

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656055

研究課題名(和文) レーザ直描テラモードクラッド形状を有した導波路型可視域レーザー

研究課題名(英文) Waveguide visible lasers with tailored clad shapes directly drawn by femtosecond laser pulses

研究代表者

神成 文彦 (Fumihiko, Kannari)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40204804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：フェムト秒レーザーの多光子吸収により透明バルク材料内部に屈折率変化を誘起し光導波路コアとする場合、屈折率変化の不均一性から伝播ロスが無視できず導波路レーザーには適さない。フッ化ガラスはレーザー照射条件によっては負の屈折率変化が起きることから、クラッドをレーザー直描することが可能である。書き込みには時空間レンズ光学系を用いることで深さ方向の空間分解特性を著しく改善し、Pr:ZBLANガラスへの導波路書き込みを行い導波路特性を調べた。HeNeレーザーで計測した導波路損失は0.56dB/mであり明確な導波路伝播が実現できた。ただし、誘起屈折率変化は予想よりも低く現状の導波路NAは0.015であった。

研究成果の概要(英文)：When persistent refractive index change induced in the inside of transparent bulk materials by multi-photon absorption at intense femtosecond laser irradiation is used for a waveguide core, non-uniform refractive index change causes propagation loss and thus this scheme is not applicable for efficient waveguide laser fabrication. Since fluoride glasses exhibit negative refractive index change at femtosecond laser irradiation, we proposed direct clad drawing with femtosecond laser pulses. A novel simultaneous spatial and temporal focusing (SSTF) scheme was employed to confine laser excitation into smaller volumes especially along the depth direction. Clad drawn waveguides fabricated in Pr:ZBLAN glass successfully worked as a laser waveguide with a transmission loss of 0.58dB/m at 633 nm. However, since the refractive index change was smaller than we expected, the present waveguide NA was limited to 0.015.

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：レーザー描画導波路 導波路レーザー 可視域レーザー フェムト秒レーザー加工 時空間集光

### 1. 研究開始当初の背景

可視域のレーザーは物質との相互作用性に優れ、レーザー顕微鏡やレーザー加工技術などへの幅広い応用が期待される。Pr<sup>3+</sup>イオンをドープした固体材料は、可視域に多数の光学遷移をもち、InGaN青色LDあるいは光励起半導体レーザーの2倍波で励起することによって、レーザー動作を実現している。中でもフッ化ガラスを母材としたファイバレーザー媒質は、広い吸収スペクトルと利得スペクトルを示し、半導体レーザー励起可視超短パルスレーザーとしての資質を有するがまだ実現されていない。フッ化ガラスは機械強度がないのでファイバ形状に代わる導波路レーザーの実現性を探査することは高い意義を有する。

一方、透明材料中にフェムト秒レーザーを照射することで、多光子吸収過程を経て屈折率変化が引き起される。ZBLAN フッ化ガラスについても同様で、本研究で用いる低繰り返し周波数(~1 kHz)のレーザー照射によって負の屈折率変化が起きることが報告されている。フェムト秒レーザー直描によるレーザー導波路作製は、簡便さと構造自由度の高さから注目を集め、多くのガラスや結晶母材において希土類イオンのレーザー動作が報告されているものの、そのほとんどが近赤外域での発振である。

### 2. 目的

本研究では、負の屈折率変化をフェムト秒レーザーで誘起しクラッド描画することでレーザー導波路を作製する方式の開発を目的にした。半導体レーザー励起でこの導波路を励起するために導波路特性および励起結合特性を調べレーザー発振の可能性を調べた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 時空間集光方式による深さ方向描画空間分解能の改善

本実験では、Chirped pulse amplification システムによって増幅されたモード同期Ti:Sapphireレーザー(中心波長 805 nm、パルス

