

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 1 月 12 日現在

機関番号：12612
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21340113
 研究課題名（和文）Yb 添加フォトニックバンドギャップファイバーによる高効率高出力橙色光源の研究
 研究課題名（英文）Study on high-efficiency, high-power orange light source by Yb-doped photonics bandgap fiber
 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

研究成果の概要（和文）：黄色～橙色域の高出力光源を目指し、フォトニックバンドギャップファイバー(PBGF)による利得スペクトル制御ファイバー光源の研究を行った。Yb ファイバーの高利得帯における増幅自然放出(ASE)を禁制にすることで、従来レーザーでは不可能であった利得スペクトルの長波長裾部でのパワースケーリングを実現し、波長 1178nm でスロープ効率 61%、出力 167W、並びにその第二高調波発生により 589nm で 14.5W のレーザー出力を世界で初めて実証した。また 1178nm における全ファイバー発振器や単一周波数光源開発も行った。ASE だけでなく誘導非線形散乱も抑制できることを示し、PBGF レーザーの大きな可能性を提示した。

研究成果の概要（英文）：We have investigated spectrally-controlled fiber laser sources by photonic bandgap fibers (PBGFs) for yellow-orange high-power light sources. By inhibiting amplified spontaneous emission (ASE) at high-gain wavelengths, power scaling at the long-wavelength wing of the Yb gain band is enabled, that have not been possible in conventional lasers. An 1178 nm laser radiation with a 167 W output power and 61% slope efficiency, as well as a 589 nm laser radiation with a 14.5 W output power by second-harmonics generation have been demonstrated for the first time. An 1178 nm all-fiber fiber oscillator and a single-frequency source have been developed. We have shown PBGFs can suppress not only ASE but stimulated nonlinear scattering, that presents a great potential of the PBGF laser.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2010 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	12,600,000	3,780,000	16,380,000

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：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・分布フィルター・単一偏光・単一周波数・第二高調波発生

1. 研究開始当初の背景

黄色～橙色の波長域の光源は、医療応用や高分解能分光で囑望され、特に大口径望遠鏡の補償光学に用いられるレーザーガイドスター(LGS)には、波長 589nm の回折限界高出力(10W 以上)光源が必要とされる。しかしこ

の波長帯に利得を有する固体材料は皆無に等しく、第二高調波発生(SHG)で 589nm に到る波長 1178nm 帯でも利得材料が乏しい。高ビーム品質、高冷却性、堅牢性等の利点を有するファイバーレーザーをベースとする光源を目指し、1178nm で動作するファイバーラ

マンレーザーやビスマス添加ファイバーレーザーが研究されていた。しかし両者とも別の Yb ファイバーレーザーなどの高輝度光源でコア励起する必要があり、レーザーダイオード(LD)で直接励起できない。更に前者は非線形波長変換であるため線幅が広がりやすく、またエネルギー蓄積がないためパルス光源にできないなど難点が多い。

研究代表者らは、Yb 添加ファイバーの利得スペクトルの裾が 1200nm にまで延びていることに注目し、1178nm 光を Yb ファイバーで発生させる研究を 2003 年以来行ってきた。高反射率共振器により低利得動作させることで増幅自然放出(ASE)および寄生発振限界を向上し、世界で初めて 1178nm 動作 Yb ファイバーレーザーに成功した。無偏光 6.5W, 単一偏光 3W の LD 直接励起全ファイバー 1178nm 光源を実現、SHG により 589nm 光発生も実証した。しかし、指数関数的に増大する ASE を抑止し更なるパワー向上を目指すには、新しいブレークスルーが必要であった。

そこで我々は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に注目し、Yb 添加 PBGF による 1178nm 光発生の研究を開始し、2008 年秋、当時世界最高出力の 30W の 1178nm 光増幅に成功した。本研究課題はこの世界先端の研究を更に深化・発展させるものである。

