

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560044

研究課題名(和文) 省資源加工に貢献する高効率・高精細加工が可能な位相結合ファイバレーザーの高効率化

研究課題名(英文) Development of phase-coupled-fiber-laser contributing to saving resource and high-precision machining

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) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：最大16台のファイバレーザーを、一つのファイバ共振器で発振させることに成功し、ファイバレーザーの高出力化に必要な要素技術を開発できた。これは従来報告されていた台数の二倍に相当する。各ファイバレーザーの光波面を揃えるための、精密かつ実用的な位相制御が可能となった。これにより、単一のレーザー媒質から得られるレーザー出力が小さくとも大出力を得ることが原理的に可能となり、大出力の励起源を用いなくともファイバレーザーの出力を高められる。レーザー加工分野で求められている、レーザー光を小さな集光径に集光可能な高いビーム品質を維持したままファイバレーザーを高出力化することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：Basic technologies of the phase coupled laser composed by 16 fiber laser modules were developed in this research. This number is the value that corresponds to twice the number reported with past papers. Coupling efficiency reached 94% in coupled 16-fiber-laser-modules. These technologies are highly effective for high power fiber laser and precision machining. High resolution and practicable phase controlling technology was achieved by this research. As a result, high power fiber laser has been advanced by coexisting high beam quality.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理・工学基礎、応用工学・量子工学

キーワード：ファイバ レーザー ファイバレーザー 位相結合 高出力化 レーザー加工

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 1 日現在

機関番号：34419
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2011 ~ 2013
課題番号：23560044
研究課題名(和文) 省資源加工に貢献する高効率・高精細加工が可能な位相結合ファイバレーザーの高効率化
研究課題名(英文) Development of phase-coupled-fiber-laser contributing to saving resource and high-precision machining
研究代表者 吉田 実 (YOSHIDA, Minoru) 近畿大学・理工学部電気電子工学科・教授 研究者番号：50388493
交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,300,000 円、(間接経費) 1,290,000 円

研究成果の概要(和文): 最大 16 台のファイバレーザーを、一つのファイバ共振器で発振させることに成功し、ファイバレーザーの高出力化に必要な要素技術を開発できた。各ファイバレーザーの光波面を揃えるための、精密かつ実用的な位相制御が可能となった。これにより、レーザー加工分野で求められている、レーザー光を小さな集光径に集光可能な高いビーム品質を維持したままファイバレーザーを高出力化することが可能となる。

研究成果の概要(英文): Basic technologies of the phase coupled laser composed by 16 fiber laser modules were developed. These technologies are high effective for high power fiber laser and precision machining. High resolution and practicable phase controlling technology was achieved by this research. As a result, high power fiber laser has been advanced by coexisting high beam quality.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎      応用光学・量子光工学

キーワード：レーザー、ファイバレーザー、位相結合

### 1. 研究開始当初の背景

ファイバレーザーは産業界で広く活用されるに至っているが、生産現場で求められている高出力化のための技術に関しては、複数の励起光を束ねて高出力化してダブルクラッドファイバと呼ばれるファイバを励起する手法に依存している。この手法は主に米国に本社を持つ特定の企業が得意とする技術であり、世界的に該企業がファイバレーザーの市場を独占しつつある。

今日、産業用レーザー加工装置は、切断、溶接、熱源の 3 つの装置に相当する役割を有しており、その心臓部で有るファイバレーザー発振器を海外に委ねることは本邦産業の将来にも悪影響の生じることが否めず、産業安全保障上の危惧も生じつつあり、新規なレーザー高出力化手法が必要であった。

本研究では、日本に通信用光ファイバ関連の高い技術が存在することに着目し、日本独自の手法でファイバレーザーの高出力化を進められるものと考え、またその必要性から起案した。

