

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25247067

研究課題名(和文) フォトニックバンドギャップ及びマルチコアによるファイバー高エネルギーパルス光源

研究課題名(英文) High energy fiber pulse sources by photonic bandgap fibers and multicore fibers

研究代表者

白川 晃 (Shirakawa, Akira)

電気通信大学・学内共同利用施設等・准教授

研究者番号：00313429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円

研究成果の概要(和文)：ファイバーの非線形性で決まるファイバーレーザーのエネルギー/ピークパワー限界を向上する新手法を探求した。フォトニックバンドギャップファイバーの波長依存分布損失特性を用いて誘導ラマン散乱を抑制し、パワー限界を一桁向上した。更に音響フォノンのアンチガイド効果による誘導ブリルアン散乱抑制の可能性を追求し、高出力単一周波数動作を実証した。並行してマルチコアファイバーによるパワースケーリングを研究し、自己イメージング位相同期、可飽和吸収体による新しい位相同期法について実証した。究極限界である自己収束効限界は、反位相モードでコア数分のスケールアップが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have explored new methods for scaling the energy/peak-power limits of fiber lasers determined by various fiber nonlinearities. Photonic bandgap fiber has the inherent distributed spectral filtering, enabling suppression of stimulated Raman scattering. We have achieved an order of magnitude power scaling of pulsed fiber lasers. In addition, mitigation of stimulated Brillouin scattering by acoustic antiguiding was also pursued and we demonstrated high-power single-frequency operation.

We also studied power scaling by multicore fibers. Phase-locking operations by self-imaging as well as by a new method of using a saturable absorber have been demonstrated. We showed the self-focusing limit, the ultimate limit among various nonlinearities, can be scaled by the core number by adopting the out-of-phase mode.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：ファイバーレーザー パルスレーザー フォトニックバンドギャップファイバーレーザー マルチコアファイバー 位相同期レーザーアレイ

1. 研究開始当初の背景

近年、高効率、高輝度、堅牢性、可搬性など多くの優位点を持つファイバーレーザーが目覚ましく進展し、高平均出力分野では固体レーザーを急速に置き換えつつある。パルス光源についてもファイバーレーザーが強く囑望されているが、状況は大変厳しい。光ファイバーはコア径が小さく(モード直径(MFD)~10-20 μm)かつ長尺相互作用のため、誘導ラマン散乱(SRS)などの非線形性が卓越し、ピークパワーが厳しく制限されるためである。フォトニック結晶ファイバー(PCF)技術により MFD100 μm に達するファイバーが登場し、絶対限界である自己収束限界(~5MW)に近いピークパワーが 2007 年に報告されたが、エネルギーは 4.3mJ に過ぎない(未だに世界記録)。しかもそのようなファイバーは曲げることができず、一直線に置くしかない(rod-type fiber)。従って実用ナノ秒ファイバー光源はエネルギー数 10 μJ 、ピークパワー数 10kW 程度が限界で、固体レーザーを置換するのはとても不可能なのが現状であった。

2. 研究の目的

ファイバーレーザーは SRS や誘導ブリルアン散乱(SBS)などの非線形性のため高エネルギー/高ピークパワー発生が困難であるのが最大の課題となっている。本研究では高度な伝搬制御ファイバーによるエネルギー・ピークパワー限界のスケールアップに挑戦する。まずフォトニックバンドギャップファイバー(PBGF)の波長依存分布損失特性を用いて信号光とストークス光の損失比を増大して SRS を抑制し、ファイバーレーザーのパワー限界の一桁向上を実証する。更に音響フォノンのアンチガイド効果による SBS 抑制の可能性を追求する。並行して位相同期アレイによる高エネルギー化を探索する。単一ファイバー中に複数の活性コアを有するマルチコアファイバー(MCF)により、破壊限界、自己収束限界を超えたスケールアップを目指す。同位相モードを選択励振するのに適した構造・方法を明らかにし、コア数・コア径スケールアップを開拓して絶対限界(5MW)を超えるピークパワー発生への指針を得る。

