

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05085

研究課題名（和文）全ファイバ型フェムト秒パルスレーザーの産業応用に資する高エネルギー化と高安定化

研究課題名（英文）Research on high energy and high stabilization for all-fiber femtosecond pulsed lasers for industrial applications

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） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：ファイバレーザーから得られる短パルスレーザーの高出力化ならびに高エネルギー化を目指した。ファイバを用いたレーザー共振器は、高安定かつ高効率である。また、長いファイバ導波路を用いているので、非線形性が生じやすい。それらを利用して、フェムト秒領域の短パルスを発生できる。しかしながら、非線形性が高いため、高い出力を得られない。そのため、応用範囲が限定されていた。

この問題を解決するため、複数の増幅用ファイバに分岐したパルスを個別に増幅し、光波の位相をそろえて合波する技術を開発した。数十メートルの長さを持つ光ファイバ長を、数十ナノメートルの精度で制御可能となった。そして、パルスの加算に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーは、機械加工では困難な、高硬度の材料の自由な加工が可能である。しかしながら従来技術では、光の熱的な作用を用いているため、熱伝導により加工範囲が拡大し、切りしろが広く、さらには溶融による断面の荒れなどが生じていた。

一方、10兆分の1秒程度の時間幅しか持たない短パルスレーザーを用いると、熱が拡散する前に加工が終了するので、高精度の加工が可能である。しかしながら、短パルスはエネルギーが低いために加工速度が遅かった。それを解決するために、単一の短パルスを複数のファイバに分割して増幅し、光波の干渉を避けるために1億分の1メートルの精度で位相を揃えて加算し、高エネルギー化する技術を開発した。

研究成果の概要（英文）：We aimed to increase the output and energy of the short pulse laser obtained from the fiber laser. A laser resonator using a fiber has high stability and high efficiency. In addition, since a long fiber waveguide is used, nonlinearity is likely to occur. They can be used to generate short pulses in the femtosecond region. However, since the nonlinearity is high, a high output cannot be obtained. Therefore, the range of the application has been limited. To solve this problem, we have developed a technology that individually amplifies the pulses branched to multiple amplification fibers, aligns the phases of the light waves, and combines them. It has become possible to control the length of an optical fiber with a length of several tens of meters with an accuracy of several tens of nanometers. And the pulse addition was successful.

研究分野：ファイバ光学

キーワード：ファイバレーザー フェムト秒パルス ファイバ中の位相制御 コヒーレント加算 コヒーレント共振器結合 光ファイバ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光ファイバを用いて共振器を構成したレーザーは、従来の、鏡やガラスあるいは結晶で構成された空間光学系を利用したレーザー共振器と比較して、光学系が導波路内に収まっているため、振動や温度変化などに対して光軸のずれなどが発生することがなく安定であり、励起光と発振光が(ダブルクラッド構造のファイバレーザーを除くと)全てコア内に閉じ込められており、増幅媒質を構成するコア内における両者の重なりが良好であるため高効率である。また、近年は励起源の高性能化も相まって、従来のガスレーザーや固体レーザーを超える出力も得られている。しかも、前記のように共振器とレーザーを導く光学系にファイバを用いているため、横モード(加工対象物に照射される領域の輝度分布と捉えて頂いて良い)も良好であり、輝度(単位面積あたりのパワー)も高めることができる。これらの特徴を利用し、熱加工用のレーザー光源として、溶接切断あるいは三次元造形分野、あるいは液晶パネル製造プロセスのアニーリング、マーキングなど幅広い分野で応用が進められてきた。

一方で、光ファイバは長尺の導波路であるため、伝搬する光の電界に起因する非線形性が大きく生じる。非線形性の代表例として、ラマン散乱やブリルアン散乱、あるいは非線形屈折率があげられる。非線形屈折率は、媒質中を伝搬する光の電界によって屈折率が変化する現象であるが、光のパワー、すなわち電界が強くなると屈折率が高くなる現象である。この非線形屈折率は、従来のレーザー装置では、発生はしていても光学媒質長が短いため、無視しうる程度の大きさしか発生していなかった。