### 2. 研究の目的

ファイバレーザーの高出力化を実現するために、励起光の大出力化を行わず、小出力の励起源を分散させて複数のファイバレーザー増幅媒質を励起し、ファイバレーザーの構成の工夫により、複数の増幅媒質を一体として作動させ、単一のファイバ出力を高めるための位相結合技術の開発を目的とする。

従来、学会などで報告されていた位相結合技術は、位相結合するレーザー媒質の数が 4 台を超えると不安定性が発生し、8 台程度になると効率の低下も著しくなり位相結合の限界とされていた。

本研究では、これまでに確認をされてきた位相結合時に生じる不安定性ならびに効率低下の原因を特定し、その結果を基に結合台数を 16 台まで増やすことを目的としている。

これによりマルチモードファイバでは無くシングルモードファイバで高出力化が可能となるため、高精細加工が可能なファイバレーザーを高効率で発振可能にするための原理的な実証を進め、技術を確立する。

### 3. 研究の方法

レーザーは光を閉じ込める共振器構造の中に光増幅媒質を置くことにより発振する。一般的なレーザー装置は単一の光増幅媒質に、多くの場合二枚の鏡を用いて光の閉じ込めを行う。光は波の性質を持つため、複数のレーザー光を束ねても、単一の光波として振る舞わないため、ファイバレーザーの特徴である高い集光性を得ることが出来ない。

本研究で行う位相結合は、ファイバレーザーの高反射側の鏡は励起光学系を含む各ファイバ型増幅媒質(ファイバレーザーモジュール: FLM)に対して個別に設定し、低反射側の鏡(出力結合鏡)を全増幅媒質に対して共通化することによって、共通の光波を各増幅媒質にフィードバックし、複数の増幅媒質から単一の光波を得ようとするものである。しばしばレーザー発振器から出射された後の複数のレーザー出力を一体化する位相加算と混同されることがあるが、原理的に異なる。

位相結合は、 $2 \times 2$  の合分波構造を持つ 3dB カプラをツリー状に接続し、多数に分岐している側に高反射鏡を含む FLM を接続し、単一化させる側に出力結合鏡を取り付けることにより、上記の共振器構造を得る。しかしながら、結合させる FLM の数が 4 程度を越えると、程度の差こそあれ前述の不安定性と効率の低下を生じる。

まず、これらを解決するためその原因を調査した。次に増幅媒質を含む各 FLM から出力結合鏡までの光学距離を精密に一致させなければならない。さらに、実用性の評価を視野に、安定性の確保に関する検討も行った。

また、これらの発振時のレーザーの縦モード(光の電磁波としての周波数分布)等の評価のため、光のヘテロダイン検波系を構築し、kHz から MHz 領域の精密な光スペクトル計測を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1)不安定要因の解明

