

Title	光の連続変数による量子情報処理のための三次元導波路の研究
Sub Title	Research on 3D waveguide for quantum information processing using continuous variable of light
Author	廣澤, 賢一 (Hirosawa, Kenichi)
Publisher	
Publication year	2016
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2015.)
JaLC DOI	
Abstract	フェムト秒レーザで直接描画する手法により導波路を製作する場合, コアを書き込む手法は加工による屈折率変化の不均一性から低損失化には限界がある。そこで, レーザ照射により負の屈折率変化が起こるガラスを用い, クラッドを書き込むことで, 損失低減を行った。その結果フッ化物ガラスの場合, 加工用レーザのパルス幅やパルスエネルギーによる影響が大きいのことがわかり, パルス幅50fs, パルスエネルギー4μJ時に最も損失が低減されることが分かった。また, この知見から加工パラメータを制御し, 導波路損失やNAを最適化することで導波路レーザの発振に成功した。 When femtosecond-laser-induced refractive index change is used for a waveguide core, waveguide loss is inevitable due to non-uniformity of refractive index change in a waveguide core. Therefore, we used a fluoride glass which causes negative refractive index change by femtosecond laser irradiation. The negative refractive index change is applicable to a waveguide cladding in order to decrease waveguide loss. As a result of our experiments, the refractive index change mainly depended on pulse-width and pulse-energy of processing femtosecond laser, and the lowest waveguide loss was found at 50-fs width and 4μJ pulse energy. We also developed a waveguide laser by optimizing waveguide loss and NA via adjusting processing parameters.
Notes	研究種目：若手研究(B) 研究期間：2014～2015 課題番号：26820132 研究分野：工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_26820132seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820132

研究課題名(和文) 光の連続変数による量子情報処理のための三次元導波路の研究

研究課題名(英文) Research on 3D waveguide for quantum information processing using continuous variable of light

研究代表者

廣澤 賢一 (Hirosawa, Kenichi)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号：50645356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000 円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒レーザーで直接描画する手法により導波路を製作する場合、コアを書き込む手法は加工による屈折率変化の不均一性から低損失化には限界がある。そこで、レーザー照射により負の屈折率変化が起こるガラスを用い、クラッドを書き込むことで、損失低減を行った。その結果フッ化物ガラスの場合、加工用レーザーのパルス幅やパルスエネルギーによる影響が大きいことがわかり、パルス幅50 fs、パルスエネルギー4 μJ時に最も損失が低減されることが分かった。また、この知見から加工パラメータを制御し、導波路損失やNAを最適化することで導波路レーザーの発振に成功した。

研究成果の概要(英文)：When femtosecond-laser-induced refractive index change is used for a waveguide core, waveguide loss is inevitable due to non-uniformity of refractive index change in a waveguide core. Therefore, we used a fluoride glass which causes negative refractive index change by femtosecond laser irradiation. The negative refractive index change is applicable to a waveguide cladding in order to decrease waveguide loss. As a result of our experiments, the refractive index change mainly depended on pulse-width and pulse-energy of processing femtosecond laser, and the lowest waveguide loss was found at 50-fs width and 4 μJ pulse energy. We also developed a waveguide laser by optimizing waveguide loss and NA via adjusting processing parameters.

研究分野：工学

キーワード：電子デバイス 光デバイス 量子エレクトロニクス 量子情報科学 光回路

1. 研究開始当初の背景

現在、自由空間のバルク光学系によって実験されている連続変数による量子情報処理において、導波路光学系を導入することは単に実験系がコンパクトになるだけでなく、基本構成要素をブロック化でき、動作の安定化とスケールアップを容易にするというメリットがある。多数の光路を正確に導波路内で干渉させられる高精度光導波路の開発は、単一光子系のみならず連続変数系の量子情報処理においても不可欠な開発項目である。しかしながら、そのような高精度光導波路作成技術は決して活発な研究活動を見せていない。

