

超短パルスレーザーによる Pr:ZBLAN ガラス内部への光導波路作製

Direct writing of optical waveguides in a Pr:ZBLAN glass using ultrafast laser pulses

山中 雄介 (M1), 廣澤 賢一 (助教), 佐藤 琢也(B4)

Yusuke Yamanaka, Kenichi Hirosawa, Takuya Sato

Abstract

We report fabrication of optical waveguides in a Pr³⁺ doped ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF (Pr:ZBLAN) bulk glass using direct drawing technique by ultrafast laser pulses. The waveguiding is observed in a core placed between two modified track structures. We tried three processing schemes: (1) with long pulses, (2) superposing with blue-LD laser beam, and (3) simultaneous multi-point processing, and obtained slightly higher waveguide NAs.

1. はじめに

近年, フェムト秒レーザーによるバルク材料内部への導波路直接描画技術が注目を集めている[1]. 本手法による光導波路は, 従来のリソグラフィ技術によるものと比較して材料内部に作製可能, 構造自由度が高く 3D 化も可能, 特殊な実験環境を必要としないなどのメリットがあり, 将来的には導波路型レーザーやフォトニック回路などの新規デバイス作製への応用が期待される. フェムト秒レーザーによる材料内部の局所的な構造変化は照射するレーザーのパラメータに依存し, 例えば ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF (ZBLAN) ガラスにおいては繰り返し周波数によって屈折率変化の正負が変わるという報告がなされており, 高い繰り返し周波数では正の屈折率変化が, 低い繰り返し周波数では負の屈折率変化が起きる[2]. 一方で, ZBLAN ガラスは Pr³⁺ イオンのホストガラスとしても用いられ, Pr³⁺ ドープ ZBLAN ガラス(以下 Pr:ZBLAN)は InGaN-LD($\lambda=442$ nm)で励起され, 可視域に多くの光学遷移を持ちレ

ーザー発振が報告されている. したがって, Pr:ZBLAN 内部に導波路を作製することで, 可視域で発振する導波路レーザーを実現することができる.

この技術を用いて光導波路を作製する際には, 大きく分けて二つの方法がある. 一つは正の屈折率変化によってコアを描画する方法であるが, コア部分の変質は光学特性の悪化につながる恐れがあり, レーザー導波路としての利用には不向きである. 一方で負の屈折率変化によってクラッド部分を描画する方法があり, この手法ではコア部は一切の変質を起こしていないため, 光学特性の劣化を回避できる. 本研究では, Pr:ZBLAN 内部にフェムト秒レーザーを用いたクラッド部分の直接描画によるレーザー導波路作製を行い, とくに M² 値の大きい半導体レーザー光でも導波路結合可能な高屈折率変化誘起のための新たな加工手法の確立を目的とし, 入射パルスのロングパルス化, 青色 LD 重畳, 二点同時加工の三つの手法を試みた.

2. 実験セットアップ

導波路作製の実験セットアップを Fig.1 に示す.

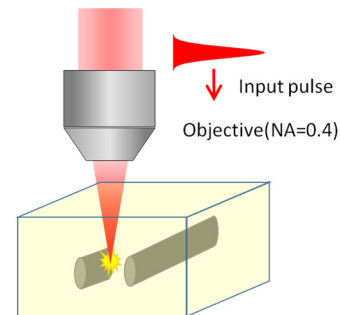


Fig.1 Experimental setup of waveguide fabrication.

加工用レーザーに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ーパルス(中心波長 800 nm, パルス幅 50 fs(FWHM). 繰り返し周波数 1kHz)を用いている. 入射パルスは対物レンズ(NA=0.4)によって材料表面から深さ 300 μm の位置に集光している. 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 50 fs~3.5 ps の間で変化させた. Pr:ZBLAN は xyz 三軸電動ステージに乗せており, ステージを動かして集光位置を走査することで, 任意の形状の加工が実現可能になっている.