幅 50 fs (FWHM), 繰り返し周波数 1 kHz) を用いた。実験セットアップを図1に示す。時空間集光システム(1D-SSTF) は回折格子とレンズからなり、入射パルスに回折格子で角度分散をかけることで長パルス化させ、再び全波長が重なり合う集光点でのみ分散が補償されて超短パルスが再現される。また、回折格子上に集光することで、直後のレンズにおいてビーム全体がコリメートされるのと同時に、各単一波長成分についても同時にコリメートされるため、時空間集光と空間集光が同時に達成されている。集光特性の測定にはローダミンの二光子吸収蛍光を利用した。xyz 三軸電動ステージに乗せたローダミン薄膜を集光点付近で走査させ、その蛍光強度の変化をフォトダイオードと Lock-in amp.によって計測した。

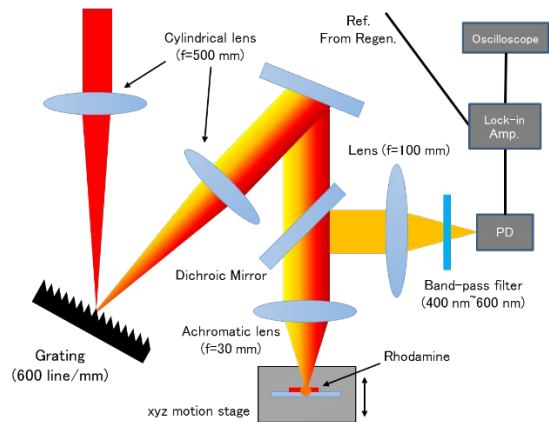


図1 1D-SSTF 光学系と集光特性計測セットアップ

#### (2) 加工サイズ測定

時空間集光によって実際に奥行き方向の加工分解能が向上しているか確認するために、加工サイズの測定実験を行った。

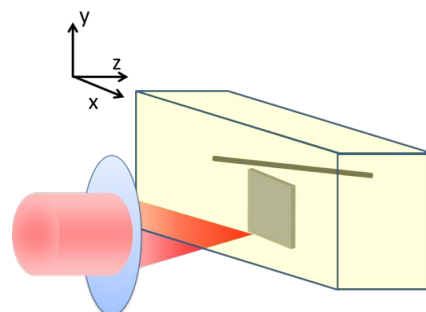


図2 シート状の加工を行う際のセットアップ。

実験は、図2のセットアップでxy平面上に100μm×100μmのシート状の加工を行い、こ

の加工痕を x 軸方向から見ることで z 軸方向の加工サイズの測定を行った。

### (3) 導波路作製実験

Fig.1 のセットアップのローダミン薄膜を Pr:ZBLAN に変更し、導波路作製実験を行った。使用した Pr:ZBLAN は  $6 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$  である。導波路を作製するためのクラッド加工は、Pr:ZBLAN を乗せた電動 3 軸ステージを yz 平面上で円状に動作させ、一周ごとに x 軸方向にずらすことで行った(図 3)。

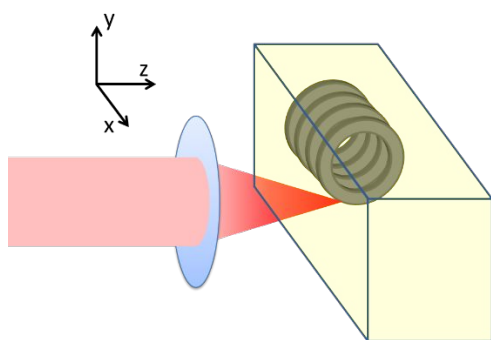


図 3 クラッド描画の際の概念図

このとき、入射パルスのパルスエネルギーは  $0.9 \sim 6.2 \mu\text{J}$ 、円状移動の半径は  $25 \sim 50 \mu\text{m}$ 、x 軸方向のピッチは  $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、ステージ移動速度は  $500 \sim 2000 \text{ um/s}$  の範囲でパラメータを変えて導波路を作製した。導波路長は長辺の方向に  $29 \text{ mm}$  である。導波路特性の測定には He-Ne レーザ( $632\text{nm}$ )を用いた。

