

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26600114

研究課題名(和文) 時間領域モード選択によるマルチコアファイバーレーザーの位相同期モード同期の研究

研究課題名(英文) Study on phase-locking and mode-locking in multicore fiber laser by time-domain mode selection

研究代表者

白川 晃 (Shirakawa, Akira)

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：00313429

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)：マルチコアファイバー(MCF)レーザーの新しい位相同期法として、時間領域スーパーモード選択による位相同期モード同期を提案した。まず通常の単一コアファイバーを用いて音響光学素子駆動による能動モード同期発振器を開発した。動作は十分安定で再生モード同期機構は不要と分かった。しかし19コアファイバーの場合モード同期は得られなかった。波長分散のため多数のスーパーモードが励振できるためと考えられ、適切な波長フィルタを現在検討中である。並行して、相補的な方法である可飽和吸収体受動モード同期位相同期MCFレーザー、干渉法を用いたスーパーモード解析、シミュレーションによるMCFの自己収束限界等の研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We proposed simultaneous phase-locking and mode-locking by time-domain supermode selection as a new method for phase-locking in multicore fiber laser. As the first step we developed an actively mode-locked oscillator driven by an acoustic optical modulator by using a normal single core fiber. The mode-locking operation was so stable that any regenerative mode-locking servo system is found to be unnecessary. But no mode-locking was obtained in the case of a 19-core fiber. It was supposed that wavelength dispersion gave multiple supermodes oscillation. Appropriate spectral filtering is under consideration. We also studied passive mode-locked and phase-locked multicore fiber laser by using a saturable absorber as the complementary method, development of a new method of supermode analysis based on interferogram, self-focusing limit in multicore fiber by simulation.

研究分野：レーザー工学

キーワード：レーザー コヒーレントビーム結合 マルチコアファイバー モード同期

1. 研究開始当初の背景

単体では限界のあるファイバーレーザーのパワー・エネルギー向上のために、複数のファイバーレーザーの電界位相を一致(同期)させて輝度を重畳するコヒーレントビーム結合の研究が極めて重要になっている。申請者は2006年より単一ファイバーに複数の活性コアを施したマルチコアファイバー(MCF)レーザーの研究を、国内で唯一推進してきた。コア数分形成されるスーパーモードのうち、位相同期し遠視野で輝度加算できる in-phase モードを選択励振する方法として、これまで Talbot 共振器法や申請者が提案したエンドシール法など、専ら空間的なモードフィルタ法が用いられてきた。2013年夏客員教授に招聘した Feng 博士との議論中、本研究の新位相同期法のアイデアを思いついた。これまでに全く前例のない時間領域のスーパーモード選択法の着想であった。

2. 研究の目的

超短パルスファイバーレーザーのピークパワー・パルスエネルギー向上のための画期的新手法として、MCF レーザーにおける時間領域スーパーモード選択による位相同期モード同期法を提案する。MCF のスーパーモード間で群速度が異なることを用い、モード同期発振の繰り返し周波数を同調制御することにより、コア電界間の位相の揃った in-phase モード選択励振による超短パルス光の輝度重畳、高次スーパーモードの制御選択を実証する。位相同期とモード同期の協同ダイナミクスを探求し、モード分散と波長分散のクロストークによる限界を解明して、本手法に最適な MCF 構造を明らかにする。将来の短パルス化、大口径化による高ピークパワー化の可能性を探る。

3. 研究の方法

時間領域スーパーモード選択法の研究のために、能動モード同期システムを作製する。最初に通常の Yb 添加単一コアファイバーで能動モード同期発振器を構築したのち、コア間の結合が強く、スーパーモード間に十分な群速度差を有する現有の Yb 添加 19 コアファイバーで位相同期モード同期に挑戦する。

並行して、相補的な方法である可飽和吸収体による受動モード同期位相同期 MCF レーザーの研究、干渉法を用いたスーパーモード解析法の開発、シミュレーションによる MCF の自己収束限界の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 能動モード同期 MCF レーザーの製作
MCF レーザーの位相同期モード同期の準備として、まず通常の単一コアファイバーを用いた能動モード同期レーザーを構築した(図1)。ダブルクラッド Yb 添加ファイバーレーザーの外部共振器中の近視野に音響光