一方、ガラスなどの透明媒質にフェムト秒レーザの多光子吸収を用いて加工を行い、屈折率変化を起こして導波路を形成する技術が近年注目を集めている。この技術はフォトリソグラフィのような従来の手法と比べて、3次元的な加工が可能で、3つ以上の導波路を結合させる多ポートのカップラや導波路の立体交差を実現できる。こうした性質は多数の光路を正確に干渉させる必要のある量子情報処理分野においてきわめて重要である。

2. 研究の目的

本研究では、連続変数による量子情報処理を、光導波路によるコンパクトな光学系で実現することをめざし、フェムト秒レーザ直描による低損失、低複屈折の導波路作成を目的とした。そのため、導波路の損失が最小になるような加工パラメータの最適化を行った。また、製作した低損失導波路を用いて、導波路レーザ光源の開発を行った。最後にさらなる低損失の導波路製作のために、高繰り返しファイバレーザを製作した。

3. 研究の方法

(1) ダブルトラック導波路の加工条件最適化

超短パルスレーザによる材料内部の局所的な屈折率変化は、ガラスの種類によって正の屈折率変化をするものと負の屈折率変化をするものが存在する。加工により正の屈折率変化が発生する場合は加工部位をコアとして使用するが、コア部分の不均一な改質は導波路損失の原因となる。そこで、低繰り返しレーザにより負の屈折率変化を発生するガラスとして、ZBLAN ガラスを採用した。負の屈折率変化により低損失導波路を作成するためには図1のようなダブルトラック導波路という構造が知られている。

そこで、ZBLAN ガラスにダブルトラック導波路を製作する場合の加工条件の導波路 NA (Numerical Aperture) と伝送損失に対する影響を調査した。加工に使用したレーザは、再生増幅器によって増幅されたモード同期チタンサファイアレーザ(中心波長 800 nm, パルス幅 50 fs, 繰り返し周波数 1 kHz)である。入射パルスは対物レンズ(NA = 0.45)によって材料表面から深さ 300 μm の位置に集光させ

た。さらに、入射パルスに二次分散を付加することで、パルス幅を変化させた。ZBLAN ガラスは三軸の電動ステージに乗せており、ステージを動かして材料を走査することで、図1に示したような2本のレーストラック状のクラッドを作製した。この2本のトラックに挟まれた領域が導波路のコアとして機能する。このコア部の NA と導波路損失を測定することで、加工パラメータとの関連を調査した。

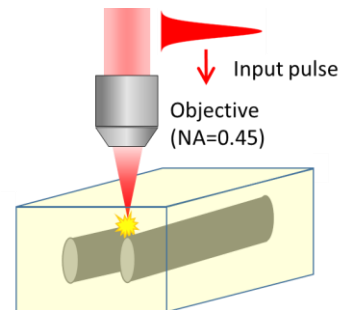


図1: ダブルトラック導波路

(2) Nd:YLF 導波路レーザ発振実験

レーザ光源は目的とする情報処理ブロックの基本構成要素であるため、低損失導波路の応用として、導波路レーザの発振を実証した。レーザ媒質には Nd:YLF 結晶を用いた。Nd:YLF 結晶は ZBLAN ガラスと同様、低繰り返し回の超短パルスレーザによる加工で負の屈折率変化を発生し、高い誘導放出断面積を持つことから導波路レーザに適している。ただし、(1)で使用したチタンサファイアレーザは Nd:YLF 結晶に線形吸収されてしまうため、Type I BBO 結晶を用いて発生させた中心波長 400 nm のパルスを加工に使用した。本研究では、クラッド部分をシート加工することでクラッドの厚みを大きくし、コア部の正の屈折率変化量を大きくすることで、導波路 NA の向上を試みた。0.5 μm 間隔でずらしながら導波路に沿った方向に何度も往復させることでクラッドを厚くした。