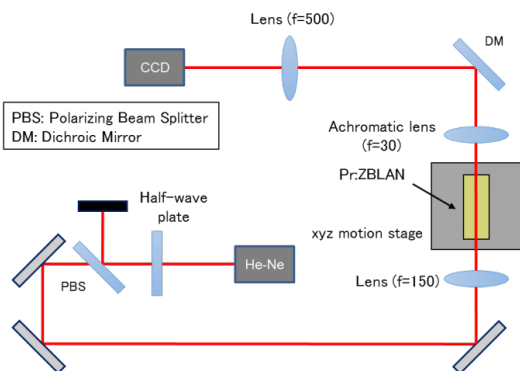


図 4 導波路特性計測の際の光学系。

図 4 に導波路特性調査のセットアップを示す。導波路には  $f=150 \text{ mm}$  のレンズを用いて  $\text{NA}=0.008$  で入射し、導波路終端の像(近視野像)を  $f=30 \text{ mm}$  と  $f=500 \text{ mm}$  のリレーレンズ光学

系によって拡大して CCD で取得した。

## 4 . 研究成果

### (1) 時空間集光方式による深さ方向描画空間分解能の改善

集光特性測定の結果を図 5 に示す。取得した蛍光強度分布を z 軸方向に微分したものが集光特性になる。この結果は、時空間集光を用いたことにより、z 軸方向の加工の分解能が向上したことを示している。

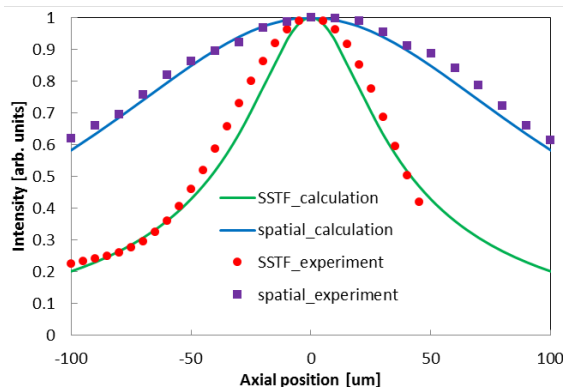


図 5 1D-SSTF と通常の空間集光との深さ方向の集光強度分解能の比較

### (2) 加工サイズ測定

図 6 に観測の結果を示す。これは、加工箇所をリレーレンズによって 20 倍に拡大した像である。黒丸で囲った部分がシート状の加工箇所である。この結果から、y-z 軸方向の加工サイズは約  $8 \times 20 \mu\text{m}$  であることが分かる。我々の目標は球状の加工であるので、z 軸方向の加工サイズをより小さくするために、集光レンズを  $f=50 \text{ mm}$  のものから  $30 \text{ mm}$  のものに変更した。しかし、集光レンズの変更に同様の測定を行った結果、加工痕を観測することができなかった。これは、レンズを変更したことにより、観測ビームがより広げられ、アイリスやレンズがアパーチャーの役目を果たしてしまい、大量の干渉縞が生じたことが原因であると考えられる。

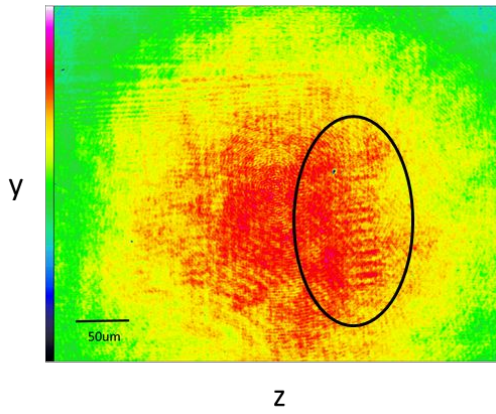


図.6 屈折率変化を誘起した近傍のイメージ.

