

超短レーザーパルス誘起屈折率変化を用いた Pr:ZBLAN 導波路レーザー

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

山中 雄介 (M2), 田中 裕樹(D1), 佐藤 琢也(M1)

Yusuke Yamanaka, Hiroki Tanaka, 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 two processing schemes: (1) with long pulses, and (2) thicker clad fabrication, and obtained slightly higher waveguide NAs. We clarified that increasing of a waveguide NA improved laser output characteristics in a Nd:YLF waveguide laser.

1. はじめに

超短パルスレーザー誘起屈折率変化を用いてバルク透明レーザー媒質内部に光導波路を作製することで導波路レーザーを作製することが可能である[1]. 本手法を用いて、コア体積の小さい導波路レーザーを実現することで、高いレーザー利得と優れた横モード特性が得られるだけでなく、励起光学系に導波路モードを適合させることも可能になる. 一方で、Pr³⁺イオンをドープした ZBLAN ガラス(Pr:ZBLAN)は、ディスプレイ、レーザー加工、イメージング等幅広い分野に応用可能な可視域で発振するレーザー媒質であり、近年高出力化が進んでいる InGaN-青色半導体レーザーで励起が可能である[2]. 本研究では可視域で動作する導波路レーザーを実現することを目的とし、高い導波路 NA および低い伝送損失を可能にする加工手法を見出し、その検証を行った. 超短パルス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強く依存し、

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引き起こされる[3]. 正の屈折率変化によるコア部分の不均一な改質はむしろレーザー導波路特性の悪化につながる恐れがあるため、本研究では負の屈折率変化によってクラッド部分を描画する方法を採用した. 超短レーザーパルスのエネルギーは多光子吸収と自由電子吸収の 2 つの吸収過程を経て材料に吸収され、熱や衝撃波に変換されて構造変化を引き起こす. そこで、(1)フィラメンテーションによる吸収の障害を避けるためのロングパルスによる加工、(2)ストレスによるコア部分の正の屈折率変化を強化するための厚いクラッド作製をそれぞれ考案し、導波路特性の向上を目指した. また、Nd:YLF 結晶において同様に導波路レーザーを作製し、新規加工手法が出力特性の向上に寄与することを示した.

2. Pr:ZBLAN 導波路レーザー作製

導波路作製の実験セットアップを Fig.1 に示す.

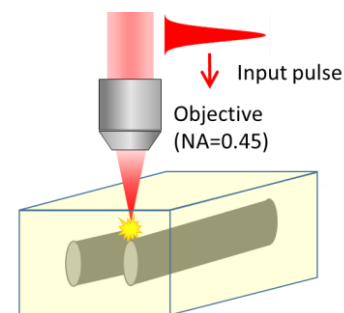


Fig.1 Experimental setup of waveguide fabrication.

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 = 0.45)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材料を走査することで, Fig. 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.

まず, 材料内部にダブルトラック型の導波路を作製した場合どのようなモードで導波路内を伝搬するのかを知るために導波路シミュレーションソフト(FemSIM, Rsoft, Cybernet)を用いてモード解析を行った. Fig. 2.1 に設定した導波路の屈折率分布を示す. 正負の屈折率変化量は 1-shot 加工を行った時の屈折率変化量をもとにしている.

Fig. 2.2 に導波モード解析によって得られた各モードの強度分布を示す. 各図内の白い点線はクラッドの領域を示している. この結果を見ると, 最低次の基本モードは導波路内に閉じ込められて伝搬するものの, 1 次のモードですでに放射(発散)モードになってしまっており, 導波路内に高次のモードはほとんど伝播できないことがわかる. また, TE モード(E_x)と TM モード(E_y)で最低次のモードの強度分布や実効屈折率に違いはほとんどなく, このことから偏光依存性のない媒質に関しては導波路特性は偏光方向に依存しないと考えられる.