(3) 繰り返し周波数可変 Yb ファイバ発振器及び増幅器の製作

超短パルスレーザによる屈折率変化では、パルスの繰り返し周波数によって、およそ 100 kHz を境に、加工のメカニズムが2種類存在する。低繰り返し領域では、パルス間隔が十分長く、前パルスによって発生した媒質中の熱との相互作用を無視できるのに対し、高繰り返し領域では、集光点付近に熱蓄積を誘起出来、それによって、よりスムーズかつ対称な加工プロファイルを実現し、屈折率変化も大きくすることが可能である。そのため、繰り返し周波数可変 Yb ファイバ CPA システムを開発した。図2に Yb ファイバレーザ CPA システムの構成を示す。構成要素は、モード同期ファイバ発振器、パルス伸張器、パルスピッカ、プリアンプ、主増幅器、及びパ

ルス圧縮器である。

発振器のモード同期動作は、非線形偏波回転を使用した。この手法では共振器内に分散補償機構が不要である。利得媒質は Yb ドープファイバで、励起源には出力 600 mW のシングルモードファイバ結合型半導体レーザ（波長 976 nm）の半分を用いた。残りは初段プリアンプの励起光に用いた。

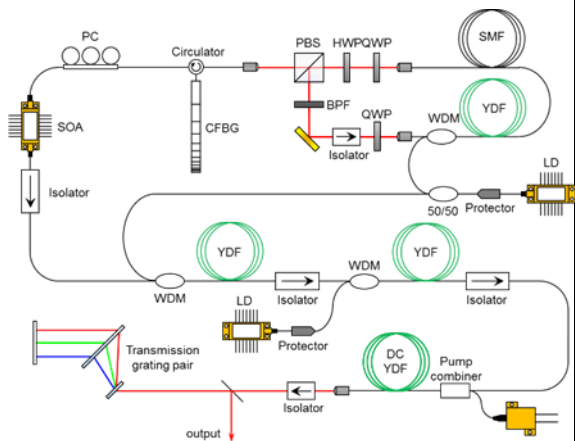


図 2: Yb ファイバレーザ CPA システムの構成

偏光ビームスプリッタから取り出された出力は CFBG (Chirped Fiber Bragg Grating) によって ~ 1 ns まで伸長した。用いた CFBG の二次分散量は -55.72 ps/nm であった。

パルスピッカには、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) を使用した。SOA は電流を注入する間のみ増幅器として機能し、他の時間は吸収体として働くため消光比の高いパルスピッカとして用いることが出来る。一般的にパルスピッカには電気光変調器 (Electro-optic modulator, EOM) が用いられるのが一般的であるが、SOA は EOM と異なり、高電圧電源を必要としない利点がある。図 3 にパルスピッカの構成を示す。発振器の出力の一部をフォトダイオードで受光し、それをトリガー信号として分周した信号をファンクションジェネレータより発生させた。その信号でパルスドライバの駆動電流を変調することでパルスピックを達成した。変調信号のタイミング同期はファンクションジェネレータの遅延時間を調整することで可能である。

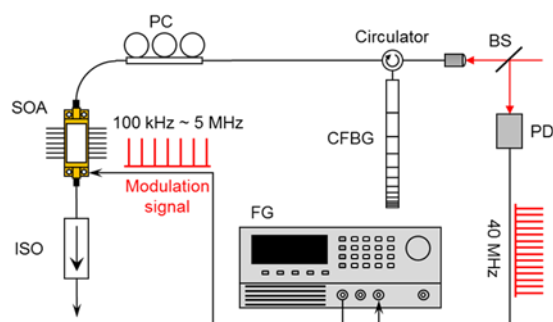


図 3: SOA ベースパルスピッカの構成

SOA により繰り返し周波数を 40 MHz から 100 kHz $\sim$ 10 MHz に落としたパルスは Yb ファイバで増幅後、ダブルクラッドの Yb ドープフォトニック結晶ファイバ (Photonic Crystal Fiber, PCF) で増幅し、最終的な出力を得た。