光ファイバを用いた光学系では、導波路長に比例した非線形屈折率が発生する。これを利用することによってファイバ特有のレーザーを開発することが可能となる。一例として、本研究でも使用しているフェムト秒領域の短パルスの発生がある。ファイバ中を伝搬する光のパワー揺らぎを、非線形屈折率を利用して強調することにより短時間化し、ピークパワーを増加させ、フェムト秒領域の短パルスを簡便な構成で発生させることが可能となる。

フェムト秒領域のレーザーパルスは、加工対象物に対して短時間でエネルギーを投入するため、熱が横方向に伝搬する前にエネルギーの投入と加工が終了する。これにより、レーザー照射部分のみの加工を可能とし、高い分解能をもつ、切れの良い加工を達成できる。さらに、高い電界を有するため、電界を利用した光プロセスや、短時間で多くの光子を投入できるため、多光子過程を利用した擬似的な高エネルギー光子の発生による、光軸方向の空間分解能を有するプロセスも可能となる。

しかしながら、ファイバ光学系はその非線形性の高さから、パルスの高出力化を進めようとすると、自己の電界の高まりによってパルス波形が崩れてしまい、短パルスを維持して高出力化することが困難であった。そのため、ファイバ型のパルスレーザーはいくつかの長所を持つことがわかっていても、加工用の短パルスレーザーとして利用することが困難であった。

2. 研究の目的

研究の背景で述べたように、ファイバレーザーは安定かつ簡便でありながら調整の容易なフェムト秒領域の短パルス発生に適しているものの、ファイバ光学系でエネルギーを高めようとするとファイバ内で発生する非線形性によって、パルス波形の変化や誘導ラマン散乱による波長変換などが生じてしまい、高エネルギー化ならびに高パワー化が困難であった。

本研究では、これらの課題を解決し、ファイバ型光学系を用いた高エネルギー化に利用可能な技術の開発を目的とした。具体的には、単一のファイバで光増幅を行わず、増幅対象となる光を複数のファイバ(即ち複数のコア)に分割し、それらを個別に増幅して合波する技術の開発を進めた。これらを進めるため、主に次の3つの項目を開発の柱として研究を進めた。

- (1) 短パルスの加算(合波)が可能であることの原理的な検証
- (2) 短パルスを複数の光波に分けて合波して出力増強が可能であることの検証
- (3) 合波した出力を単一のコアに伝送することにより生じる障害を避けるための、空間における合波技術の検討

3. 研究の方法

光は波であるため、レーザーなどの可干渉性の高い光を配慮無く重ねても、干渉により強め合う部分と弱め合う部分が生じるため、出力や輝度の向上には繋がらない。さらに、偏波、すなわち電界の振動方向も一致させなければ加算の効果は得られない。これらのことから、位相を波長の50分の1程度の高い分解能、かつ偏波の双方を同時に一致させる必要がある。

光ファイバを用いた光波の合波は、ファイバのコアに光が閉じ込められているため、空間モード(横モード)の重なりを気にかける必要がなく、位相と偏波のみに着目して加算を行えば良い。この点は空間光を用いたビームの加算と比較して有利な点である。しかしながら、ファイバレーザー等の増幅媒質に用いるファイバは、前後の光学系を含めると条長が20~40 m程度に至る長尺の導波路である。そのため、温度などの変化によってファイバの光路長がゆっくりとではあるが常に変化している。また、温度と振動の変化によって偏波状態も変動をする。さらに、コアの断面積が狭いため、非線形性による問題の発生が予想され、その対策も必要となる。

これらを解決するための手法を検討する必要があり、以下の手順で研究を進めた。

(1)短パルス光の合波に関する実証

パルス幅が数百 fs 程度の短パルスは、波長 1550nm 帯において、フーリエ変換で決定される 30 nm 程度の広いスペクトル幅を持つ。そのため、ファイバが持つ波長分散(光の波長による光速依存性)に起因して発生する相対群遅延によって、複数のファイバに分岐したパルス光の光波の位相を、増幅後に合波させることが困難になる可能性がある。この点は、連続波の加算や波長分散材料を除外可能な空間光の加算と異なる新たな課題である。そのため、位相ならびに偏波の調整が不要なパルス加算用ファイバ光学系を構築し、短パルスの合波が可能であることを検証する。