3. 研究の方法

世界初の PBGF の長波長カットオフ特性を用いた SRS 抑制パルス増幅を、1064nm 帯で実証する。損失スロープとラマン利得スペクトル形状で決まる SRS 限界パワーを検証する。PBGF の音響フォノンアンチガイド効果について検討し、レーザーガイドスターに重要な波長 1178nm において単一周波数光のパワースケールアップに取り組む。大コア径 PBGF を設計・製作し、レーザー動作を実証する。並行してマルチコア PCF(MCPCF)による位相同期並列化による高ピークパワー化に取り組む。6 コア及び 7 コアのファイバー

での動作を比較しながら、モード混合が小さくかつエンドシール自己イメージング位相同期法に最適な構造を決定し、コア径・コア数のスケールアップ研究に取り組む。可飽和吸収体を用いた遠視野ソフトアパーチャー位相同期法など新しい課題にも挑戦する。

4. 研究成果

(1) 誘導ラマン散乱抑制 PBGF 増幅の実証

1080nm 付近に長波長カットオフを有する Yb 添加 PBGF を作製した。断面写真を図 1(a) に示す。コア径 8 μm 、ピッチ $A=8.3\mu\text{m}$ 、MFD 8.5 μm 、クラッド径 180 μm である。ファイバーの透過特性と励起波長 1064nm 時のラマン利得スペクトルを図 1(b) に示す。このようにラマン利得帯はほぼ遮断バンドとなり SRS を抑制できる。1064 nm ナノ秒パルスシード光を 7m 長の Yb 添加 PBGF で増幅し、最大ピークパワー 35kW まで SRS フリーで増幅することに成功した(図 2)。通常ファイバーの場合の SRS 臨界パワーが 7.7kW(計算値)であるので、約 7dB の抑制に成功したことになる。コアの大口径化により一層のピークパワー・エネルギー限界の向上が期待される。

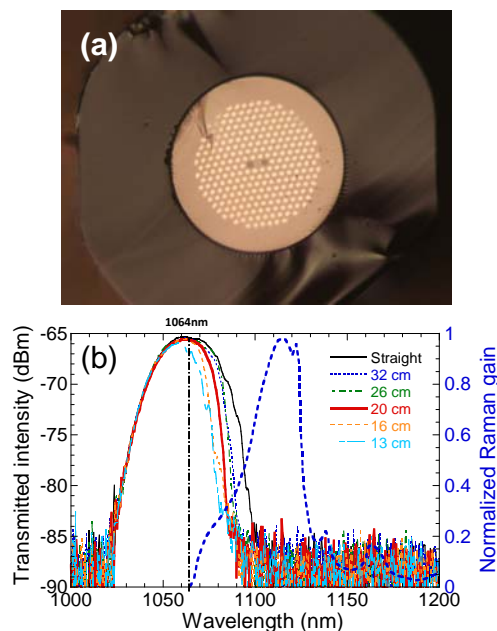


図 1. (a) 1064nm 帯 SRS 抑制用 Yb 添加 PBGF の断面写真。(b) 様々な曲げ径時の透過スペクトル。ファイバー長 1.5m。太破線は励起波長 1064nm 時の規格化ラマン利得スペクトル。

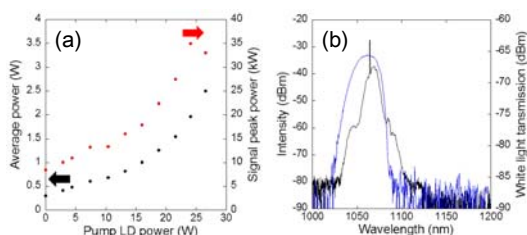


図 2. (a) パワー特性 (b) スペクトル特性 (実線: 最大出力 35kW 時のスペクトル, 破線: PBGF の透過スペクトル)

また PBGF による誘導ラマン散乱(SRS)抑制パルス増幅を、通常ファイバー増幅と比較検証した。後者では顕著なスペクトル拡がりが生じ、入射偏光状態に依存する4光波混合と SRS のトレードオフも観測された。PBGF 増幅ではスペクトル拡がりは PBG 内に限られその入射偏光依存性は小さく、構造分散による変調不安定性が主な要因であることを明らかにした。