4. 研究成果

(1) ダブルトラック導波路の加工条件最適化

加工条件最適化のためパルスエネルギー、トラック間隔、レーザの走査速度、パルス幅に注目しその影響を調査した。

図 4 にトラック間隔 15 μ m、走査速度 500 μ m/s、パルス幅 50 fs のときの損失のパルスエネルギー依存性を示す。導波路損失はパルスエネルギーが大きくなるに従って大きくなった。これはパルスエネルギーの増大に伴って発生する衝撃波が大きくなり、その結果導波路のコアの部分の正の屈折率変化が大きくなっているものと考えられる。一方でパルスエネルギーが大きくなるとフィラメンテーションの影響が大きくなり、加工領域がいびつになるため、導波路損失は悪化すると考えられる。

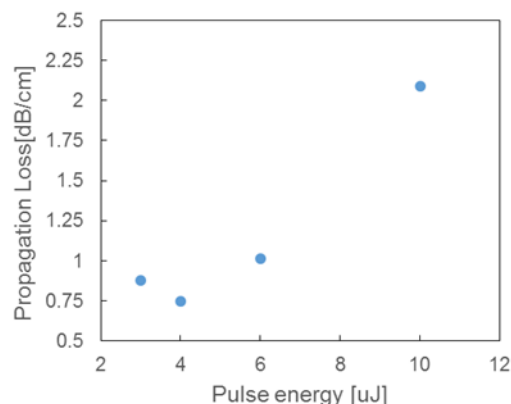


図 4: 損失の書き込みパルスエネルギーによる変化

次に、パルスエネルギーを図 4 で最小の導波路損失となった 4 μ J に設定したときの、トラック間隔と導波路損失の関係を図 5 に示す。その他のパラメータは図 4 と同じく、走査速度 500 μ m/s、パルス幅 50 fs である。トラック間隔が広いもののほうが低損失となることがわかった。

走査速度に関しても同様にパルスエネルギー 4 μ J、トラック間隔 15 μ m、パルス幅 50 fs とし、走査速度と導波路損失の関係を調査した。結果を図 6 に示す。500 μ m/s をピークに走査速度を速くしても遅くしても導波路損失は大きくなっていることがわかる。速度が速すぎた場合には加工領域の重なりが悪く、クラッド領域がなめらかではなくなってしまう。速度が遅い場合はすでに加工された領域にレーザパルスが照射されたことで集光状態に変化が生じ、加工領域が広がってしまうとともにクラッドがいびつな形状になってしまっていた。これらの要因で損失が大き

くなっているものと考えられる。

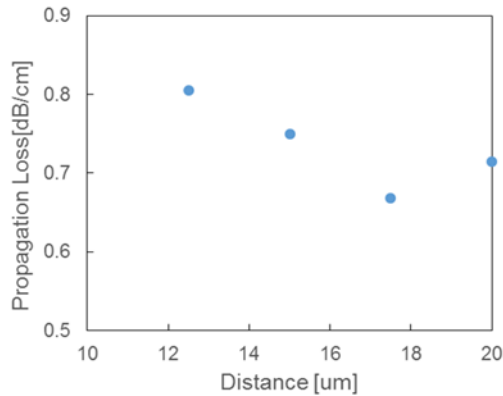


図 5: 損失のトラック間隔による変化

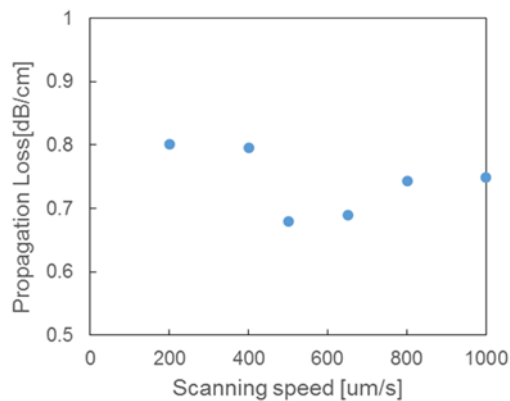


図 6: 損失の走査速度による変化

最後にパルスエネルギー $4\ \mu\text{J}$ 、トラック間隔 $15\ \mu\text{m}$ 、走査速度 $500\ \mu\text{m/s}$ のときのパルス幅に対する導波路損失の関係を図 7 に示す。パルス幅を長くしたとき伝送損失は増大した。ロングパルスによる加工の形状はフェムト秒領域のパルスと比べて加工痕がいびつになり、加工範囲も広がることがわかった。これは、パルス滞在時間が長くなり、エネルギーの吸収量が増えたことで、発生する熱や衝撃波の影響がパルス照射範囲の周囲にまで及んだことが原因と考えられる。この加工のいびつさは導波路内での光の散乱を引き起すため、ロングパルスによって作製された導波路は伝送損失が大きくなっているのだと考えられる。