学素子(AOM)を配置し、矩形波で損失変調を行うことにより能動モード同期発振を行うことに成功した(図2)。繰り返し周波数(約22.6MHz)に対する同調範囲は100kHz程度と十分に広く、長時間安定動作させることができ、当初想定していた再生モード同期は必ずしも必要ではないことが判明し行わないこととした。

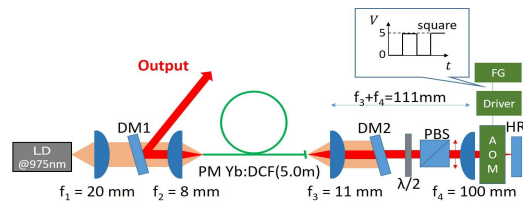


図1. 能動モード同期 Yb ファイバーレーザー

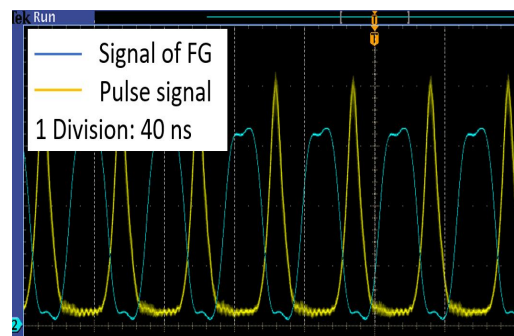


図2. 能動モード同期パルス列。繰り返し周波数22.6MHz、パルス幅8.3ns、パルスエネルギー11.1nJ。

次にファイバーを Yb 添加 19 コアファイバー(図3)に置き換えた。このファイバーはコア間の結合が強く、in-phase モードと次の高次スーパーモード(図1(b)モード2)の群屈折率の差は 10^{-4} 程度あり(有限要素法計算)、繰り返し周波数 f_{rep} の差も比で 10^{-4} 程度となり、 $f_{rep}=20\text{MHz}$ とすれば2kHz差があり十分に大きくスーパーモードの弁別が可能だと期待した。しかし能動モード同期モード同期を得ることができなかった。MCF レーザーの場合モード同期とはすなわち単一スーパーモードが選択されている状態だが、諸条件を変えても得ることができなかった。

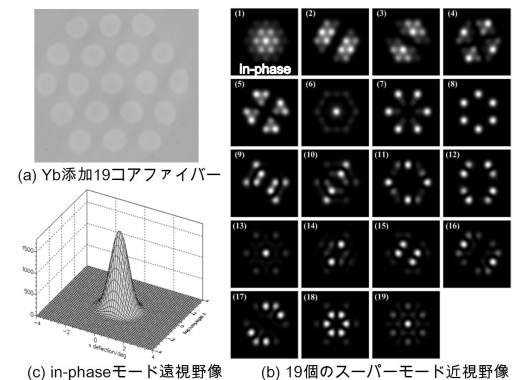


図3. Yb 添加 19 コアファイバー

多波長でスパイク様に励振しているスペクトルから、多くのスーパーモードが発生していると予想された。実際ビーム形状は複雑であった。モード同期 MCF 発振器の繰り返し周波数は、波長分散のためスーパーモードだけでなく波長にも依存する。in-phase モードと同じ繰り返し周波数を与える異波長高次モード解を抑制するために、適切な波長フィルタが必要である。Yb 添加 19 コアファイバーのモード分散と波長分散を計算し、最適な波長フィルタを検討中である。

(2) 受動モード同期位相同期 MCF レーザーの研究

本研究課題の前に提案・実証していた、可飽和吸収体を遠視野に配置し強度の強い in-phase モードのみ選択励振させる Q スイッチ位相同期 MCF レーザーについて、最適化を行った。MCF として Yb 添加 7 コアフォトニック結晶ファイバー(PCF), 可飽和吸収体として Cr:YAG を用い、その反対側にアウトプットカップラーを配置することで、従来より 1.8 倍のピークパワー向上、1.4 倍のエネルギー向上を実現し、またストレーン比による in-phase モードの評価が可能となった。