(2) PBGF のブリルアン利得抑制効果, 1178nm 単一周波数 PBGF 増幅の高出力化

Yb 添加 PBGF のブリルアン利得スペクトル(BGS)をポンプ・プローブ法で測定した(図3)。通常のシングルモード Ge 添加ファイバー(1060XP)の BGS と比べると、PBGF では BGS が分裂し低周波数側に小さなピークを示す。これは PBGF のコアモードの反共鳴構造による。更に音響フォノンが高屈折率ロッド部に局在し、電界と重なりが低下するアンチガイド効果も加わり、同じ MFD のステップインデックスファイバーよりも SBS が 1.8dB 程度抑制されることを明らかにした。今回得られた結果は PBGF が狭線幅動作にお

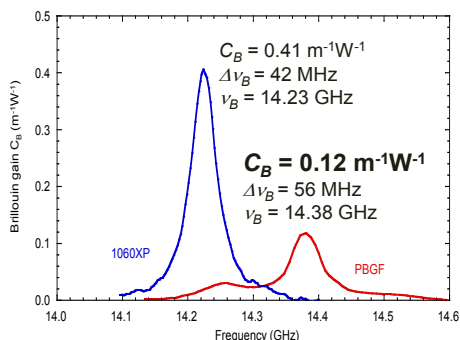


図 3. ブリルアン利得スペクトル。ステップインデックスファイバーとして 1060XP のスペクトルも示す。

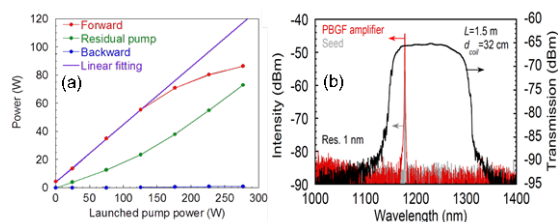


図 4. 1178nmYb 添加 PBGF 増幅器の(a)出力特性および(b)スペクトル。黒線は 1.5m 長 PBGF の透過スペクトル。

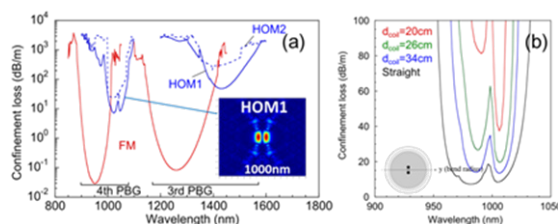


図 5. 1178nm 用 Yb 添加 PBGF のモード特性の数値計算。(a)第3および4バンドギャップ(PBG)の閉じ込め損失。寄生発振を与えるのは第4PBGの HOM1 モード(右下)。(b)そのモードの閉じ込め損失の曲げ径依存性。

いても従来ファイバーを凌ぎうる可能性を有することを示している。

増幅自然放出(ASE)抑制 Yb 添加 PBGF 増幅器において、半導体ディスクレーザーをシード源とした単一周波数 1178nmYb 添加 PBGF 増幅器を開発した。誘導ブリルアン散乱を引き起こすことなくパワー31W、線幅 149kHz の狭線幅出力を得ることに成功した。また雑音駆動位相変調による誘導ブリルアン散乱抑制により、世界最高出力(87W)の 1178nm 単一周波数単一偏光増幅に成功した(図4)。今後レーザーガイドスター光源用に線幅を最適化し、またシード光源の高出力化により 100W 超の 1178nm 光を目指す。また有限要素法を用いて PBGF の数値解析を行った。Yb の利得帯にかかる高次 PBG の高次モード(HOM)が寄生発振に寄与すること、B 添加ロッドの軸とファイバー曲げの径方向が 90 度の場合に曲げ損失が高く寄生発振が抑制できることを理論・実験両面で明らかにした(図5)。

(3) 大モード面積 PBGF の開発

ファイバーの非線形性限界の向上には大モード面積化が有効である。図 6(a)に示すように一方方向をフォトニック結晶構造としてシングルモード大モード面積(LMA)を実現したハイブリッド PBGF を開発した。モードフィールド直径は 31 μ m である。これを用いて ASE 抑制 LMA PBGF 増幅の実証実験に世界で初めて成功した。1178nm で出力 53W、利得 3.3dB を得た(図 6(b))。しかし第 2 フォトニックバンドギャップ周辺のモードで発振してしまうことが判明し、その向上が更なるスケールアップの課題である。