(2)光増幅器数の増加に必要な分岐型光増幅結合システムの開発

①分岐型光増幅結合システムによる短パルス増幅

パルス出力を高めるためには、パルスの分岐数を増やし、使用する増幅器数を多くする必要がある。例えば、マッハツェンダ干渉計は、光を二つの光路に分岐し、位相を制御することによって単一の光路に合波することが可能である。しかしながら、一般的な導波路型のマッハツェンダ干渉計は、単一の基板上に描画された平面導波路を利用しており、ファイバのような可撓性があり、しかも導波路長が 40 m に近くなるような個別のコア/クラッド構造と被覆を持つ導波路による光波の加算、しかも短パルスに関しては例を見ない。

そこで、ファイバ型の 2×2 方向性結合器を用いて単一のパルスを複数のファイバに分岐し、それらを個別に増幅した後、位相を揃えて新たな 2×2 方向性結合器に入射することにより、二つ目の方向性結合器の単一のポートから合波出力を得る検討を行う。

②増幅システムの雑音低減化

本研究で用いる光増幅システムは、コアに希土類元素であるエルビウム(Er)を用いた光増幅用ファイバ(EDF: Er doped fiber)を増幅媒質として用いる。増幅器は、光増幅器に限らず雑音を付加する。付加された雑音による SN 比の劣化度合いを雑音指数(NF: Noise Figure)により性能指数化する。

雑音指数が劣化し、光パルスの SN 比が低下すると、パルスのパワーならびにエネルギーを増幅するための多段増幅において、雑音成分がパワーアンプに用いられている増幅用 EDF の反転分布を浪費してしまい、本来増幅すべきパルスが十分に増幅できなくなる。この問題を解決するため、パルスの SN 比の劣化を軽減可能な、クリーン度の高い増幅システムの開発が必要となる。

この課題を解決するため、増幅すべきパルス光は単一の光源から出力されたものであり、上記①の結果を得て干渉可能であるのに対して、EDF で付加される雑音は個別の EDF で発生するため可干渉性を持たない(方向性結合器では合波できず、パワーとして 1+1=1 にしかならないと思われる)性質であることを利用した、低 NF 光増幅システムを開発し、雑音指数の改善が可能であることを確認する。

(3)空間光における光波の合波

上記(2)までは、ファイバとファイバ型光デバイスを利用した、ファイバコア内における合波を前提にしている。しかしながら、合波数が増加すると、ファイバの特徴である長尺な導波路内で非線形光学効果が発生するため、結果的に短尺なファイバしか伝送できなくなる。合波後の伝送距離を短くして、空間光学系を用いて集光などを行うのであればこの方式でも問題無いが、レーザー発振器から距離の離れた加工装置などにパルス光を伝送する際や、現在よりもさらに出力の高いパルスを生じさせる際には、個別のファイバあるいはコアにより増幅したパルスを、合波せずに伝送するか、伝送した後に個別の増幅器で増幅し、出射端において空間で合波して高出力化する方式も検討する必要がある。

本開発項目では、単一のファイバに複数のコアを有するマルチコアファイバ(MCF)を利用し、複数のコアの出射端面を確実に固定し、位相面ならびにコア間の位置関係が機械的な影響で変化しない状態を作りだし、空間合波の可能性について研究を行った。

4. 研究成果

(1)短パルス光の合波に関する実証

①受動位相整合光学系による増幅

図 1 に開発した新しい光路切り替え型光増幅器(PS-EDFA)の構成を示す。この増幅期は、二つの接栓(In/Out)を持ち、FRM と PBS を利用した光学系を組むことにより、一つの接栓からの入力異なる接栓に出力されると共に、偏波変動の生じない構成となる様に構成されている¹⁾。この入出力特性により、リング状の共振器を構成することが可能となり、ファイバループミラーを利用した増幅と加算が可能となる。

開発した 6 段の増幅器を利用したシステムを図に示す。6 台の EDFA により 12 回の増幅を行っている。PS-EDFA の特性により、偏波ならびに位相の制御を必要としないループミラーを構成でき