2. 研究の目的

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、Yb 添加ファイバーの高利得帯の増幅自然放出を禁止し、利得スペクトル長波長端の低利得な 1178nm において高効率動作できる新しい高出力 Yb ファイバー光源を開発し、その第二高調波発生により波長 589nm の高出力橙色光源を実現する。導波路による利得スペクトルの人工制御により、従来困難であった波長域の光の発生制御がどこまでできるか探求し、高出力化の限界を追求する。更に単一周波数光源の開発、PBGF の特性を生かした新しいレーザーの開拓を目的とする。

3. 研究の方法

図 1 に PBGF 断面の概念図を示す。中央コアの周りに多数の高屈折率ロッド(inclusion)が三角格子配列されたクラッド部を持つ。通常のファイバーとは異なりクラッドの実効屈折率がコアよりも高いため全反射伝搬できないが、特定の波長帯でのみフォトニックバンドギャップ(PBG)によるコアモードが形成され低損失伝搬できる。図 2 に有限要素法で計算したバンド構造を示す。状態のない黒部分が PBG で、実効屈折率 n_{eff} がシリカの屈折率 1.45 よりも低い部分にコアモード(PBG 導波モード)が存在しうる。白色部分のフォ

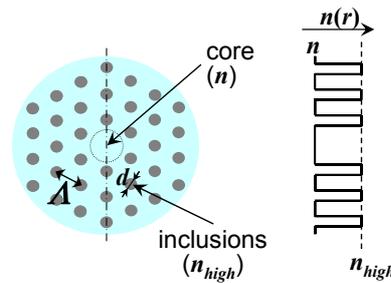


図 1. PBGF の概念図

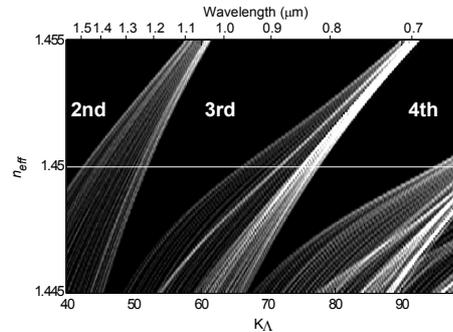


図 2. PBGF のバンド構造。白色の濃度で状態密度を表す。屈折率差 0.035, $d/A=0.77$, $A=10.1\mu\text{m}$ の場合。

トニックバンドではクラッドモードが多数存在するためコアモード伝搬できない。

このバンドパス特性を用いてコアに添加した Yb イオンの利得スペクトル形状を人為的に変えることができ、本研究の場合 1178nm を含む長波長帯が第 3 番目の PBG 内(透過バンド)に、1030-1100nm の高利得帯がフォトニックバンド(遮断バンド)に来るように PBG クラッドを設計し、高利得帯の ASE 成長を遮断し長波長帯での高利得増幅を実現する。利得は波長が短くなるほど急激に増大するため、PBG 端(カットオフ)の損失形状をどこまで急峻にできるかが ASE 抑制・高出力動作のための重要な鍵となる。そのためにロッド・ピッチ比を大きくし、長手方向に構造が均一となり、線引きの際できるだけ捨れないようにする必要がある。

4. 研究成果

(1) 低損失 Yb 添加 PBGF の実現

作製した Yb 添加 PBGF の断面を図 3(a)に示す。高屈折率ロッドに Ge 添加シリカを用い、リング数 8 で PBG クラッドを形成する。屈折率差 0.035, ロッド・ピッチ比 $d/A=0.77$ である。コアの両側に B を添加した低屈折率ロッド(屈折率差-0.006)を配置することで 10^{-4} 程度の複屈折を与えている。エアクラッドによるダブルクラッド構成とし、クラッド直径は $220\mu\text{m}$ である。中心コアの Yb 添加濃度は $0.38 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ であり、976nm 励起光の正味吸収は 1.1dB/m である。