ただし、レンズ交換前の結果から、z 軸方向の加工サイズは少なくとも 20 μm よりも小さいことは推測できるため、20 μm と見積もって導波路作成実験に移行した。

### (3) 導波路作製実験

図 7 にパルスエネルギー 1.1 μJ、半径 25 μm、ピッチ 10 μm、速度 1000 μm/s で作製した導波路の近視野像を示す。ステージを動かしたことによって移動した集光点の軌道を白色破線で示している。ステージを円状に動かした場合、空気と Pr:ZBLAN の屈折率の差により、集光点の軌道は z 軸方向に約 1.5 倍伸びた形になる。この結果から光導波路として機能していることがわかる。

図.8 に導波路終端から 300 mm 離れた地点での遠視野像を示す。この遠視野像から以下の式を用いて導波路 NA と実効屈折率変化を求めた。

$$NA = \sin\left(\arctan\left(\frac{r}{d}\right)\right)$$

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

$$\Delta n = n_{core} - n_{clad}$$

ただし、 $d$  は導波路終端から観測点までの距離、 $r$  はモードフィールド半径、 $n_{core}$ 、 $n_{clad}$  はそれぞれコアとクラッドの屈折率である。

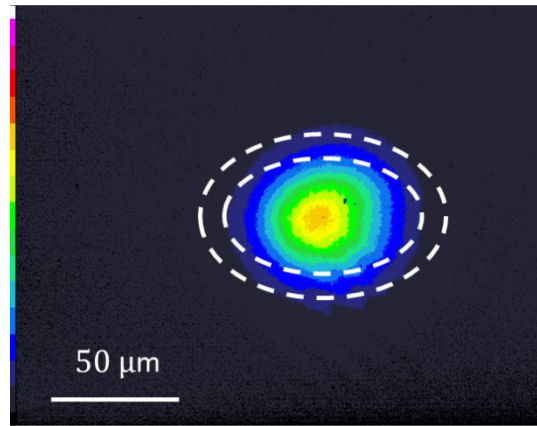


図 7 導波モードの近視野像

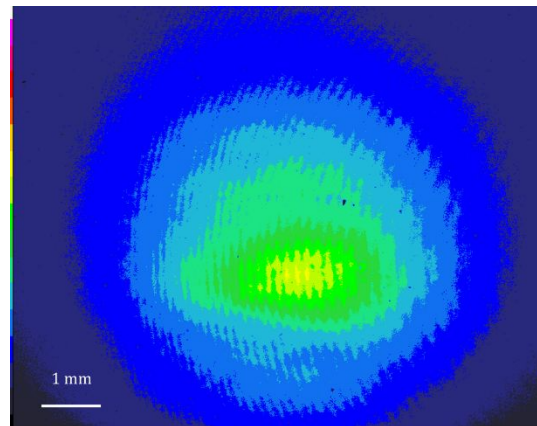


図 8 導波路モードの遠視野像.

この結果、導波路 NA は 0.015、実効屈折率変化は  $7.5 \times 10^{-5}$  であると見積もられた。次に、導波路の伝送損失の測定を行った。導波路の損失には伝送損失以外にも ZBLAN 端面でのフレネル反射やカップリングロスも含まれるため、伝送損失の見積もりは、同じ条件で作製した長さ 29 mm、14.5 mm の二つの導波路の損失を比較することで行った。それぞれ損失は 3.77dB、2.95dB であったため、伝送損失は約 0.56 dB/cm と見積もられた。これらの値を先行研究と比較すると、導波路損失は匹敵する値であるものの、今回の実験では 1/20 程度の屈折率変化しか引き起こせておらず、導波路 NA も 1/3 程度であることがわかる。原因としては、加工条件の最適化が不十分であり、屈折率変化が小さくなったことが考えられる。また、加工方法や導波路形状により実際の屈折率変化よりも低く見積もられている可能性も考えられる。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- (1) Junichiro Kojou, Ryo Abe, Ryouseki Kariyama, Hiroki Tanaka, Akira Sakurai, Yojiro Watanabe, and Fumihiko Kannari, "InGaN diode pumped actively Q-switched intracavity frequency doubling Pr:LiYF<sub>4</sub> 261 nm laser," Appl. Opt. 査読有, Vol.53, pp.2030-2036 (2014).  
<http://dx.doi.org/10.1364/AO.53.003030>
- (2) Ryo Abe, Junichiro Kojou, Kensuke Masuda, and Fumihiko Kannari, "Cr<sup>4+</sup>-doped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> as a saturable absorber for a Q-switched and mode-locked 639-nm P<sup>3+</sup>-doped LiYF<sub>4</sub> laser, Appl. Phys. Express , 査読有, Vol.6, pp.032703-1-3 (2013).  
<http://dx.doi.org/10.7567/APEX.6.032703>
- (3) Kenichi Hirosawa, Seiichi Kittaka, Yu Oishi, Fumihiko Kannari, and Takayuki Yanagisawa, "Phase locking in a Nd:YVO<sub>4</sub> waveguide laser array using Talbot cavity," Opt. Express , 査読有, Vol.21, pp.24952-24961 (2013).  
DOI:10.1364/OE.21.024952

