジュールの外部に取り付ける必要が生じた。そのため、追加するアイソレータの挿入損失による励起入力低下などを考慮し、出力側のみの片方向励起とした。

前記の偏波合成による励起により、WDM カプラへの励起入力は 1494~1731 mW の高出力を得た。また、FLM の出力は、FLM1~4 が各々 1050、1032、1142、1135 mW、FLM5 が 1186 mW を得ている。4 台の FLM を結合するカプラの損失を考慮すると、FLM1~4 の位相結合された出力は 4300 mW 程度となる。

レーザー光学系の安全を確保するため、徐々に出力を上昇させ、最終的に最大励起入力において 5.09 W を得ることができ、目標の 5 W を達成できた。

このときの FLM 出力の総和から位相結合されて単一ファイバから得られた出力は 91.8% となっており、高い合波効率を得られた。また、分岐は 80:20 のカプラが持つ過剰損失を補償した計算上の効率率は 96.1% となる。カプラの損失を低減させることにより、さらに高出力化が可能となることがわかる。

最大出力時の出力変動は最大で $\pm 0.01\text{dB}$ (パーセント表示に換算すると $\pm 0.3\%$ 程度) を得ており、極めて安定な発振出力が得られていることがわかり、ファイバに光が閉じ込められているファイバレーザーの特徴が現れている。

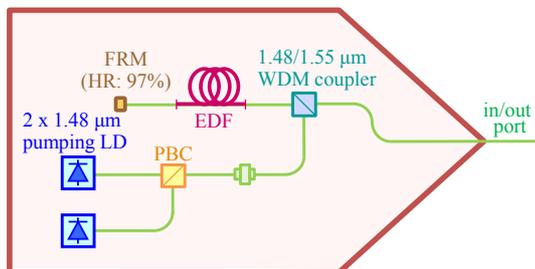


図 5 高出力ファイバレーザーモジュール

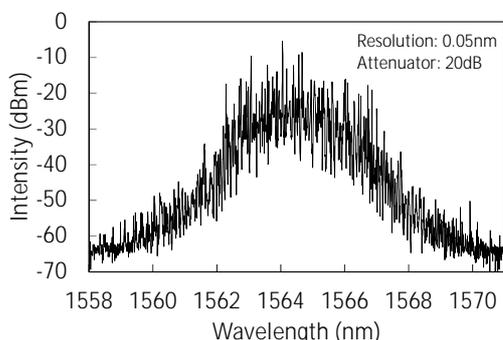


図 6 出力 5.09 W 時のスペクトル

最大出力時のスペクトルを図 6 に示す。光スペクトラムアナライザ (OSA) の分解能は 0.05 nm。レーザー出力と OSA の間に 20 dB の光減衰器を挿入し (出力を 100 分の 1 に減衰させ) OSA を保護している。

大信号入力における通信用 EDFA で利用されている EDF の利得ピークに近い波長周辺で発振しており、増幅に寄与する Er^{3+} イオンが十分に励起され、高効率動作していることがわかる。また、スペクトルの 10 dB 幅が 4 nm 未満の単一の群を作っており、スペクトルの大きなホッピングは生じておらず、安定なスペクトルを有する発振であることもわかる。

偏波状態に関する評価結果の中から、ポアンカレ球を用いた結果を図 7 に示す。偏波状態は 2 箇所集中している。この 2 箇所はポアンカレ球上の角度が 176 度離れており、ほぼ直交した二つの偏波状態を発生していることがわかる。

これまでの研究代表者の研究から、位相結合時に直交する二つの偏波が発生する場合には、両者が交互に発生してフリップしていることがわかっており、本研究成果 (1) で示した共振器長の精密制御により解決できる。

このことから、通常ファイバレーザーの様に、単一の偏波状態のみならず、偏波状態が定まらない状態も作り出すことが可能であり、ファイバレーザーを加工に応用する場合に、要求される加工条件に合わせて偏波の状態を選択できることがわかった。