まず、これまでの研究で明らかとなっていた位相結合発振出力の各種の不安定性と効

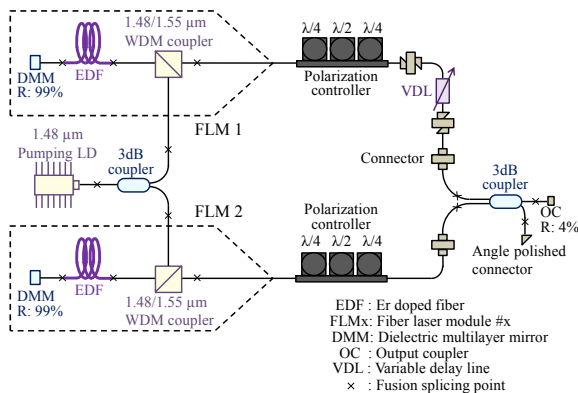


図 1 2 台のファイバレーザーモジュール (FLM) による位相結合実験系

率低下の原因を探るため、モジュール数の少ない位相結合系を構築し、評価を行った。

説明のために、図 1 に 2 台の FLM を用いた位相結合の基本となるレーザー共振器系を示す。増幅媒質は 1550 nm 付近に利得を持つ Er ドープファイバ(EDF)を用いる。励起光源に波長 1480 nm の半導体レーザー(Pumping LD)を用い、これを 2 分岐して FLM1 および FLM2 に導入する。高反射鏡には反射率 99% の誘電体多層膜鏡(DMM)を、出力結合鏡(OC)には反射率が約 4% となるファイバ端面のフレネル反射を利用した。位相結合による出力の合波は、OC 近傍の 3dB カプラにより行われる。位相結合は一種の干渉現象であるため、偏波制御器を用いて各共振器内の偏波状態を制御し OC において一致させる。共振器長を制御するため、FLM1 側に高分解能で光路長を制御可能するための可変遅延線(VDL)を開発し挿入した。

使用した FLM 数を 2~8 台と変化させ、その発振特性を評価した。FLM が 2 台の出力スペクトルを例に、明らかになった事項を示す。

図 2 は、2 台のレーザー共振器の共振器長差による発振スペクトルの違いを示している。各共振器長(ファイバ長)は概ね 37 m である。共振器長差を縮小すると各 FLM が発生する縦モード間隔が接近し、公倍数毎に発振スペクトルの山を作る。(a)は共振器長差が 1.2 mm 存在し、そのためにスペクトルが 6.2 nm 毎のピークを発生させている。一方、(b)は共振器長差をファイバ長測定限界の 10 μm 未満の領域で微調整を行ったものであり、2 つのレーザー共振器が発生する縦モードが能く一致し、無数の縦モードが一斉に発生していることがわかる。

この結果より以下のことが理解できる。共振器長すなわち縦モード間隔の異なる共振器を位相結合させると、縦モードの公倍数毎に発振するが、FLM 数が増加すると縦モードの公倍数の間隔が広がり、EDF の帯域内で全ての共振器が同時に縦モードを一致させられなくなるため、縦モードのグループを作り発振状態がスイッチする。これにより位相

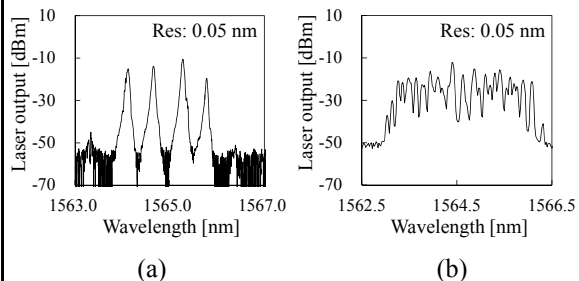


図 2 2 台の FLM による位相結合出力スペクトル。(a)共振器長差 1.2 mm、(b)共振器長差 10 μm 未満

結合効率の低下ならびに各種の不安定性が生じるものと考え、FLM 数増加時には全ての共振器の縦モードを一致させる高度な共振器長制御が必要となるとの結論を得た。

### (2)共振器長制御技術の開発

共振器長の精密制御技術を開発するために、先ず、ファイバ長を精密に測定する技術を開発した。原理的には縦モード間隔の測定を行い、それからファイバ長を算出するが、縦モードの周波数を正確に決定するために、新たな測定技術を開発した。これにより、ファイバ長を分解能 10  $\mu\text{m}$  の精度で測定可能となった。

さらに温度ドリフトによる各共振器間の光路長差制御が必要となるため、銅板を電気ヒーター化し、糸長 2 m のファイバを貼り付け、銅板ヒーターの温度調整により共振器の光学長を制御した。

### (3)共振器安定化技術の検討

ファイバレーザーは、長かつ可撓性のある導波路を用いて共振器を構成しているため、前述の温度変動のみならず、曲げおよび側圧などの外部からのストレスによって偏波面の変動が生じる。これらを解決するため、外部環境から切り放すための三重構造の恒温槽を作成し、その内部に 16 台の位相結合ファイバレーザーを構築することにより高安定化を図った。また、偏波変動の自動補償機構に関して原理的な検証を進めた。