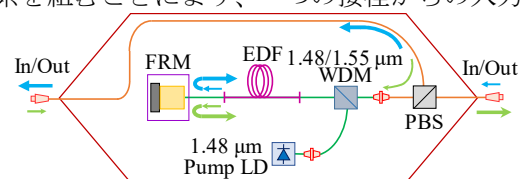


図 1 光路切り替え型光増幅器(PS-EDFA)
FRM: ファラデー回転鏡 PBS: 偏波ビームスプリッタ

ている。また、増幅段数に対するパルス出力の平均値の変化を図3に示す。増幅器段数の増加により出力は増加しているが、段数の増加と共に飽和傾向が見られている。この原因は、オートコリレータによる時間波形から、増幅システムのファイバが長尺化するため、非線形ならびに波長分散によるパルス劣化が生じていると考えている。

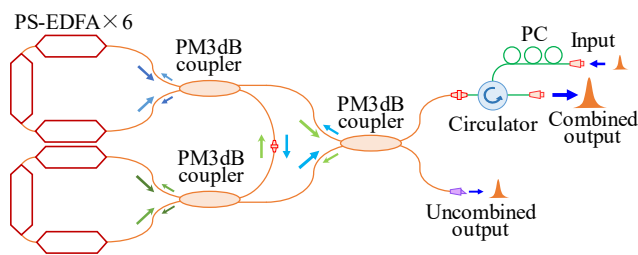


図2 PS-EDFAによる多段ループミラー増幅系

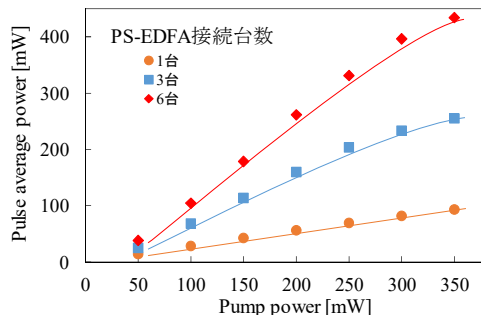


図3 PS-EDFA 多段増幅の効果

(2) 光増幅器数の増加に必要な分岐型光増幅結合システムの開発

①分岐型光増幅結合システムによる短パルス増幅

上記(1)の検討により、フェムト秒パルスも増幅後の加算が可能であることが明らかとなった。次に、非線形対策として光路長を短くする検討を行った。

図4は反射型のEDFA(AMP1-2)を利用した加算光学系である。短パルス光を3dB coupler(2×2 方向性結合器)を用いて2分岐し、二台のEDFAで増幅して合波する。EDFA内の反射鏡にはFRMを利用し、ファイバ内で生じる偏波変動を自動的に補償できる偏波安定型のEDFAを開発した。

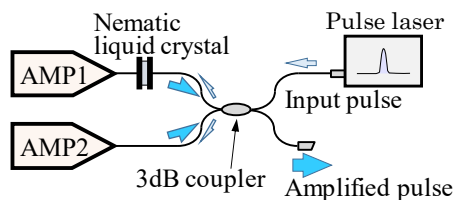


図4 位相制御にネマチック液晶を用いたパルス増幅ならびに加算系

位相の制御には、従来用いていたアルミニウムコートファイバの時定数の長さを避けるため、新たにNematic液晶を利用した。Nematic液晶に交流電圧を印加すると透過光に位相の変化が生じるが、同時に偏波の回転も生じてしまう。偏波を自動補償できるEDFAは、この偏波回転も自動的に補償する機能を生じる。

図3に入力時間波形(a)ならびに増幅結果を示す。増幅出力パルス幅(b)は、ほぼ入力を維持している。また、この状態におけるスペクトル(d)はパルス幅に応じた広がりを持つが、光路長がずれた状態では、波長の変化によって位相の変化量が変化するので、(c)に示す様なビートのスペクトルが生じる。これらの結果より、Nematic液晶を用いた位相制御システムによって、液晶による偏波変動を補償しつつ短パルスの増幅に必要な位相制御を可能とした。