(2) Nd:YLF 導波路レーザー発振実験

導波路の加工条件として、以下の条件を設定した。パルスエネルギー $4\ \mu\text{J}$ 、パルス幅 $120\ \text{fs}$ 、トラック間隔 $15\ \mu\text{m}$ 、走査速度は $500\ \mu\text{m/s}$ 、クラッド幅 $1.5\ \mu\text{m}$ (WG11)と $4\ \mu\text{m}$ (WG12)の2種類の導波路を作製し、クラッド幅の導波路特性および発振特性に対する影響を調査した。この2種類の導波路の顕微鏡画像を図 8 に示す。導波路 NA および損失はそれぞれ、WG11 が NA 0.023, 損失 1.13 dB/cm, WG12

が導波路 NA 0.027, 損失 1.17 dB/cm となった。

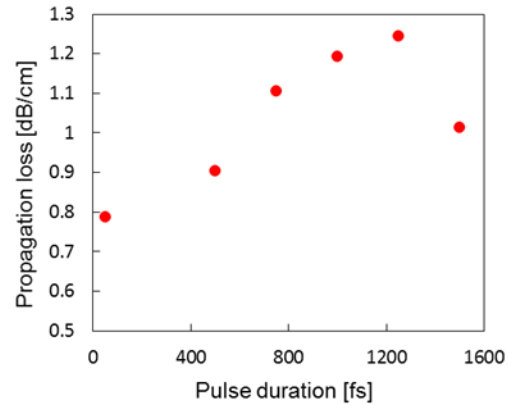


図 7: 損失のパルス幅による変化

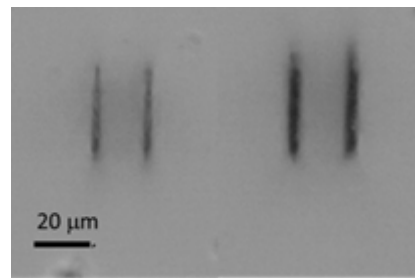


図 8: WG11 と WG12 の顕微鏡画像

導波路レーザーは $808\ \text{nm}$ の励起光を透過し、 $1047\ \text{nm}$ を全反射するミラーを結晶に近接配置し、反対側の端面のフレネル反射により、共振器を形成した。入射光強度と出力の関係を図 9 に示す。WG11 では発振閾値 $70\ \text{mW}$ 、スロープ効率 8% で WG12 では発振閾値 $40\ \text{mW}$ 、スロープ効率 9% となり、発振閾値、スロープ効率ともにクラッドを厚くした場合のほうが良い結果が得られた。発振したレーザー光のビーム品質は、 M^2 値で 1.06×1.9 となり、高いビーム品質が実現できた。

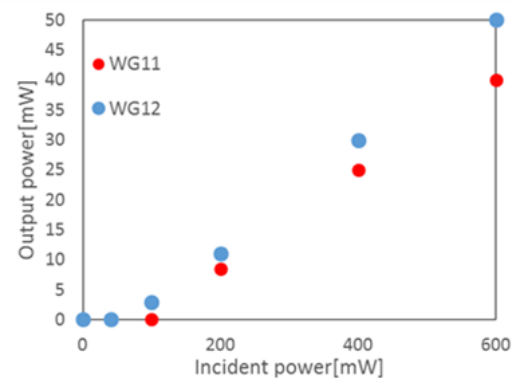


図 9: WG11 と WG12 の出力特性

(3) 繰り返し周波数可変 Yb ファイバ発振器及び増幅器の製作

図 10 に今回使用した SOA の増幅率と繰り返し周波数の関係を示す。SOA に流した電流のパルス幅は $1\ \text{ns}$ で一定のため、本来すべて

の繰り返し周波数において等しい増幅率が得られるはずだが、繰り返し周波数を高くすると増幅特性の劣化が確認された。これは、繰り返しを高くすることによって SOA の温度が上昇したことが要因と考えられる。1 MHz 以上では再び利得が上昇しているように見えるが、これは ASE が顕著に発生しているためである。図 11 に SOA 後のスペクトラムを示す。