更に Cr:YAG よりも吸収回復時間の速い半導体可飽和吸収体鏡(SESAM)を用いて、受動モード同期位相同期に挑戦した。in-phase モード様のビーム形状が得られたが、Q スイッチモード同期であった(図 3)。時間領域モード選択と同様、in-phase モードが 100% にならないと他の繰り返し周波数の異なるモードが共存し完全なモード同期は得られない。モード同期と位相同期の同時実現は大変な困難があると実感した。

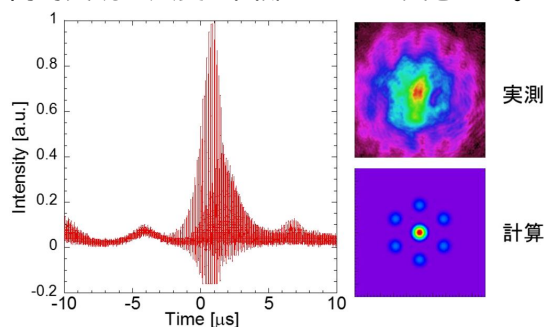


図 4. SESAM モード同期位相同期 MCF レーザーの実験結果

(3) 干渉法によるスーパーモード解析法

Yb 添加 MCF レーザーの位相同期評価法として新しいモード解析法を考案・実証した。図 5 に実験配置図を示す。レーザー光の一部をシングルモードファイバー(SMF)を通し平面波参照光として、レーザー光の近視野像と干渉縞を形成し、2 次元フーリエ変換を行い干渉縞の空間周波数スペクトルを取り出すことで、電界分布や位相の情報を得、各スーパーモードの割合を算出する。これまで困難

であった MCF レーザーのモード評価が可能となった。実際、エンドシール法で位相同期した Yb 添加 6 コア PCF レーザーを用いて、観測した out-of-phase モードの特徴を有したビーム形状についてこの方法で解析を行い、out-of-phase モードが 68% と算出できた(図 6)。

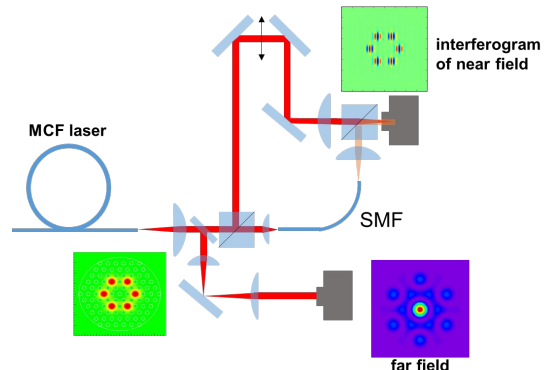


図 5.干渉法による MCF レーザー出力のモード解析

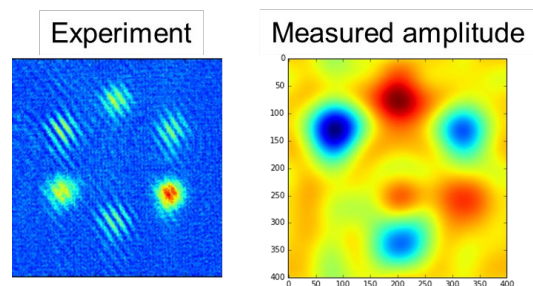


図 6. Yb 添加 6 コア PCF レーザーの (左) 近視野干渉縞と (右) 算出した電界分布

(4) MCF の自己収束限界考察

エバネッセント結合した MCF を用いたコヒーレントビーム結合において、本当にコア数分の自己収束限界のスケーリングができるかは未解明の課題であった。それを明らかにするために MCF 中の非線形伝搬のシミュレーションプログラムを開発した。in-phase モードは通常の自己収束限界(5MW)よりも低いパワーで雑音により不安定性が誘起され電界分布に偏りが発生するのに対し、out-of-phase (反位相) モードは安定に伝搬でき、パワー/エネルギーをコア数分スケールでき、5MW を超えることができることを明らかにした。エンドシール自己イメージング法では out-of-phase モードを選択励振することは容易であり、セグメント位相板等を用いれば実用上重要な in-phase モードに変換することもできる。今後は out-of-phase モードの選択励振に注力する方針を得ることができた。