Fig.2 に青色 LD 光重畳実験のセットアップを示す. 本実験では 3.5 W 出力の InGaN 半導体レーザーを用いている. LD は温度センサとペルチェ素子を用いたフィードバック制御により 20°C に固定し, 発振波長を吸収が最も良い 442 nm に固定している. 励起光は縦横比が大きく異なるため, コリメートレンズ及びシリンドリカルレンズ対によって拡大され, ダイクロミックミラーを用いて加工用パルスと合波され同軸で対物レンズに入射する. このときの LD の加工面におけるフルエンスは 2.6 MW/cm^2 となっている.

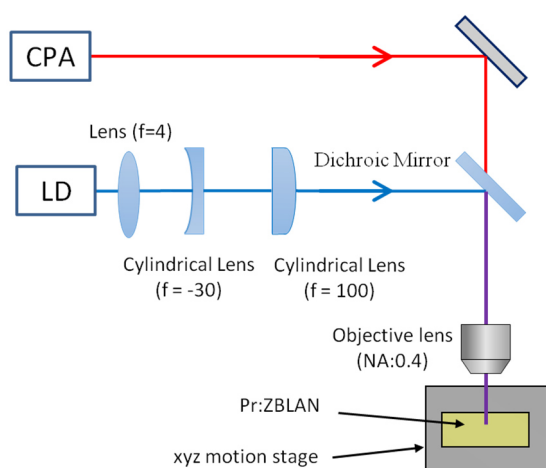


Fig.2 Experimental setup for Blue-LD superimposing.

Fig.3 に二点同時加工のセットアップを示す. 加

工用レーザーパルスはビームスプリッターによって二つに分けられ, 対物レンズに異なる角度で入射することで二か所に同時に集光している. 本実験においては, 0.13° の角度 (1.8 m 離れた地点で 4 mm のずれに対応) をつけて対物レンズに入射し, 2つの集光点間の距離を 20 μm としている. また, 二つのパルスの入射のタイミングを合わせるため, 一方の光路長を可動ステージにより調整できるようにしている. 対物レンズの直前に CCD カメラを配置し, 干渉縞を観測することでタイミングが合っていることを確認した.

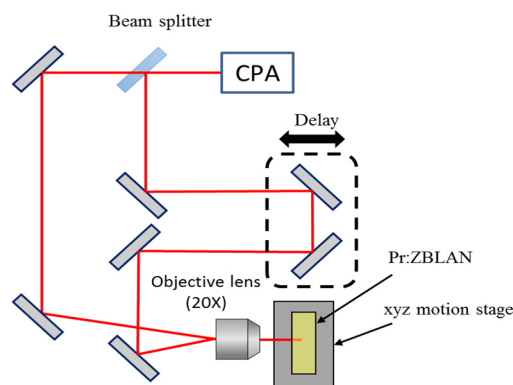


Fig.3 Experimental setup for simultaneously multi-point processing.

3. 実験結果

まず, 集光点付近での屈折率変化の様子を Fig.4 に示す. このとき, パルス幅 50 fs, パルスエネルギーそれぞれ 3 および 5 μJ のパルスを 1 ショット入射している. また, 入射パルスは下図の右側から入射しており, 表面からの深さは約 300 μm となっている. この結果を見ると, 集光点では約 1.0×10^{-3} の負の屈折率変化, その周囲には約 2.0×10^{-4} の正の屈折率変化が引き起こされていることがわかる.

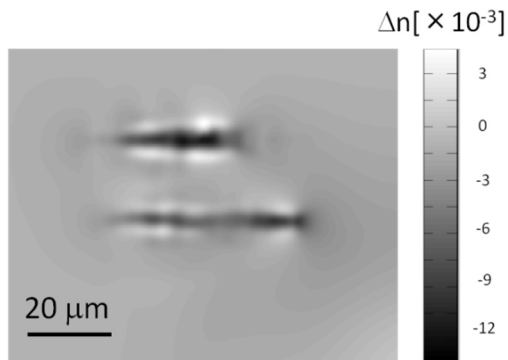


Fig.4 Refractive index change around the focal points. The pulse energies of incident pulse were (up) 3 μJ and (down) 5 μJ.