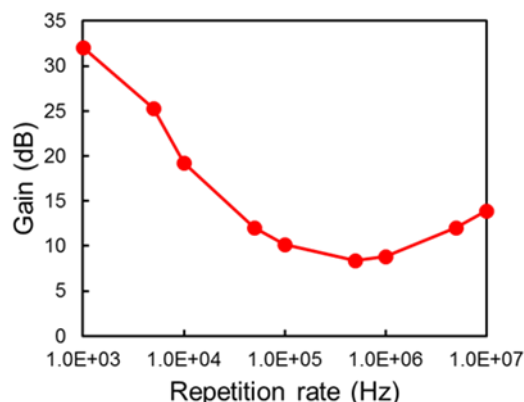


図 10: SOA ゲインの繰り返し周波数依存性

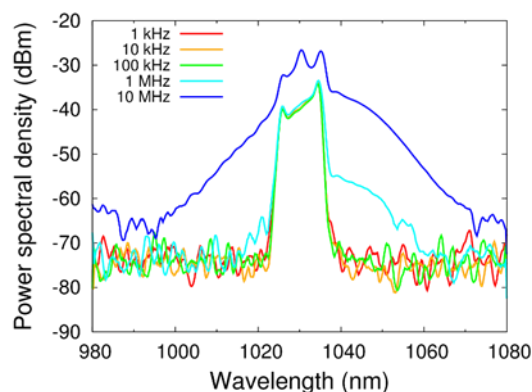


図 11: SOA 後のスペクトラム

SOA 後の Yb ドープファイバによる増幅を行った。PCF 前のスペクトラムを図 12 に示す。このスペクトル形状から、1 MHz 以下であればノイズレベルは 20 dB 以上であると読み取れる。PCF の入出力特性は図 13 のようになった。最大入力時に 4.9 W の平均出力が得られた。また、繰り返し周波数 100 kHz~1 MHz において、4.7 W 以上の出力が得られることを確認できた。今後はこのレーザを用いて導波路加工を実施し、さらなる低損失導波路を実現する。

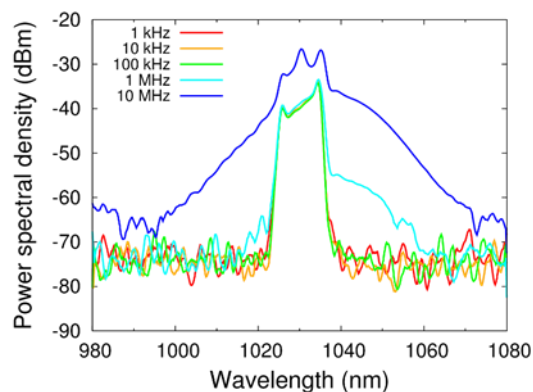


図 12: 増幅パルスのスペクトラム

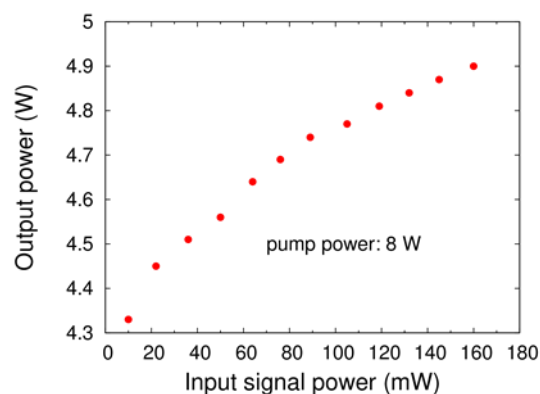


図 13: PCF の入出力特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- (1) 廣澤賢一, 正田文生, 柳澤隆行, 神成文彦, “タルボット共振器を用いた導波路レーザアレイの位相同期,” レーザ研究 査読有, Vol. 44, ページ未定 (2016)

