

# フェムト秒レーザー直描による Pr<sup>3+</sup>:ZBLAN 内部へのレーザー導波路作製 Pr<sup>3+</sup>:ZBLAN waveguide fabricated by femtosecond-laser writing toward a visible waveguide laser

山中 雄介 (B4), 廣澤 賢一 (助教)

Yusuke Yamanaka, and Kenichi Hirose

## Abstract

We report optical waveguides fabricated in Pr<sup>3+</sup>:ZBLAN bulk glass using simultaneous spatial and temporal focusing of femtosecond laser pulses. The fabricated waveguide shows an NA of ~0.015 and a propagation loss of 0.56 dB/cm.

## 1. はじめに

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系青色LDあるいは2 $\omega$ -OPSLで励起することによって、LiYF<sub>4</sub>結晶[1]やフッ化物ファイバ[2]などで可視域でのレーザー動作が報告されている。

Pr:ZBLANファイバは長さ4cm程度で動作するので、バルク材料内にコンパクトな導波路を形成して動作させることが可能になる。本研究では、Pr:ZBLANガラス内部へのフェムト秒レーザー照射によるレーザー導波路作製を行った。一般に、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こされる。ZBLANガラスについても同様に、本研究で用いる低繰り返し周波数(~10kHz)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[3]。

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ていて、あらゆるガラスや結晶において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。

今回我々は、負の屈折率変化をクラッド描画に利用して導波路を作製した。また、その際に時空間集光システムを用いることで、奥行き方向の高い空間制御性を実現した。

## 2. 集光特性測定実験

本実験では、CPA(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( $\lambda = 805 \text{ nm}$ ,  $\tau = 50 \text{ fs}$ (FWHM),  $f = 1 \text{ kHz}$ )を用いた。実験セットアップをFig.1に示す。時空間集光システム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与え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、各単一波長成分に関しても同時にコリメートされるため、時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。

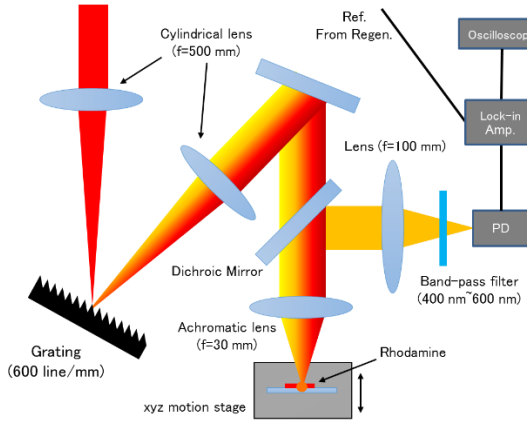


Fig. 1 Measurement setup of focusing property

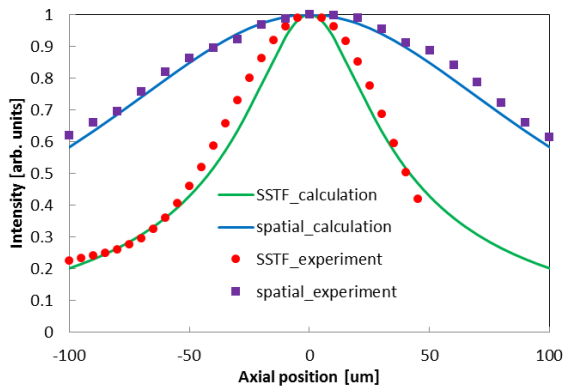


Fig. 2 Depth confinement properties of 1D-SSTF and conventional spatial focusing.

集光特性測定の結果を Fig. 2 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。焦点距離の短い対物レンズを用いると通常の空間集光でも深さ分解のは向上するが、バルクガラス材料の内部に導波路を書き込む動作距離の確保はできない。

### 3. 加工サイズ測定実験

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。実験は、Fig. 3 のセットアップで  $xy$  平面上に  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  のシート状の加工を行い (Fig.4 参照), 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

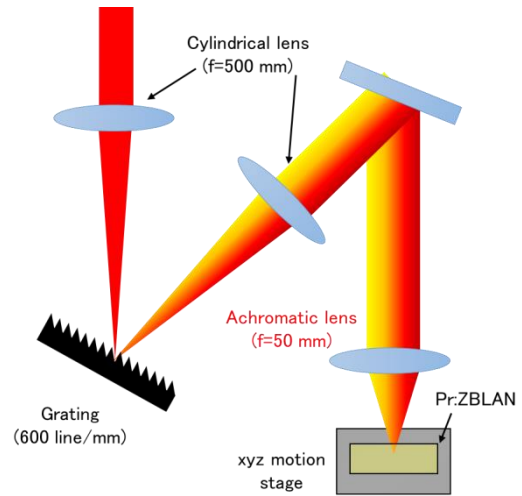


Fig. 3 Processing setup

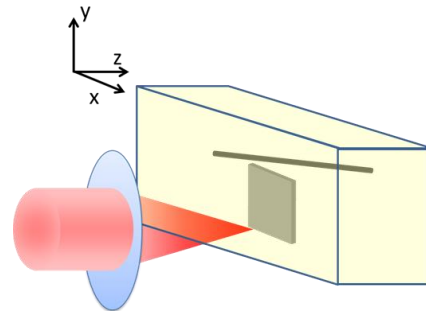


Fig. 4 Fabrication scheme of sheet-like structure

った。

Fig.5 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、 $y \times z$  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、集光レンズの変更後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、