様々なピッチの透過スペクトルを図 4 に示す。コアに希土類イオンを添加すると屈折率

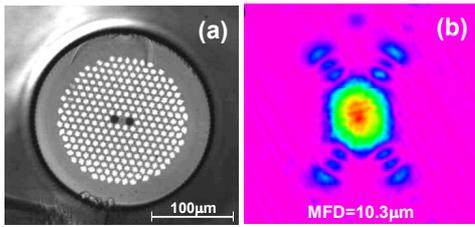


図 3. (a) 作製した Yb 添加 PBGF の断面写真。(b) 1178nm におけるコアモード近視野像。

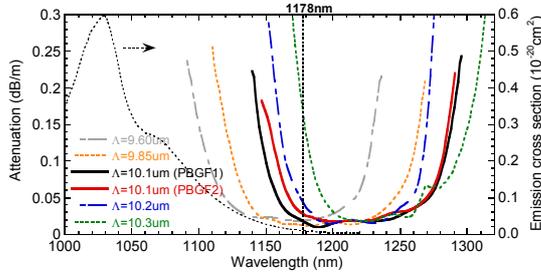


図 4. 様々なピッチの PBGF の損失スペクトル。Yb ファイバーの誘導放出断面面積スペクトルを点線で示す。

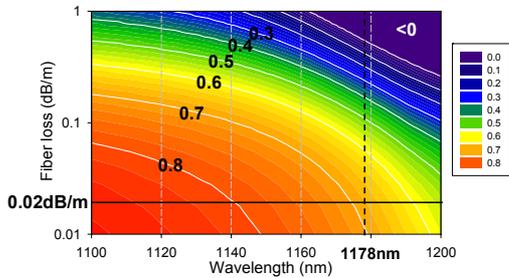


図 5. Yb 添加ファイバー増幅器のパワー変換効率上限。波長と損失の関数として 2 次元プロット。

の変化や不均一性により PBGF 伝搬特性が大きく変化し閉じこめ損失が急激に増大しやすい。本研究では Yb 添加コアの改良により無添加 PBGF と同等の約 0.02dB/m の低損失特性が得られるようになった。

Yb 利得バンドの長波長裾部では誘導放出断面積が小さく利得が非常に低い。Yb 濃度 $N=0.38 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ の場合、単位長さ利得は最大でも $N\sigma_e/2 \sim 0.8 \text{dB/m}$ 程度である (976nm 励起時)。増幅器のレート方程式を数値計算してパワー変換効率の上限を求め、波長と損失の関数としてプロットしたのが図 5 である。今回の 0.02dB/m という超低損失特性により、1178nm で 68%、1200nm でも 50%以上という高い効率が期待できる。

透過バンドの中心波長はピッチに比例する。以下の光源開発では概ね $\lambda=10.1 \mu\text{m}$ の PBGF を用いた。その時のモードフィールド径(MFD)は $10.3 \mu\text{m}$ である (図 3(b))。

(2) 高出力 1178nm ファイバー増幅の実証

開発した Yb 添加 PBGF を用いた 1178nm ファイバー増幅器の実験配置図を図 6 に示す。ファイバーラマンレーザーをシード光源とし、飽和パワー(1.6W)を十分超えるパワー(5W)を注入し飽和増幅を行う。両端はエンド

シールおよび角度研磨し、後方よりファイバー結合 LD でクラッド励起する。ファイバー曲げ径を変えることによりバンドギャップ端の位置を微調整して、1178nm 増幅に最適な利得スペクトルを形成する。図 7 に増幅器の小信号利得スペクトルを示す。このように 1000dB を超える巨大利得が PBGF により完全に消失していることが分かる。飽和利得 15dB、出力 167W を達成し (図 8)、この波長帯での最高出力はもちろん、PBGF レーザー出力の世界記録を更新した (2013 年 1 月現在も超えられていない)。最大パワーは励起パワー (275W) で制限されており、スペクトルに ASE が見られないことから励起パワーの増大により更なる高出力化が可能である。PBGF の実測の損失スロープから寄生発振限界を見積もると、出力 380W (利得 19dB) まで高出力化できると