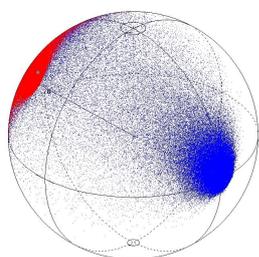


図 7 出力 5.09 W 時の偏波状態

<参考文献>

吉田実、山本優生、河南慎哉、山本純平、位相結合ファイバレーザーの波長ならびに偏波不安定性、レーザー研究、第 38 巻、第 11 号、2010、pp. 895-902

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 4 件)

Yuta Kambayashi, Minoru Yoshida, Toshiki Sasaki, Masashi Yoshikawa, All-fiber phase-control-free coherent-beamcombining toward femtosecond-pulse amplification, Optics Communications, Vol. 382, 2017, pp. 556-558
DOI: 10.1016/j.optcom.2016.08.029

閑林 優太、佐々木 俊貴、吉田 実、共振器長制御によるコヒーレント共振器結合ファイバレーザーの高多重化、レーザー研究、第 44 巻、第 6 号、2016、pp. 385-389
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020886274>

閑林 優太、吉田 実、井上 大樹、パルスファイバレーザーの高出力化を目的とした全ファイバ型位相加算レーザーシステムの開発、電気学会論文誌 C、Vol. 136、No. 1、2016、pp. 70-75
DOI: 10.1541/ieejieiss.136.70

Yasuhiro Nishiyama, Minoru Yoshida, and Hiraku Yabuno, Development of variable pulse width mode-locked femtosecond laser by applying coherent coupling technology, Optics Letters, Vol. 39, No. 24, 2014, pp. 6851-6854
DOI: 10.1364/OL.39.006851

[学会発表](計 21 件)

中村辰巳、吉川昌志、佐々木俊貴、吉田実、位相受動整合コヒーレント加算光学系を用いたパルス増幅システムの開発、レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会、2017 年 1 月 9 日、徳島大学常三島キャンパス、徳島市

佐々木俊貴、中村辰巳、吉田実、シングルモードファイバを用いた高出力コヒーレント共振器結合レーザーの開発、レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会、2017 年 1 月 9 日、徳島大学常三島キャンパス、徳島市

中村辰巳、佐々木俊貴、吉川昌志、森下数馬、吉田実、全ファイバ型コヒーレント加算光学系を用いた高出力パルスファイバレーザーの開発、レーザー学会中国・四国支部、関西支部連合若手学術交流研究会、2016 年 12 月 15 日、六甲保養荘、西宮市
佐々木俊貴、中村辰巳、森下数馬、吉田実、結合効率改善に向けた高多重コヒーレント共振器結合ファイバレーザーの開発、レーザー学会中国・四国支部、関西支部連合若手学術交流研究会、2016 年 12 月 15 日、六甲保養荘、西宮市
佐々木俊貴、高田一輝、森下数馬、家倉大

空, 吉田実, ファイバレーザ-の高多重化に向けた共振器長制御によるコヒーレント共振器結合、平成 28 年電気関係学会関西連合大会、2016 年 11 月 22 日、大阪府立大学、堺市

中村辰巳, 佐々木俊貴, 吉川昌志, 森下数麻, 吉田実, 全ファイバ型位相受動整合コヒーレント加算光学系を用いた高出力パルスレーザ-の開発、平成 28 年電気関係学会関西連合大会、2016 年 11 月 22 日、大阪府立大学、堺市

Toshiki Sasaki, Minoru Yoshida, High Multiplexing of All-Single-Mode-Fiber-Laser using Coherent-Cavity Combining System, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2016 年 10 月 19 日, San Diego, CA, USA

佐々木俊貴, 閑林優太, 吉田実, コヒーレント共振器結合方式を用いた全単一モードファイバレーザ-の高出力発振、レ-ザ-学会学術講演会第 36 回年次大会、2015 年 1 月 9 日、名城大学、名古屋市