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 2 件)

1. H. Tünnermann and A. Shirakawa, "Self-focusing in multicore fibers," *Optics Express*, 査読有, vol. 23, no.3, 2436-2445 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.002436 URL: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-23-3-2436>
 2. 久保内照雄, 黒須雄太, 佐藤慶吾, チュナマン・ヘンリク, 白川晃:「可飽和吸収体を用いた Q スイッチ位同期マルチコアファイバーレーザー」レーザー学会第 482 回研究会報告「ファイバーレーザー技術」, 査読無, RTM-15-44.
- 〔学会発表〕(計 26 件)
1. A. Shirakawa, Y. Kurosu, and H. Tünnermann, "Mode analysis in phase-locked multicore fiber laser by interference method," *Photonics Europe 2018*, paper 10683-129, Strasbourg, France, Apr. 23, 2018.
 2. A. Shirakawa, H. Tünnermann, "Coherent beam combining for power scaling of fiber lasers," *The 10th Asian Symposium on Intense Laser Science (ASILS10)*, Sharjah, UAE, Mar. 12, 2018. (invited talk)
 3. 成富未夢人, 白川晃:「音響光学変調器を用いたファイバーレーザーの能動モード同期」, 第 18 回レーザー学会東京支部研究会, 東海大学湘南キャンパス, 2018 年 3 月 2 日.
 4. 梯太郎, 黒須雄太, Henrik Tünnermann, 白川晃:「マルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザーの選択的モード励振およびモード解析」, 第 18 回レーザー学会東京支部研究会, 東海大学湘南キャンパス, 2018 年 3 月 2 日.
 5. 白川晃:「ファイバーレーザーの高出力化のためのコヒーレントビーム結合」, レーザ協会第 180 回研究会 ファイバーレーザー技術 ~ 光源・計測・加工 ~, 電気通信大学, 2018 年 2 月 8 日. (招待講演)
 6. A. Shirakawa and H. Tünnermann, "Design for evanescently-coupled multicore fiber laser beyond self-focusing limit," *International Conference on Extremely Light (ICEL) 2017*, Szeged, Hungary, Nov. 8, 2017.
 7. 白川晃:「エバネッセント結合マルチコアファイバの位同期レーザー動作」, 光通信インフラの飛躍的な高度化に関する時限研究専門委員会 (EXAT) 研究会, 札幌, 2017 年 8 月 31 日. (招待講演)
 8. Y. Kurosu, H. Tünnermann, and A. Shirakawa, "Mode analysis in phase-locked multi-core photonic crystal fiber laser by interference method," *CLEO-Europe/EQEC 2017*, paper CJ-P.3 MON, Munich, Germany, June 26, 2017.
 9. 黒須雄太, Henrik Tünnermann, 白川晃:「位同期マルチコアファイバーレーザーの干渉法によるモード解析」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-213-4, パシフィコ横浜, 2017 年 3 月 15 日.
 10. 内部優花, 黒須雄太, 白川晃:「可飽和吸収体による受動 Q スイッチ位同期マルチコアファイバーレーザー」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-213-3, パシフィコ横浜, 2017 年 3 月 15 日.
 11. 内部優花, 黒須雄太, 白川晃:「可飽和吸収体による受動 Q スイッチ位同期マルチコアファイバーレーザー」, 第 17 回レーザー学会東京支部研究会, P-6, 東海大学高輪キャンパス, 2017 年 3 月 7 日.
 12. 黒須雄太, Henrik Tünnermann, 白川晃:「位同期マルチコアファイバーレーザーの干渉法によるモード計測」, レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 09pV-8, 徳島大学常三島キャンパス, 2017 年 1 月 9 日.
 13. 黒須雄太, Henrik Tünnermann, 白川晃:「位同期マルチコアファイバーレーザーの干渉法によるモード計測」, レーザー学会第 496 回研究会「ファイバーレーザー技術」, P16, 名古屋大学, 2016 年 11 月 18 日.
 14. A. Shirakawa, T. Kubouchi, Y. Kurosu, H. Tünnermann, "Phase-locked multicore fiber lasers," *HPLS&A 2016*, Gmunden, Austria, Sep. 2016. (invited talk)
 15. Y. Kurosu, T. Kubouchi, H. Tünnermann, and A. Shirakawa, "Phase-locked 7-core multi-core photonic crystal fiber laser," *ALPS 2016*, paper ALPS6-3, Yokohama, May 17, 2016.
 16. 白川晃:「次世代ファイバーレーザー: フォトニックバンドギャップファイバーレーザー及びマルチコアファイバーレーザー」, 豊田工業大学第 16 回先端フロンティアテクノロジー研究センターシンポジウム, 名古屋, 2016 年 3 月 4 日. (招待講演)
 17. 久保内照雄, 黒須雄太, チュナマン・ヘンリク, 白川晃:「可飽和吸収体 Q スイッチ位同期マルチコアファイバーレーザーのサイドローブ抑制」, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, 09pII-11, 名城大学天白キャンパス, 2016 年 1 月 9 日.
 18. 黒須雄太, 久保内照雄, Henrik Tünnermann, 白川晃, 齋藤和也:「位同期 Yb 添加 7 コアマルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー」, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, 09pII-10, 名城大学天白キャンパス, 2016 年 1 月 9 日.
 19. 黒須雄太, 久保内照雄, Henrik Tünnermann, 白川晃, 齋藤和也:「位同期 Yb 添加 7 コアマルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザー」, レーザー学会第 482 回研究会「ファイバーレーザー技術」, P9, 名古屋大学, 2015 年 11 月 27 日.
 20. 久保内照雄, 黒須雄太, 佐藤慶吾, チュ