図 6. 1178nm Yb 添加 PBGF 増幅器

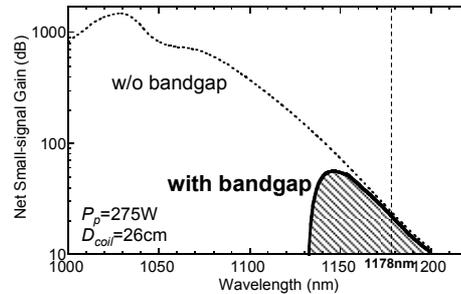


図 7. 増幅器の小信号利得スペクトル。PBG がある時(斜線で満たされた太実線)とない時(点線)を比較。励起パワー 275W、ファイバー曲げ径 26cm

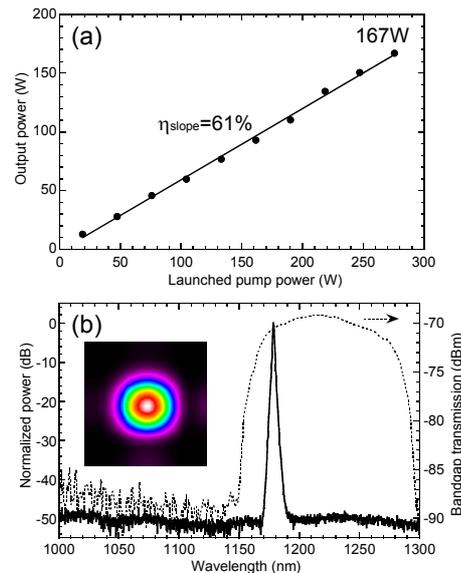


図 8. (a) Yb 添加 PBGF 増幅器の入出力特性 (b) 最大出力 (167W) 時のスペクトル (実線) と 40m 長 Yb 添加 PBGF の白色光透過スペクトル (点線)。図内左は最大出力時の近視野像。シングルモード特性を示す。

期待される。スロープ効率は 61%で、Ge 添加ロッドへの励起光の捕獲損失を考慮すると 69%に達し、図 5 の計算と一致する。通常のファイバーレーザーと同等の高効率特性が得られている。

(3) 高出力 589nm 光源開発

高効率波長変換のためには単一偏光・狭線幅が必要なため、我々が以前に開発した 1178nm 全ファイバー単一偏光 Yb ファイバーレーザーをシード光源とし、上記 Yb 添加 PBGF 増幅器で偏波保持増幅した。線幅は 50pm で変わらず、出力 43W、偏波消光比 17dB を得る。20mm 長の周期分極反転 MgO: stoichiometric LiTaO₃ 結晶によるシングルパス SHG により、589nm で 14.5W、変換効率 34%を得た(図 9)。周期分極反転結晶を用いた緑色以外の SHG では我々の知る限り世界最高出力である。

しかし結晶の発熱によるビーム品質の低下、位相整合温度の不安定性が見られており、更なる高出力化には LBO 結晶などを用いた外部共振器 SHG が必要であろう。

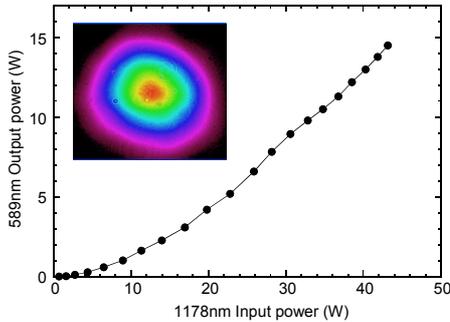


図 9. 589nm 第二高調波光の出力特性と 14.5W 時のビーム形状。

(4) 高出力 1178nm ファイバー発振器の開発

医療応用を目的に 1178nm における発振器を開発した。PBGF 両端にファイバー回折格子(FBG)を融着接続した全ファイバー構成をとる。励起光吸収パワー108W 時に最大パワー53.6W を得た。スロープ効率は 53%である。融着損失を低減できればより高効率な動作が可能と見込んでいる。スペクトル幅は 0.1nm と狭線幅で、ASE も見られない。パワー上限はファイバー端面の破壊で制限されており、冷却の一層の工夫が必要である。励起側の FBG をなくし PBGF 端面の Fresnel 反射を用いた共振器構成の場合、最大励起パワーまで破壊せずに動作でき、出力 98W、スロープ効率 52%を得ている。