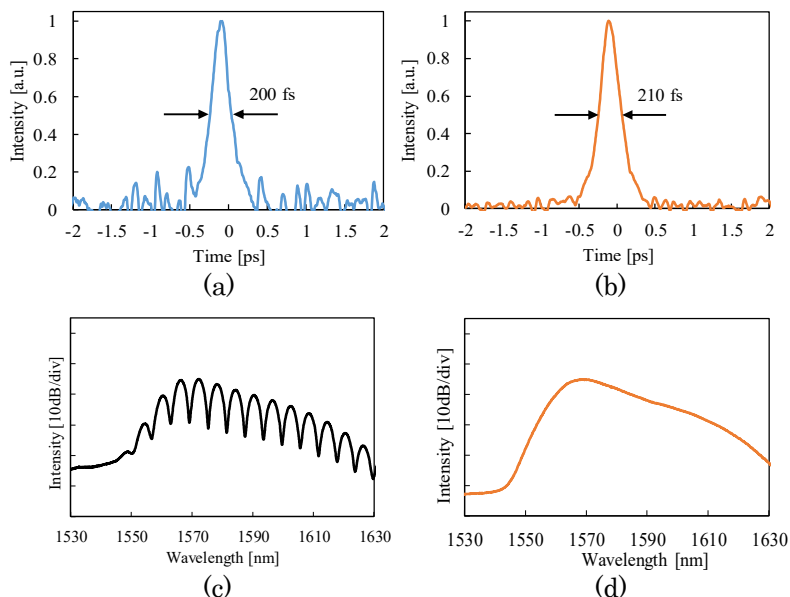


図3 加算結果。(a)入力パルス波形 (b)出力パルス波形 (c)位相のずれた加算スペクトル (d)位相の一致した加算スペクトル

②増幅システムの雑音低減化

増幅器のNF劣化の主な要因は、信号光(単一のパルス光が分岐されて各個増幅される)に増幅器が付加する主たる雑音要因となる、増幅された自然放出光(ASE: Amplified spontaneous emission)が重畳することにより発生する。雑音には、信号光とASE間のビート雑音、ASE間のビート雑音などが存在する。何れの雑音も、ASEを少なくすることができれば改善可能である。ここでは、3dBカプラを用いて光ファイバを分岐し、その後再び3dBカプラを用いて干渉させ合波させるマッハツェンダ型の干渉計を構成し、分岐された腕に相当する光路部分に光増幅器を挿入する。干渉可能な信号光のみが合波されるのでSN比が改善し、NFも改善することを予想し、検証を行った。また、マッハツェンダ干渉計では偏波と位相の制御が必要となるため、図2に示した受動位相整合型光学系で同様の効果が得られるかについても評価した。

図4に、複数の光学系で実施した増幅出力のスペクトルを示す。従来のEDFAに比較して、マ

マツハツェンダ干渉計を利用した系ならびに受動位相光学系では、信号光に対する背景雑音光のパワーが相対的に低減されていることがわかる。

これらの結果を雑音指数として表したものが図5である。NFは、信号入力など、増幅器が持つ各種の条件に対して変化する。ここでは、増幅器をパワーアンプとして使用した場合に支配的となる、信号光とASEのビート雑音について、信号入力依存性を評価結果している。NFは、信号入力が-25dBm付近で最小値を示し、信号入力が高くなると単調に増加する。信号入力-35dBm未満の小信号領域では、ASEとASEのビート雑音が支配的となるので、雑音指数はほぼ一定となっている。また、マツハツェンダ干渉計では、最小NFが5.6dBを得ている。この結果より、従来のEDFAと比較して、マツハツェンダ干渉計ならびに受動位相光学系を用いたEDFAでは、大信号入力時のNFが各々2.8dBならびに2.3dB改善できていることがわかる。受動位相光学系は、改善効果が低くなっているが、この要因は増幅部に用いるカプラなどのデバイスの多さに起因する、増幅器入力部(EDFよりも上流部)の損失の増加にあると考えられている。

これまでの通信分野で考えられていた光増幅器の雑音特性の限界を改善することが可能となり、加工用パルス増幅システムの高出力化、高効率化、省電力化が可能となった。

(3) 空間光における光波の合波

ファイバが生じる不要な非線形性を回避して高出力化を進めるために、空間における合波を試みた。空間出力の位相と偏波が高精度に一致しなければならないため、コアの配列およびコアから空間への境界面が揺らがない様に、マルチコアファイバ(MCF)を利用した。使用した7コアMCFの構造を図1に示す。コア間の光結合を防ぐためにコア周辺に屈折率の低いサイドトレレンチを有している。

光波の位相は、コヒーレント共振器結合により全てのコアを伝搬する光波がファイバ端面を終端とする定在波となる様に共振器を構成し、偏波面はファイバ型波長板を用いて制御した。