〔学会発表〕(計9件)

- (1) Y. Yamanaka, K. Hirosawa, and F. Kannari, "Direct writing of waveguides in Pr:ZBLAN glass with femtosecond laser pulses," The 3<sup>rd</sup> Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS' 14), Yokohama, April 22-24 (2014).
- (2) K. Hirosawa, F. Kannari, and T. Yanagisawa, "Characteristics of a Talbot cavity for coherent combination of a laser-diode-array-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> waveguide laser array," The 3<sup>rd</sup> Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS' 14), Yokohama, April 22-24 (2014).
- (3) Qiyuan Song, Aoi nakamura, Atsuo Isouchi, Kenichi Hirosawa, Keisuke Isobe, Katsumi Midorikawa, and Fumihiko Kannari, "Using two-dimensional spatial and temporal focusing microscopy to increase the imaging depth and decrease the photobleaching probability," Biomedical Optics Topical Meeting, Miami, April 26-30 (2014).
- (4) Hiroki Tanaka, Ryouseki Kariyama, Junichiro Kojou, and Fumihiko Kannari, "Intracavity second harmonic generation of passively Q-switch modelocked Pr<sup>3+</sup>-doped fluoride lasers using Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal as a saturable absorber," Conference on Lasers and

Electro-Optics (CLEO) 2014, San Jose, USA, June 8-13 (2014).

- (5) Ryo Abe, Junichiro Kojou, Kensuke Masuda, Kenichi Hirosawa, and Fumihiko Kannari, "Q-switched and mode-locked 639-nm Pr:YLF laser with Cr:YAG saturable absorber," the CLEO/Europe-IQEC Conference, Munich, May 12-16 (2013).
- (6) Qiyuan Song, Aoi Nakamura, Kenichi Hirosawa, and Fumihiko Kannari, "Two-dimensional focusing of femtosecond pulses," The 4<sup>th</sup> Shanghai-Tokyo Advanced Research Symposium on Ultrafast Intense Laser Science, Shanghai, May 8-10 (2013).
- (7) Ryo Abe, Junichiro Kojou, Kensuke Masuda, and Fumihiko Kannari, "Cr:YAG as a saturable absorber for Q-switched and mode-locked 639-nm Pr:YLF laser," the 2<sup>nd</sup> Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'13), Yokohama, April 24-25 (2013).
- (8) Junichiro Kojou, Ryo Abe, Akira Sakurai, and Fumihiko Kannari, "Intracavity second-harmonic generation at 261 nm of an actively Q-switched Pr:LiYF<sub>4</sub> laser," the 2<sup>nd</sup> Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'13), Yokohama, April 24-25 (2013).
- (9) Qiyuan Song, Aoi Nakamura, Kenichi Hirosawa, and Fumihiko Kannari, "Two-dimensional simultaneous spatial and temporal focusing of femtosecond pulses," OSA congress on Optics in the Life Sciences, Hawaii, April 14-18 (2013).

〔その他〕

ホームページ

<http://ekammac0.kami.elec.keio.ac.jp/report.html>

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

神成文彦 (KANNARI, Fumihiko)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40204804