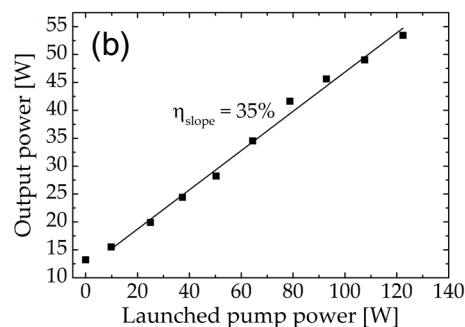
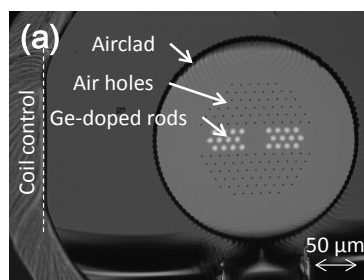


図 6.(a)1178nm 大モード面 Yb 添加 PBGF の断面写真。(b)増幅器出力特性。

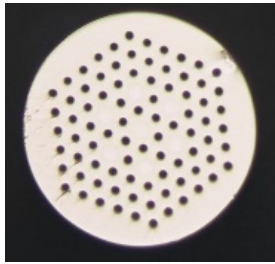


図 7. 7 コア Yb 添加 MCPCF の断面写真

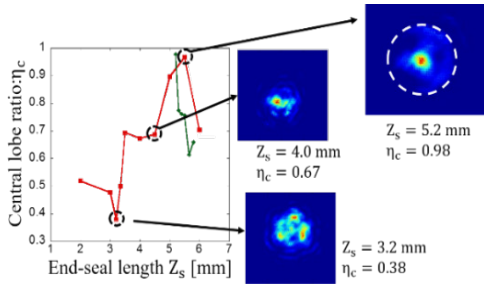


図 8. 遠視野像の中心ローブ比のエンドシール長依存性

(4) 7 コア Yb 添加 MCPCF の位相同期

従来研究に用いてきた 6 コア Yb 添加 MCPCF と比較するために、中央にもコアを有する 7 コア Yb 添加 MCPCF を新規製作し (図 7), 特性評価, レーザー発振実験を行った。エンドシール自己イメージング法による位相同期レーザー実験において, 図 8 に示すようにシール長 5.2mm で in-phase モード (同位相モード) の選択的励振が得られ, スロープ効率 83.5%, $M^2=3.44$, 中心ローブ比 0.98 を得た。ファイバー自体の $M^2=3.86$, 中心ローブ比 0.66 に比べビーム品質が向上しており, エンドシールによるフィルファクターの向上が 7 コアの場合にも示された。

(5) 可飽和吸収体による Q スイッチ位相同期 MCPCF レーザー

可飽和吸収体(SA)を用いて in-phase モードの選択と Q スイッチ発振を同時に実現する方法を新たに考案した。SA は, 強度が低い光には吸収体として損失を与え, 強度が高い光には吸収が飽和し損失が低くなる。従って MCPCF の遠視野に SA を置くことにより, 図 9 のように他のスーパーモードより高い強度を持つ in-phase モードを選択励振することができる。同時に Q 値変調器として作用するの

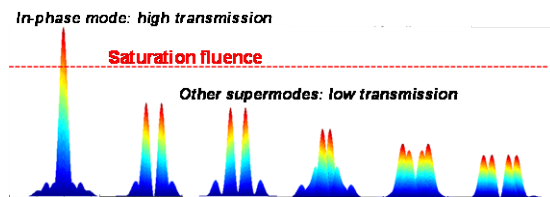


図 9. 可飽和吸収体による位相同期 Q スイッチ動作の原理。6 コアフォトニック結晶ファイバーの 6 個のスーパーモードの遠視野強度プロファイル(計算)を示す。

で, Q スイッチによる高エネルギーパルスも得られる。

Q スイッチ位相同期 MCPCF レーザーの配置図を図 10 に示す。SA として $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ を用いており, AR コート付で初期透過率 80% である。この $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 中に $f=15\text{mm}$ のレンズで MCPCF の遠視野像を形成し, in-phase モードを選択励振する。平均パワー特性と遠視野ビーム形状を図 11(a)に示す。Q スイッチ動作前は緩和発振でモード選択性は低いが, Q スイッチ閾値付近ではストレール比 0.86 と純度の高い in-phase モードが得られた。パワー増大とともにストレール比は低下し, 高次スーパーモードが励振していることが分かる。図 11(b)に最大エネルギー時のパルス波形を示す。繰り返し周波数 268kHz, 平均エネルギー 12 μJ , 最大パルスエネルギー 18 μJ , 最大尖塔出力 26W, パルス幅 840ns が得られた。