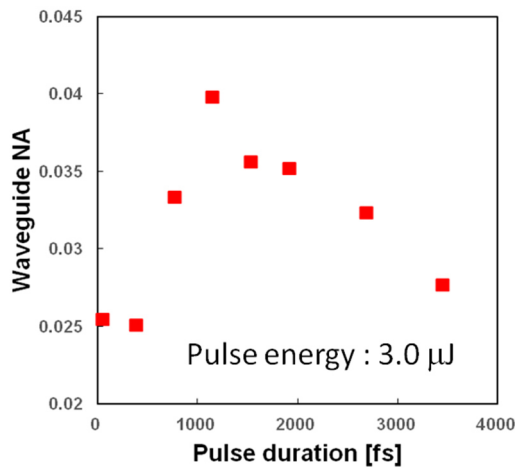


Fig.5 Dependence of NA of fabricated waveguide on pulse duration.

Fig.5 に入射パルスのパルス幅と導波路 NA の関係を示す。このとき、パルスエネルギー 3 μJ、トラック間隔 25 μm、スキャン速度 1000 μm/s で導波路を作製した。導波路 NA は作製した導波路に He-Ne レーザー (λ=442 nm) をカップリングし、遠視野像のビームプロファイルから見積もっている。この結果を見ると、フーリエ限界パルス (50 fs) で作製した導波路の NA が約 0.025 であるのに対し、パルス幅を長くした場合 NA の向上が見られた。

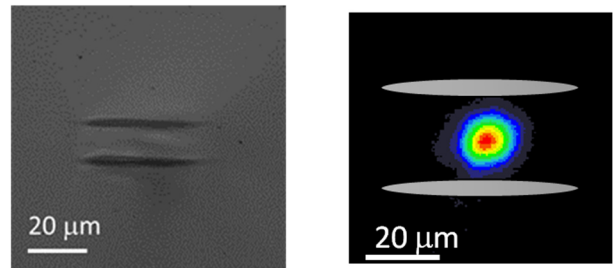


Fig.6 Fabricated waveguide with long pulse processing. (Left) Microscope image of fabricated waveguide. (Right) Near-field image of guided mode at 632 nm.

一般に、超短パルスレーザーが材料内部に集光されると多光子吸収過程を経て、入射パルスのエネルギーが吸収され、その吸収確率は n 光子吸収に対して電界強度の n 乗に比例する。また、多光子吸収過程によって生じたキャリアによる自由電子吸収過程も存在し、その吸収確率は電界強度に比例する。したがって、吸収されるエネルギーは 2 つの吸収過程の合計であらわされる。一方で、高いピークパワーをもつパルスを集光すると集光点付近で自己収束が発生し、それがプラズマによる拡散とつりあうことで、集光された状態で長い距離を伝搬するフィラメンテーションという現象が発生する。フィラメンテーションは集光点でのエネルギー吸収を妨げてしまう。

入射パルスをロングパルス化することでピークパワーが下がり、フィラメンテーションを回避しつつ、より効果的にエネルギーが吸収された結果、大きな屈折率変化が誘起され導波路 NA が向上したと考えられる。本実験においては、パルス幅 1.15 ps で最大の導波路 NA 0.04 を達成した。その時の導波路の端面の明視野像と、He-Ne レーザーをカップリングさせたときの近視野像を Fig.6 に示す。ただし、この条件下における導波路の V ナンバーは

$$V = 2\pi \cdot NA \cdot \frac{a}{\lambda} \approx 9.94$$

であり、マルチモード伝搬となっている。

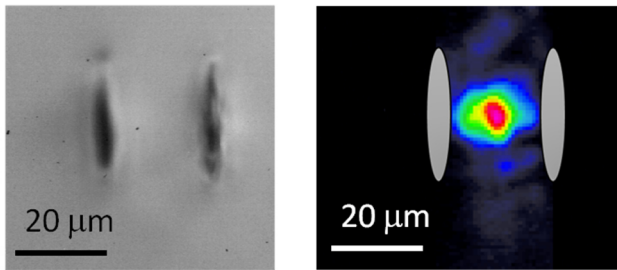


Fig.7 Fabricated waveguide with blue-LD superimposing. (Left) Microscope image of fabricated waveguide. (Right) Near-field image of guided mode at 632 nm.