(6) 単一周波数光源の開発

レーザーガイドスター等の応用には単一周波数等の狭線幅光源が必要であり、これまで報告がなく未知と断言している PBGF 中での単一周波数光の振る舞いを明らかにするためにも、1178nm における単一周波数 PBGF 増幅器の研究を行った。実験配置図を図 10

に示す。InAs/GaAs 量子ドット半導体チップを用いて 1178nm 帯外部共振器半導体レーザーを製作し、出力>100mW、線幅 320kHz を得た。前置ファイバーラマン増幅器において、 Brillouin 周波数の異なる利得ラマンファイバーを 2 種類用いることで誘導 Brillouin 散乱(SBS)限界を向上し、4W まで増幅する。最後に PBGF でパワー増幅し、SBS を起こすことなく出力 24.6W が得られた。線幅は増幅前後で 320kHz と変化しなかった(図 11)。

ポンプ・プローブ法で PBGF の Brillouin 利得スペクトル(BGS)を測定した。その結果を図 12 に示す。通常のシングルモード Ge 添加ファイバー(1060XP)と比べると、BGS のピークはシリカに近い高周波数側にシフトしているが、低周波数側に特徴的な小さなピークを持っている。1060XP の Brillouin 周波数に近い。このピーク分裂は PBGF のコアモ

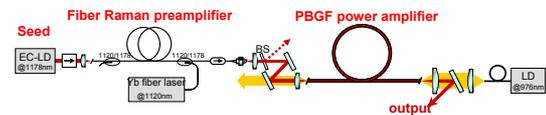


図 10. 1178nm 単一周波数 Yb 添加 PBGF 増幅器

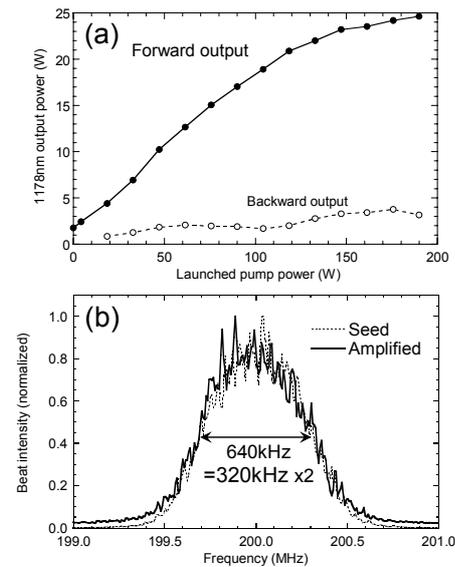


図 11. (a) パワー特性と(b) 遅延自己ヘテロダインスペクトル。点線：前置ラマン増幅器出力、実線：PBGF 増幅器出力(24.6W)。

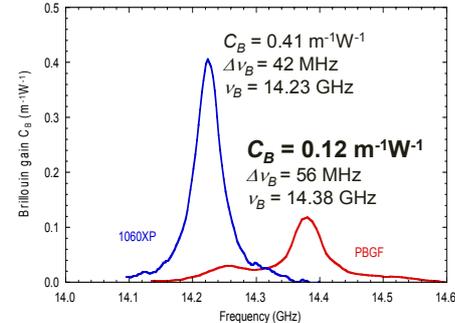


図 12. Brillouin 利得スペクトル。ステップインデックスファイバーとして 1060XP のスペクトルも示す。

ードのアンチ共鳴構造(図 3(b))による。更に音響フォノンが高屈折率ロッドに局在し、電界モード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。ファイバーレーザーは SBS のため狭線幅での高出力化が困難であるが、今回得られた結果は PBGF が狭線幅動作にお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。更なる SBS 抑制へ向け、PBG 構造の最適化の研究を推進してゆく。

(7) PBGF による誘導ラマン散乱(SRS)抑制

PBGF の透過バンドの長波長側カットオフを用いた SRS 抑制の研究を開始した。1080nm 付近に長波長カットオフを有する Yb 添加 PBGF を設計、作製した。自作の波長 1064nm, ピークパワー 1kW, パルス幅 2ns, 繰り返し周波数 20kHz の単一周波数受動 Q スイッチ Nd:YAG レーザーをシード光として PBGF で増幅し, SRS フリーで 19kW まで増幅できた。パワー上限は ASE で制限されており, 実際の SRS 限界はずっと上と見込まれる。既に通常ファイバーの SRS 限界の 3 倍のパワー向上比が得られており, 更なる高ピークパワー増幅, 1178nm 帯パルス光源などに取り組んでゆく予定である。