- ナマン・ヘンリク, 白川晃:「可飽和吸収体を用いたQスイッチ位相同期マルチコアファイバーレーザー」, レーザー学会第482回研究会「ファイバーレーザー技術」, 名古屋大学, 2015年11月27日.
21. 久保内照雄, 白川晃:「サイドローブ抑制可飽和吸収体位相同期マルチコアファイバーレーザー」, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 13a-2D-4, 名古屋, 2015年9月13日.
 22. 黒須雄太, 久保内照雄, 佐藤慶吾, 白川晃, 小森翼, 齋藤和也:「7コアマルチコアフォトニック結晶ファイバーレーザーの位相同期特性」, 第76回応用物理学会秋季学術講演会, 13a-2D-3, 名古屋, 2015年9月13日.
 23. H. Tünnermann and A. Shirakawa, “Coupled multicore fibers in the high power regime: Impact of core size mismatch,” CLEO-PR 2015, paper 28G2-4, Busan, Korea, Aug. 28, 2015.
 24. H. Tünnermann and A. Shirakawa, “Power scaling with coupled multi-core fibers,” ICMAT15 (International Conference on Materials for Advanced Technologies), paper A-4314, Singapore, July 1, 2015. (invited talk)
 25. H. Tünnermann and A. Shirakawa, “Impact of coupling strength on self-focusing in multicore fibers,” Photonics West/LASE 2015, paper 9344-22, San Francisco, USA, Feb. 10, 2015.
 26. H. Tünnermann and A. Shirakawa, “Self-focusing in multicore fibers,” Advanced Solid-State Lasers (ASSL) 2014, paper ATu2A.44, Shanghai, China, Nov. 18, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白川 晃 (Akira Shirakawa)

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: 00313429