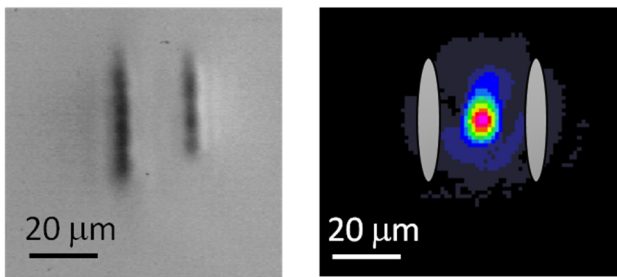


Fig.8 Fabricated waveguide with simultaneously multi-point processing. (Left) Microscope image of fabricated waveguide. (Right) Near-field image of guided mode at 632 nm.

青色 LD 光を重畳した場合及び、二点同時加工を行った場合に作製された導波路をそれぞれ Fig7, 8 に示す。このとき、両者ともにパルスエネルギー $3\ \mu\text{J}$ 、トラック間隔 $25\ \mu\text{m}$ 、スキャン速度 $1000\ \mu\text{m/s}$ で導波路を作製した。作製された導波路 NA は青色 LD 光重畳で $\text{NA}=0.03$ 、二点同時加工で $\text{NA}=0.032$ となり、負 FTL パルスのみで作製した導波路 ($\text{NA}=0.025$) に比べて NA が向上していることが確認された。

一般に超短パルス入射によって材料に吸収されたエネルギーは熱や衝撃波となって放出され、その影響で局所的な屈折率変化が引き起こされる。Pr:ZBLAN が強い吸収帯をもつ $442\ \text{nm}$ で発振した青色 LD 光を照射することで集光点付近に局所的な

高温状態が形成され、そこに超短パルスが入射することで通常の加工プロセスに比べてより一層の高温状態及び衝撃波が伝播しやすい状態が実現されていることが想定される。その結果として屈折率変化が大きくなり、青色 LD 光重畳による導波路 NA の向上が見られたと考えられる。

また、2本のトラックによる導波路作製の場合、そのトラック間では圧力により正の屈折率変化が引き起こされ、上図の縦方向の閉じ込めが実現されている。2点同時集光を用い、2本のトラックを同時に作製することで、各集光点で発生した衝撃波の閉じ込め効果が期待される。その結果、別々にトラックを作製した時よりもトラック間に生じる正の屈折率変化が大きくなったと考えられる。導波路の NA はコア部分とクラッド部分の屈折率差で決定されるため、コア部分の正の屈折率変化が大きくなれば導波路 NA も向上する。

4. まとめ

我々は超短パルスレーザーを用いて Pr:ZBLAN 内部に光導波路を作製することに成功した。その際に、従来の手法では最大の導波路 NA が 0.025 程度であったのに対し、入射パルスのロングパルス化、青色 LD の重畳、2点同時加工によって導波路 NA がそれぞれ 0.04 , 0.03 , 0.032 と向上することが確認された。これらの手法はいずれも併用可能であり、これらを組み合わせることでさらなる導波路 NA の向上も見込まれる。

References

- [1] R. R. Gattass and E. Mazur, "Femtosecond laser micromachining in transparent materials," *Nature Photon.* 2, 219-225 (2008)
- [2] J.-P. Bérubé, M. Bernier, and R. Vallée, "Femtosecond laser-induced refractive index

modifications in fluoride glass,” *Opt. Mater. Express* 3, 598-611 (2013)