〔学会発表〕(計 11 件)

- (1) Kenichi Hirose, Fumio Shohda, Takayuki Yanagisawa, and Fumihiko Kannari, “All-waveguide Talbot Cavity Laser and Intra-Talbot-cavity Second Harmonic Generation,” The 5th Advanced Lasers and Photon Sources, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), May 17-20 (2016).
- (2) 佐藤琢磨, 山中雄介, 廣澤賢一, 神成文彦, “フェムト秒 Ti:Sapphire レーザの第二高調波描画による Nd:YLF レーザ,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東工大 大岡山キャンパス(東京都目黒区), 2016 年 3 月 19 日-22 日
- (3) 廣澤賢一, 正田文生, 柳澤隆行, 神成文彦, “全導波路型 Talbot 共振器内第 2 高調波発生によるレーザアレイの同位相化,” 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 東工大 大岡山キャンパス(東京都目黒区), 2016 年 3 月 19 日-22 日
- (4) 田中裕樹, 廣澤賢一, 三浦泰祐, 神成文彦, “透明媒質中の導波路加工に向けた繰

り返し周波数可変 Yb ファイバレーザ
CPA システム,”レーザー学会学術講演会
第 36 回年次大会, 名城大学天白キャンパ
ス(愛知県名古屋市), 2016 年 1 月 9 日-11
日

- (5) Takuma Sato, Yusuke Yamanaka, Kenichi Hirosawa, and Fumihiko Kannari, “Nd:YLF Waveguide Laser Fabricated by Second-Harmonic Femtosecond Laser Pulses,” The 11th Conference on Lasers and and Electro-Optics Pacific Rim, Busan (Korea), August 24-28 (2015).
- (6) Aruto Hosaka, Kenichi Hirosawa, Ryota Sawada, and Fumihiko Kannari, “Photon-Number Squeezed Pulse Generation with Symmetric Mach-Zehnder Interferometer,” The 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & the European Quantum Electronics Conference, Munich (Germany), June 21-25 (2015).
- (7) Kenichi Hirosawa, Fumio Shohda, Takayuki Yanagisawa, and Fumihiko Kannari, “Characteristics on Phase Synchronization of Second Harmonic Wave Array from Intra Talbot Cavity Frequency Doubling,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), April 22-25 (2015).
- (8) Yusuke Yamanaka, Kenichi Hirosawa, Takuma Sato, and Fumihiko Kannari, “Direct Writing of Laser Waveguides in Pr:ZBLAN Glass using Ultrafast Laser Pulses,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), April 22-25 (2015).
- (9) Aruto Hosaka, Kenichi Hirosawa, Ryota Sawada, and Fumihiko Kannari, “Photon-Number Squeezed Pulse Generation with a Symmetric Fiber Interferometer,” The 4th Advanced Lasers and Photon Sources, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), April 22-25 (2015).
- (10) Yusuke Yamanaka, Kenichi Hirosawa, Hiroki Tanaka, and Fumihiko Kannari, “Femtosecond Laser Direct Written Visible Waveguide Lasers in Pr³⁺ doped ZBLAN Glass Using Simultaneous Spatial and Temporal Focusing,” くにびきメッセ(島根県松江市), September 29-October 3 (2014).
- (11) Yusuke Yamanaka, Kenichi Hirosawa, and Fumihiko Kannari, “Simultaneous Spatial and Temporal Focusing of Focusing of Femtosecond Laser Pulses for Directly Writing Optical Waveguides in Pr³⁺ Doped ZBLAN Glass,” 19th International Conference on Ultrafast Phenomena, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市), July 7-11 (2014).

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.kami.elec.keio.ac.jp/report.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

廣澤 賢一 (HIROSAWA Kenichi)
慶應義塾大学・理工学部・助教(当時)
研究者番号 : 50645356