パワー増大とともに他のスーパーモードを励振してしまうのは, SA の残留吸収による熱レンズ効果によるモード混合のためである。in-phase モードの遠視野像のサイドローブの存在のため, ビーム全体としては他のスーパーモードとの透過率差が小さいことが数値計算により判明し, モード混合が避けられない。これを克服するためにエンドシ

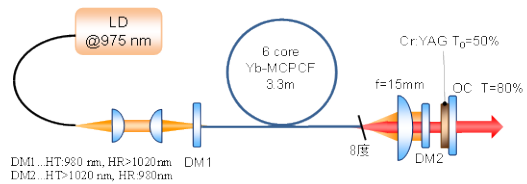


図 10. 可飽和吸収体による Q スイッチ位相同期 MCPCF レーザー

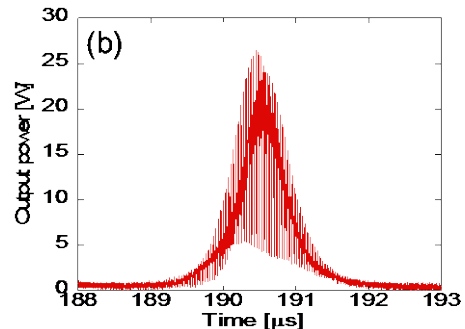
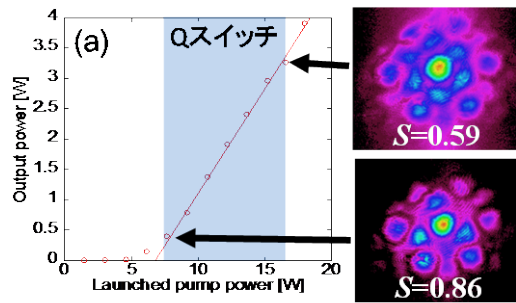


図 11. (a) 平均パワー特性。Q スイッチ動作する領域をグレーで示す。Q スイッチ閾値付近と最大エネルギー時の遠視野ビーム形状を右に示す。S: ストレール比。 (b) 最大エネルギー時のパルス波形。

ルによりサイドローブを抑圧して、in-phase モードと他のスーパーモードとの透過率差を大きくするアイデアを考案・実証した。これにより平均エネルギー $21\mu\text{J}$ 、最大パルスエネルギー $31\mu\text{J}$ 、最大尖塔出力 108W まで高エネルギー化することに成功している。更に7コアMCPCFではサイドローブが小さいため、エンドシールせずに同様のエネルギーを得ることに成功した。本手法の場合中央コアのある方が位相同期に有効であることが分かった。

(6) 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リングでき、5MWを超えることができることを明らかにした(図12)。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。

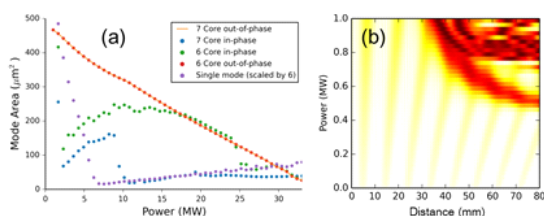


図12. (a)6コア/7コアMCFのin-phaseモードおよびout-of-phaseモードの実効モード面積のパワー依存性。(b)6コアMCFのin-phaseモードの非線形伝搬特性。

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 7 件)

- 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.
- 白川晃, 陳明晨:「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」OPTRONICS 2015, 査読無, no.4, 148-152.