図7に出力光の空間強度分布を示す。(a)はマルチコアファイバ端面を正面から観察した近視野像(NFP: Near Field Pattern)であり、7つのコアからの出力であることがわかる。(b)および(c)は、端面から2mm離れた位置における空間強度分布である。(b)は位相と偏波が揃った状態で出力された結果であり、空間強度分布に周期的な強弱が存在しており、ビームの干渉を生じさせられていることがわかる。また、光軸方向に観察距離を離すことにより、タルボット距離約2.6mm毎に周期的なタルボット像も観察できており、高い干渉性を持つことがわかる。(c)は各コアからの出射光の位相と偏波の相関を無くした結果であり、なだらかな強度分布であるが、最大強度が(b)と比較するとほぼ1/2しか得られていない。

これらの結果から、各コアから発せられた光波が単一の波面を持つと見なせる距離では単一の光波として扱うことができ、干渉性を利用した空間合波が可能であることがわかる。

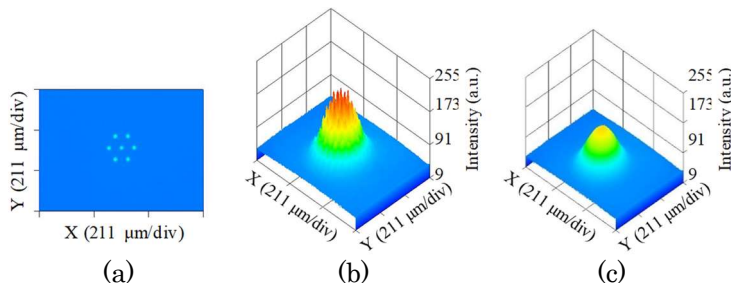


図6 マルチコアファイバ端面構造

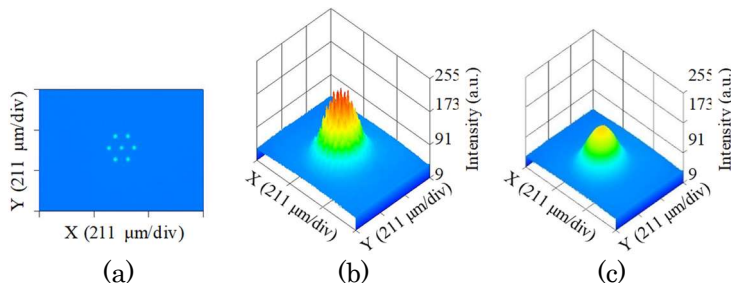


図7 空間における光波の合波強度分布 (a)近視野像(NFP) (b)干渉性の有る出力光 (c)干渉性の無い出力光

<引用文献>

- 1) Yuta Kambayashi, Minoru Yoshida, Toshiki Sasaki, Masashi Yoshikawa, Optics Communications, All-fiber phase-control-free coherent-beamcombining toward femtosecond-pulse amplification, Vol. 382, pp. 556-558