(8) Yb ファイバーのフォトダークニングのフォトブリーチング

Yb 利得バンドの長波長端で高利得動作する場合, 誘導放出断面積が小さいために必然的に反転分布が大きくなる。利得も小さいため, Yb 添加ファイバーのフォトダークニング(PD)の影響が顕著に現れやすい。ファイバーレーザーの最も重大な問題であるこの PD を, フォトブリーチング(PB)する研究に取り組んだ。波長 407nm の紫色の半導体レーザーをクラッド部に照射することで, 400-2000 秒程度で透過率を 90%以上まで戻すことができた。更に波長 385nm の LED の側面照射により, $0.5\text{W}/\text{cm}^2$ という低強度でも PB ができることを示した。PB は一光子過程であり, 時間をかければ PD をほぼ解消できることを明らかにした。

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 9 件)

1. M. Chen, A. Shirakawa, X. Fan, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "Single-frequency photonic bandgap fiber amplifier at 1178 nm," *Optics Express* **20**, 21044-21052 (2012). 査読有

2. X. Fan, M. Chen, A. Shirakawa, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "High power Yb-doped photonic bandgap fiber oscillator at 1178 nm," *Optics Express* **20**, 14471-14476 (2012). 査読有
3. M. Chen, A. Shirakawa, Y. Yamahara, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "High-power single-frequency photonic bandgap fiber amplifier at 1178 nm," *Proc. SPIE* **8237**, 82371H1-9 (2012). 査読有
4. A. Shirakawa, C. B. Olausson, H. Maruyama, K. Ueda, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "High power ytterbium fiber lasers at extremely long wavelengths by photonic bandgap fiber technology," *Optical Fiber Technology* **16**, 449-457 (2010). 招待論文・査読有
5. C. B. Olausson, A. Shirakawa, M. Chen, J. K. Lyngsø, J. Broeng, K. P. Hansen, A. Bjarklev, K. Ueda, "167 W, power scalable ytterbium-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1178nm," *Optics Express* **18**, 16345-16352 (2010). 査読有
6. 小林哲也, 白川晃, 植田憲一: 「Talbot 共振器によるマルチコアファイバーレーザーの in-phase モード選択励振」, レーザー研究 **38**, 136-140 (2010). 査読有
7. C. B. Olausson, A. Shirakawa, H. Maruyama, K. Ueda, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "Power-scalable long-wavelength Yb-doped photonic bandgap fiber sources," *Proc. SPIE* **7580**, 758013-1-12 (2010). 査読有
8. A. Shirakawa, H. Maruyama, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "High-power Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1150-1200 nm," *Optics Express* **17**, 447-454 (2009). 査読有
9. 白川晃, 植田憲一: 「高出力 Yb 添加ファイバーレーザー研究の最前線と展望」, 光学 **38**, 25-32 (2009). 招待論文・査読有 [学会発表] (計 66 件)
1. A. Shirakawa, "High power fiber lasers by structured fibers," 5th EPS-QED Europhoton Conference 2012, paper ThA.1, Stockholm, Sweden, Aug. 30, 2012. 招待講演
2. A. Shirakawa, M. Chen, Y. Suzuki, X. Fan, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, "High power photonic bandgap fiber sources," The 8th Asia Pacific Laser Symposium (APLS 2012), paper II.2, Huangshan, China, May 28, 2012. 招待講演
3. A. Shirakawa, K. Ueda, "Photonic bandgap and multicore fiber lasers for next-generation lasers," Workshop on Fiber Laser and Solid-state Laser at SIOM, Shanghai, China, March 13, 2012. 招待講演
4. A. Shirakawa, "Frontier of fiber lasers: photonic bandgap and multicore fiber lasers,"