閑林優太, 吉川昌志, 佐々木俊貴, 吉田実, 全ファイバ型位相受動整合コヒーレント加算光学系の開発、レ-ザ-学会学術講演会第 36 回年次大会、2015 年 1 月 9 日、名城大学、名古屋市

閑林優太, 吉川昌志, 佐々木俊貴, 吉田実, 全ファイバ型コヒーレント加算を用いた超短パルス増幅システムの開発、平成 27 年電気関係学会関西連合大会、2015 年 11 月 14 日、摂南大学、寝屋川市

中村辰巳, 閑林優太, 吉川昌志, 吉田実, 全ファイバ型コヒーレント加算を用いた高出力単一モードパルスレーザ-の開発、平成 27 年電気関係学会関西連合大会、2015 年 11 月 14 日、摂南大学、寝屋川市

閑林優太, 吉川昌志, 佐々木俊貴, 吉田実, 全ファイバ型位相自動安定化コヒーレント加算光学系の開発、平成 27 年電気関係学会関西連合大会、2015 年 11 月 14 日、摂南大学、寝屋川市

佐々木俊貴, 閑林優太, 吉田実, コヒーレント共振器結合方式を用いた単一モードファイバによるワット級高出力レーザ-の発振、平成 27 年電気関係学会関西連合大会、2015 年 11 月 14 日、摂南大学、寝屋川市

Yuta Kambayashi, Minoru Yoshida, Tatsuki Inoue, Masashi Yoshikawa, Development of high energy femtosecond fiber laser by all fiber coherent beam combining technology, The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference, 2015 年 6 月 24 日, Munich, Munich Germany

閑林優太, 井上大樹, 吉田実, ファイバ型位相加算光学系を用いたパルス増幅システムの開発、レ-ザ-学会学術講演会第 35

回年次大会、2015 年 1 月 12 日、東海大学高輪校舎、東京都港区

井上大樹, 閑林優太, 佐々木俊貴, 吉田実, 共振器長制御による高多重化位相結合ファイバレーザ-の結合効率改善、レ-ザ-学会学術講演会第 35 回年次大会、2015 年 1 月 12 日、東海大学高輪校舎、東京都港区

吉川昌志, 井上大樹, 閑林優太, 吉田実, 全ファイバ型位相加算光学系を用いたフェムト秒ファイバレーザ-の高出力化、平成 26 年電気関係学会関西連合大会、2014 年 11 月 24 日、奈良先端科学技術大学院大学、生駒市

佐々木俊貴, 井上大樹, 閑林優太, 吉田実, 高励起入力による位相結合ファイバレーザ-の高出力化、平成 26 年電気関係学会関西連合大会、2014 年 11 月 24 日、奈良先端科学技術大学院大学、生駒市

井上大樹, 閑林優太, 佐々木俊貴, 吉田実, 共振器長制御による位相結合ファイバレーザ-の多重化数増加に伴う結合効率の改善、平成 26 年電気関係学会関西連合大会、2014 年 11 月 23 日、奈良先端科学技術大学院大学、生駒市

閑林優太, 井上大樹, 吉川昌志, 吉田実, 高出力ファイバレーザ-実現に向けた全ファイバ型位相加算光学系の開発、平成 26 年電気関係学会関西連合大会、2014 年 11 月 24 日、奈良先端科学技術大学院大学、生駒市

21 Yuta Kambayashi, Minoru Yoshida, All fiber coherent addition technology toward development of high-power fiber laser, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2014 年 10 月 22 日, San Diego, CA, USA

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ele.kindai.ac.jp/yoshida/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 実 (YOSHIDA, Minoru)

近畿大学・大学院総合理工学研究科・教授
研究者番号：50388493

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

藤本 靖 (FUJIMOTO, Yasushi)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師

研究者番号：70343241

中野 人志 (MAKANO, Hitoshi)

近畿大学・大学院総合理工学研究科(兼任)・教授

研究者番号：20257968