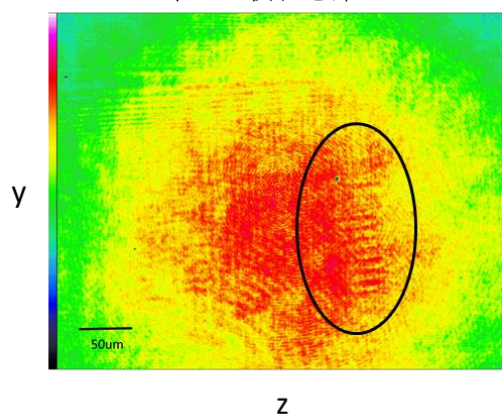


Fig. 5 Intensity distribution around the modified area

大量の干渉縞が生じたことが原因であると考えられる。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  $20 \mu\text{m}$  よりも小さいことは推測できるため、 $20 \mu\text{m}$  と見積もって導波路作成実験に移行した。

#### 4. 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

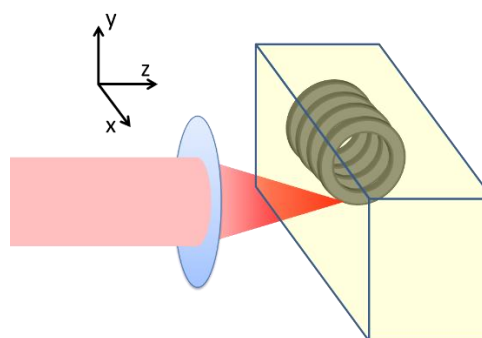


Fig. 6 Fabrication scheme for waveguide

(Fig.6 参照)。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。Fig.7 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。

Fig.8 にパルスエネルギー  $1.1 \mu\text{J}$ 、半径  $25 \mu\text{m}$ 、ピッチ  $10 \mu\text{m}$ 、速度  $1000 \mu\text{m/s}$  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。

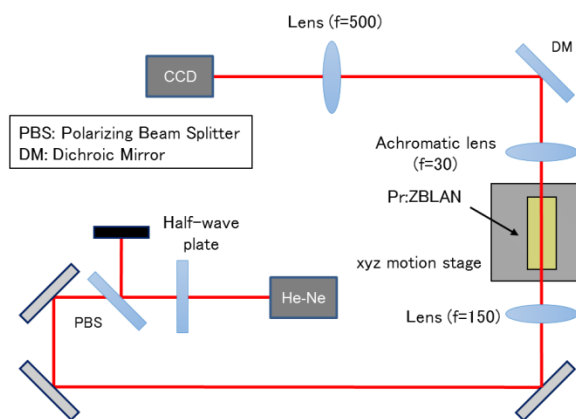


Fig.7 Measurement setup of waveguide characteristics

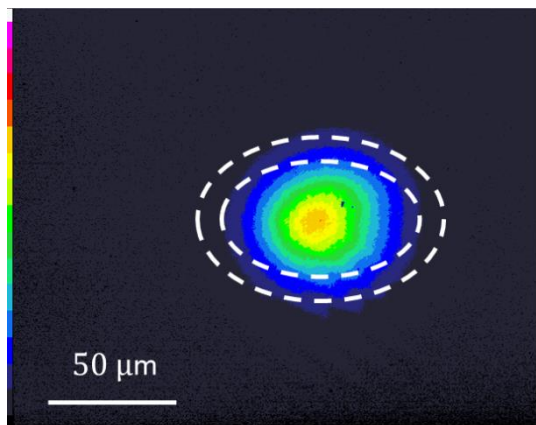


Fig. 8 Near-field image of guided mode

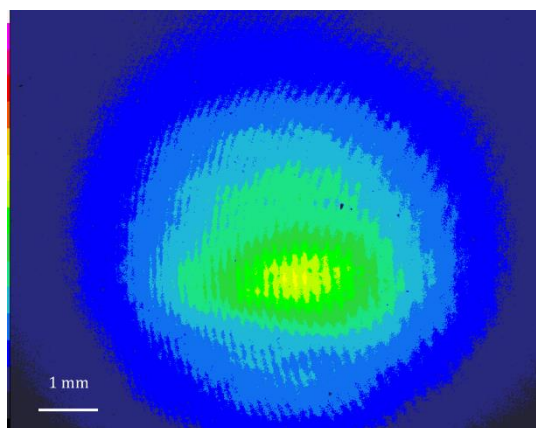


Fig. 9 Far-field image of guided mode

Fig.9 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。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, 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 3.77 dB, 2.95 dB 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[3,4,5]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. まとめ

我々は 1D-SSTF システムを利用することで、 $z$  軸方向の高い空間制御性を実現した。また、これを用いることで、Pr:ZBLAN 内部にフェムト秒レーザー直描導波路を作製することに成功した。今後、加工条件と加工方法の

最適化により、導波路特性の向上や青色 LD 励起によるレーザ動作が期待される。

## References

- [1] K.Hashimoto and F. Kannari, *Opt.Lett*, 32, 2493 (2007)
- [2] H. Okamoto, K. Kasuga, I. Hara, and Y. Kubota, *Opt. Express* 17, 20227 (2009)
- [3] J.-P. Bérubé, M. Bernier, and R. Vallée, *Opt. Mater. Express* 3, 598 (2013)
- [4] T. Calmano, J. Siebenmorgen, F. Reichert, M. Fechner, A. G. Paschke, N. O. Hansen, K. Petermann, and G. Huber, *Opt. Lett.* 36, 4620 (2011)
- [5] S. Muller, T. Calmano, P. Metz, N.-O. Hansen, C. Krankel, and G. Huber, *Opt. Lett.* 37, 5223 (2012)