- INDO-JAPAN International Workshop on Specialty Optical Fiber, Nano-Photonics and Devices, Kolkata, India, Jan. 6, 2012. 招待講演
5. 植田憲一, 白川晃, 武者満: 「高出力ファイバーレーザー その歴史と潜在能力」, レーザー学会学術講演会第32回年次大会, 30p101, 仙台, 2012年1月30日. 招待講演
 6. 白川晃: 「フォトリックバンドギャップおよびマルチコアによる新世代ファイバーレーザー」, 第4回文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム, 名古屋, 2011年11月14日. 招待講演
 7. A. Shirakawa, M. Chen, X. Fan, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, “High power photonic bandgap fiber lasers,” 16th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) 2011, paper 5C4_3, Kaohsiung, Taiwan, July 5, 2011. 招待講演
 8. C. B. Olausson, A. Shirakawa, J. K. Lyngsø, K. P. Hansen, J. Broeng, K. Ueda, “All-solid photonic bandgap fiber lasers,” Specialty Optical Fibers (SOF) 2011, paper SOWA3, Toronto, Canada, June 15, 2011. 招待講演
 9. A. Shirakawa, K. Ueda, “Frontier and future of high power fiber lasers,” JSPS Asian CORE Workshop on Next Generation Ultra-Short Pulse Lasers for High Field and Ultrafast Science, Wako-RIKEN, Japan, Mar.2-4, 2011. 招待講演
 10. A. Shirakawa, M. Chen, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, “High power ytterbium fiber lasers at extremely long wavelengths by photonic bandgap fiber technology,” IEEE Winter Topical Meeting (WTM) 2011, paper TuD2.1, Keystone, Colorado, USA, Jan.10-12, 2011. 招待講演
 11. A. Shirakawa, “New generation fiber lasers by photonic bandgap and multicore fibers,” PMRC Colloquium, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, Japan, Sept. 17, 2010. 招待講演
 12. K. Ueda, A. Shirakawa, C. B. Olausson, “167 W ASE-free and power scalable Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1178 nm,” 7th Asia-Pacific Laser Symposium, Cheju, Korea, May 11-15, 2010. 招待講演
 13. 白川晃: 「新しいファイバーレーザー: フォトリックバンドギャップファイバーレーザー」, 学振130委員会平成22年度第1回研究会, 東京理科大学森戸記念館, 2010年5月12日. 招待講演
 14. 白川晃: 「高出力フォトリックバンドギャップファイバー光源」, 第10回レーザー学会東京支部研究会/電気学会光量子デバイス技術研究会, 東海大学湘南キャンパス, 2010年3月3日. 招待講演
 15. A. Shirakawa, “High-power photonic bandgap fiber sources,” US Air Force/AOARD Window-On-Science Seminar, US Air Force Research Laboratory, Albuquerque, USA, Mar. 11, 2010. 招待講演
 16. A. Shirakawa, C. B. Olausson, M. Chen, K. Ueda, J. K. Lyngsø, and J. Broeng, “Power-scalable photonic bandgap fiber sources with 167 W, 1178 nm and 14.5 W, 589 nm radiations,” Advanced Solid-State Photonics 2010, paper APDP6, San Diego, USA, February 1, 2010. (ポストドクトライン)
 17. A. Shirakawa, “Fiber laser research in ILS/UEC ~ focusing on power limit, coherent beam combing, and related topics,” Asian-Core Ultrafast Pulse Seminar at Institute of Physics, Beijing, China, Nov. 4-5, 2009. 招待講演
 18. A. Shirakawa, H. Maruyama, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngsø, J. Broeng, “30W, 1178nm Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier,” CLEO/QELS 2009, paper CThGG3, Baltimore, USA, June 4, 2009. 招待講演
- [図書] (計1件)
1. 白川晃, 「ファイバーレーザー」, 先端固体レーザー (レーザー学会編), p.149-184(総507ページ), オーム社, 東京, 2011年12月. 著書 (分担執筆)
- [その他]
- ホームページ等
http://www.ils.uec.ac.jp/~shirakawa_lab/
6. 研究組織
 - (1) 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