- S. R. Petersen, M. Chen, A. Shirakawa, C. B. Olausson, T. T. Alkeskjold, and J. Lægsgaard, “Large-mode-area hybrid photonic crystal fiber amplifier at 1178 nm,” Optics Letters, 査読有, vol. 40, no.8, 1741-1744 (2015). DOI: 10.1364/OL.40.001741 URL: https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-40-8-1741
- M. Chen, A. Shirakawa, C. B. Olausson, and T. T. Alkeskjold, “87 W, narrow-linewidth, linearly-polarized 1178 nm photonic bandgap fiber amplifier,” Optics Express, 査読有, vol. 23, no.3, 3134-3141 (2015). DOI: 10.1364/OE.23.003134 URL: https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-23-3-3134
- 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
- T. Leinonen, M. Chen, X. Fan, E. L. Kantola, A. Shirakawa, and M. D. Guina, “Single-frequency 1178 nm SDL/Yb-PBGF MOPA with an output power of 31 W,” Proc. SPIE 8961, 査読有, 896105 (2014). DOI: 10.1117/12.2040113
- X. Fan, M. Chen, A. Shirakawa, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, and J. Broeng, “A 98 W 1178 nm Yb-doped solid-core photonic bandgap fiber oscillator,” Laser Phys. Lett. 10, 査読有, no.10, 105101 (2013). DOI: 10.1088/1612-2011/10/10/105101

[学会発表] (計 14 件) ※招待講演のみ

- A. Shirakawa, T. Kubouchi, Y. Kurosu, H. Tünnermann, “Phase-locked multicore fiber lasers,” HPLS&A 2016, Gmunden, Austria, Sep. 2016. (invited talk)
- 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)
- 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)
- A. Shirakawa, “Spectrally-filtering photonic bandgap fiber lasers,” OECC 2015, paper JTUA.21, Shanghai, China, June 30, 2015. (invited talk)
- A. Shirakawa, “Photonic bandgap fiber laser for sodium guide star applications,” Frontiers in Optics 2014, paper FW5D.3,

- Tucson, USA, Oct. 22, 2014. (invited talk)
6. A. Shirakawa, "Phase-locked multicore fiber lasers for power and energy scaling," The Second International Seminar on High-power Laser Interaction with Matter and Application, Suzhou, China, Oct. 20, 2014. (Plenary Talk)
 7. A. Shirakawa, M. Chen, Y. Suzuki, K. Sato, X. Fan, H. Tünnermann, M. Karow, C. B. Olausson, S. R. Petersen, T. Alkeskjold, and K. Saito, "Photonic bandgap fiber lasers and multicore fiber lasers for next generation high power lasers," Specialty Optical Fibers & Applications 2014 (in Advanced Photonics Congress), paper SoTu4B.2, Barcelona, Spain, July 29, 2014. (invited talk)
 8. A. Shirakawa, "Phase-locked multicore fiber lasers," CLEO 2014, paper STh4N.1, San Jose, USA, June 12, 2014. (invited talk)
 9. A. Shirakawa, "Photonic bandgap and multicore fiber lasers for next-generation lasers," Advanced Lasers and Their Applications (ALTA) 2014, Jeju, Korea, May 9, 2014. (invited talk)
 10. A. Shirakawa, "Photonic bandgap and multicore fiber lasers for next-generation lasers," UEC / IOP-VAST Workshop on Optical Science, Chofu, March 27, 2014. (invited talk)
 11. A. Shirakawa, "Phase-locked multicore fiber lasers for power and energy scaling," Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2013, paper AF1C.3, Beijing, China, Nov. 15, 2013. (invited talk)
 12. 白川晃:「次世代レーザーを目指したフォトニックバンドギャップ・マルチコアファイバーレーザー」, 電気学会先端光・量子発生利用技術専門委員会第6回委員会, 東京, 2013年7月31日. (招待講演)
 13. A. Shirakawa, "Research and Development of fiber lasers -Photonic bandgap and multicore fiber lasers for next-generation high-power lasers," 3rd UEC Symposium, Shenzhen, China, May 14, 2013. (invited talk)
 14. A. Shirakawa, "Photonic bandgap and multicore fiber lasers for next-generation high-power lasers," 2nd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '13), paper ALPS3-1, Yokohama, Apr. 24, 2013. (invited talk)

[その他]

ホームページ

http://www.ils.uec.ac.jp/~shirakawa_lab/PBGF_laser.html

http://www.ils.uec.ac.jp/~shirakawa_lab/MCF_laser.html

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

(2) 研究分担者

齋藤和也 (Kazuya Saito)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：20278394

齊藤晋聖 (Kunimasa Saitoh)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20333627