### (4)16 台の位相結合実証実験

構築した 16 台の位相結合ファイバレーザー系の構成を図 3 に示す。FLM ならびに偏

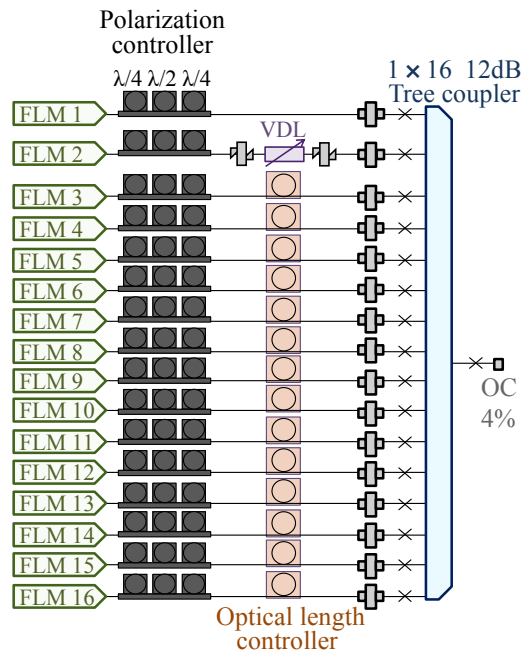


図 3 16 台の FLM による位相結合実験系

波制御器を 16 台用いている。励起 LD とその供給系は省略している。光路長すなわち共振器長制御は、FLM1 を基準とし、それに合わせる様に FLM2 ~ 16 の光路長を調整する。共振器長差の影響を数値化するために、FLM2 のみ光路長を高分解能に読み取りが可能な VDL を用いた。

図 4 に縦モードスペクトルの評価結果を示す。(a)は各レーザー共振器の光路長差の制御を行っていない状態のスペクトルであり、16 台の共振器長差は最大で 15 m となっている。(b)は共振器長差を最大で 100  $\mu\text{m}$  となる様にファイバの切断と融着による機械的長さの調整と温度制御を行った結果である。

図 4(a)は縦モードが無秩序な間隔で生じており、縦モードと縦モードの間が埋まっていると共に、各縦モードの強度が -80 dBm 程度と低い。一方、(b)は各縦モードが明瞭に分離しており、各モードの強度も高く、さらに最大で 60dB 程度の高い対雑音強度比を得られている。このことから、(b)の状態は良好に各レーザー共振器の縦モードが一致していることがわかる。

図 5 は 16 台の縦モードが一致している状態における光スペクトルである。図 2(b)に示した様な広範囲なスペクトルに広がる状態とはなっていないが、スペクトルが単一化しており、最も発振しやすい波長において縦モード群が単一化し、その包絡線が観測できているものと考えている。