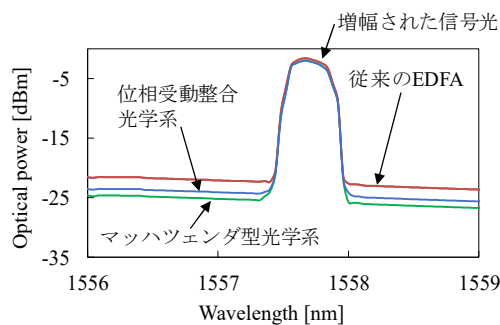


図4 増幅系による雑音の低減効果

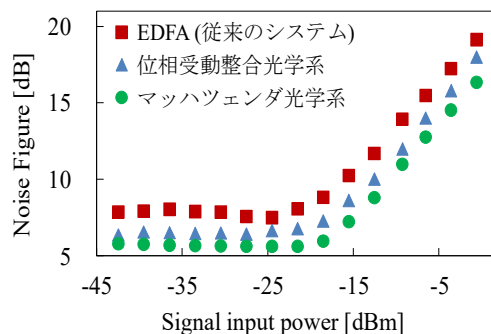


図5 各種増幅系による雑音指数(NF) 信号入力依存性

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 天野亮、吉田実	4. 巻 139
2. 論文標題 パルスファイバレーザの高出力化を目的とした光路長の自動制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 113-118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.136.70	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21件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 K. Morishita, M. Yoshida
2. 発表標題 Er-doped fiber laser architecture for robust and passive pulse generation
3. 学会等名 Laser Precision Microfabrication (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Takada, T. Nakamura, K. Nakayama, M. Yoshida
2. 発表標題 Development of coherent addition system used nematic liquid crystal toward ultrashort pulse amplification
3. 学会等名 Laser Precision Microfabrication (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shogo Fukuyama, Minoru Yoshida
2. 発表標題 Development of all-fiber Fabry-Perot pulse laser with a fiber-type saturable absorber and improvement of the oscillation characteristics
3. 学会等名 International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木俊貴、井上大樹、閑林優太、吉田実
2. 発表標題 ネマチック液晶を用いたコヒーレント加算光学系におけるフェムト秒パルス合波
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森下数麻, 吉田実
2. 発表標題 高いロバスト性を持つ受動モード同期パルスファイバレーザの開発
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福山像吾, 吉田実, 藤本靖
2. 発表標題 高濃度EDFを変調素子として利用したパルスファイバレーザの発振効率改善および出力向上
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋佑輔, 高田一輝, 吉田実
2. 発表標題 ファイバレーザ-の高出力化に向けたコヒーレント加算光学系における分波数の最適化
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎麻琴, 吉田実
2. 発表標題 透過型コヒーレント加算光学系における非線形光学効果の抑制
3. 学会等名 平成30年電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高田一輝, 宮崎麻琴, 中山敬三, 吉田実
2. 発表標題 ネマチック液晶を用いたコヒーレント共振器結合系における光波の位相制御
3. 学会等名 レ-ザ-学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澁川大朗, 吉田実
2. 発表標題 ファイバコリメータアレイを用いた空間合波システムの開発
3. 学会等名 レ-ザ-学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福山像吾, 吉田実, 藤本靖
2. 発表標題 高濃度 Er 添加光ファイバを利用したリング型パルスファイバレーザーの発振特性の向上
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎麻琴, 吉田実
2. 発表標題 パルス幅可変ファイバレーザーの開発に向けた8の字型フェムト秒レーザーの出力効率向上
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎麻琴, 吉田実
2. 発表標題 コヒーレント共振器結合技術を用いたオールファイバパルス幅可変レーザーの開発
3. 学会等名 電気学会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsumi Nakamura, Minoru Yoshida, Toshiaki Sasaki, Masashi Yoshikawa, Kazuma Morishita
2. 発表標題 Development of ultrashort pulse amplification system by all fiber passive-phase-matching coherent addition technology
3. 学会等名 The European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 澁川大朗, 吉田実
2. 発表標題 FFP法を用いたMFD測定装置の開発およびPMFのMFD評価
3. 学会等名 平成29年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 家倉大空, 吉田実
2. 発表標題 共振器長制御を利用した光波の空間ビーム結合
3. 学会等名 平成29年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 天野亮, 吉田実
2. 発表標題 パルスファイバレーザーの高出力化を目的とした光路長の自動制御
3. 学会等名 平成29年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高田一輝, 中村辰巳, 中山敬三, 吉田実
2. 発表標題 ネマチック液晶を用いたコヒーレント加算光学系における光波の位相制御
3. 学会等名 平成29年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村辰巳, 森下数麻, 高田一輝, 高橋佑輔, 吉田実
2. 発表標題 全ファイバ型位相受動整合コヒーレント加算光学系の多段接続によるフェムト秒パルスレーザーの高出力化
3. 学会等名 平成29年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋佑輔, 中村辰巳, 高田一輝, 吉田実
2. 発表標題 コヒーレント加算光学系を用いた高出力ファイバレーザー実現に向けた非線形抑制
3. 学会等名 平成29年電気関係学会関西連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 福山像吾, 吉田実, 藤本靖
2. 発表標題 高濃度Er添加光ファイバを可飽和吸収体として利用したパルスファイバレーザーの発振特性の向上
3. 学会等名 電気学会電子材料研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.ele.kindai.ac.jp/yoshida/ http://www.ele.kindai.ac.jp/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
連携研究者	天野 亮 (Amano Ryo) (20309347)	近畿大学・理工学部電気電子工学科・助教 (34419)	
連携研究者	中山 敬三 (Nskayama Keizo) (80324333)	近畿大学・理工学部電気電子工学科・講師 (34419)	