共振器長差が最大で 100  $\mu\text{m}$  の状態におけ

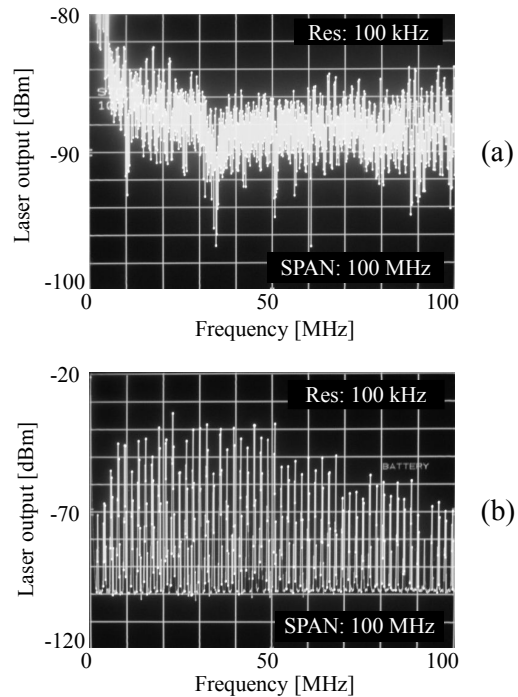


図 4 16 台の FLM による位相結合出力 RF スペクトル。最大共振器長差: (a)15 m、(b)100  $\mu\text{m}$



る位相結合効率は 93.6% が得られており、高い効率で位相結合が可能となっている。

本研究では、多重化数の増加に着目し、共振器長ならびに偏波の制御によって、従来不可能とされていた高い多重化数の位相結合が可能であることを実証した。今回開発した手法を用いれば、高出力なファイバレーザーモジュールの位相結合も可能であり、今後の高出力化手法として展開できる。

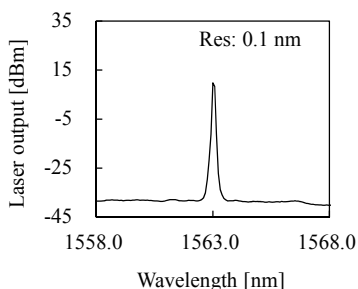


図 5 16 台の FLM による位相結合出力スペクトル。最大共振器長差 100  $\mu\text{m}$

#### 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 0 件)

[学会発表](計 21 件)

小路春樹、吉田実、位相結合ファイバレーザーの共振器長制御による発振出力の向上、レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、北九州国際会議場、2014 年 1 月 22 日

井上大樹、吉田実、小路春樹、閑林優太、光ファイバ直接加熱による位相結合ファイバレーザーの共振器長制御、レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、北九州国際会議場、2014 年 1 月 22 日

田熊厚志、吉田実、小路春樹、偏波自動最適化位相結合ファイバレーザーの開発、レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、北九州国際会議場、2014 年 1 月 22 日

西山泰裕、吉田実、藪野啓、位相結合を用いたモード同期フェムト秒パルス幅可変レーザーの開発及び発振安定性の向上、レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会、北九州国際会議場、2014 年 1 月 22 日

閑林優太、吉田実、小路春樹、西山泰裕、井上大樹、シングルモードファイバ伝送における偏波の時間的安定性の評価、平成 25 年電気関係学会関西連合大会、大阪電気通信大学、2013 年 11 月 17 日

Nishiyama Yasuhiro, Yoshida Minoru, Yabuno Hiraku, Development of the Variable Pulsewidth Mode-Locked

Femtosecond Laser using Coherent Coupling, International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2013 年 10 月 10 日, Miami, FL, USA

松下泰裕、吉田実、位相結合を用いたファイバレーザーの多重化に伴う位相結合効率低下の改善、レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、2013 年 1 月 30 日、姫路商工会議所

國廣正人、吉田実、リング共振器による位相結合ファイバレーザーの発振出力の向上、レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会、2013 年 1 月 30 日、姫路商工会議所  
田熊厚志、吉田実、位相結合により多重化されたファイバレーザーの高出力化、平成 24 年電気関係学会関西連合大会、2012 年 12 月 9 日、関西大学

小路春樹、吉田実、位相結合ファイバレーザーのスペクトル測定および共振器長制御による発振出力の向上、平成 24 年電気関係学会関西連合大会、2012 年 12 月 9 日、関西大学

松下泰裕、吉田実、位相結合を用いたファイバレーザーの多重化に伴う位相結合効率の改善、レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会、2012 年 1 月 30 日、TKP 仙台カンファレンスセンター

松下泰裕、吉田実、位相結合を用いたファイバレーザーの高出力化、平成 23 年電気関係学会関西連合大会、2011 年 10 月 30 日、兵庫県立大学

[その他]

展示会

イノベーションフェア関西、科学技術振興機構、平成 24 年 12 月 6 日

投稿中論文

Optics Letters および電気学会論文誌 C に各一件投稿中

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・理工学部・教授  
研究者番号: 50388493

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

中野 人志 (NAKANO, Hitoshi)  
近畿大学・理工学部・教授  
研究者番号: 20257968