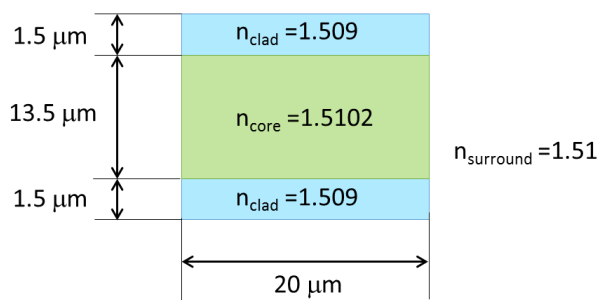


Fig. 2.1 A designed distribution of refractive index

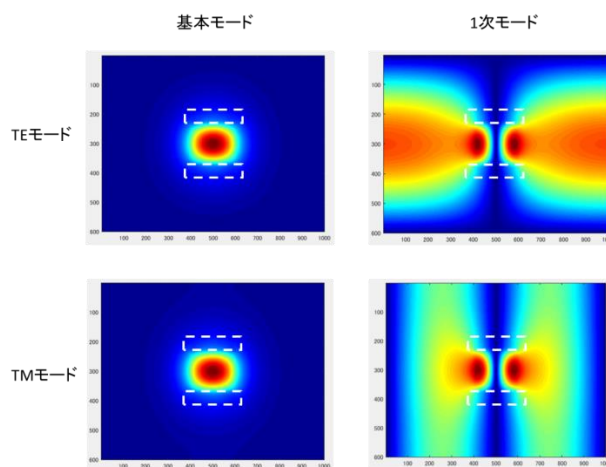


Fig. 2.2 Electric field intensity distributions in each propagation mode

続いて, 各加工条件の導波路 NA と伝送損失に対する影響の調査を行った. その結果を Fig. 3.1 ~ 3.4 に示す. 本実験においては加工条件の中でもパルスエネルギー, トラック間隔, 走査速度, パルス幅に注目しその影響を調査した. 具体的には, パルスエネルギー 4 μJ , トラック間隔 15 μm , 走査速度 500 $\mu\text{m/s}$, パルス幅 50 fs を基準とし, 各パラメータをパルスエネルギーは 2 ~ 10 μJ , トラック間隔は 10 ~ 20 μm , 走査速度は 50 ~ 1000 $\mu\text{m/s}$, パルス幅は 50 fs ~ 1500 fs の間でそれぞれ変化させた.

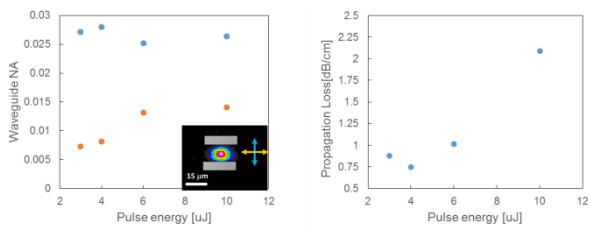


Fig. 3.1 Dependence of waveguide NA and propagation loss on pulse energy.

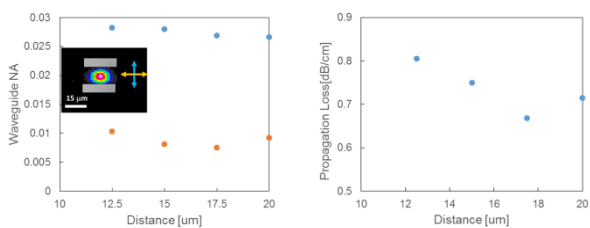


Fig. 3.2 Dependence of waveguide NA and propagation loss on track distance.

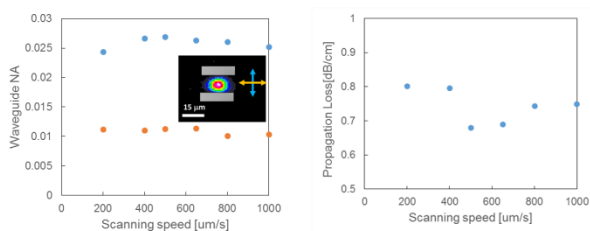


Fig. 3.3 Dependence of waveguide NA and propagation loss on scanning speed.

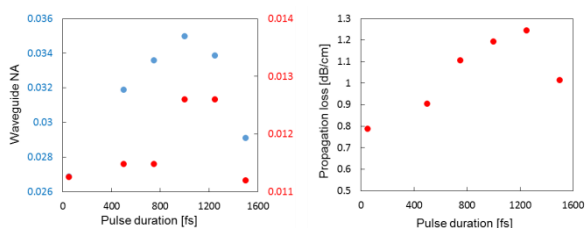


Fig. 3.4 Dependence of waveguide NA and propagation loss on pulse duration.

この結果を見ると、パルスエネルギーを大きくすると閉じ込めが弱い方(Fig.3.1における横方向)の導波路 NA は大きくなっていくものの、閉じ込めが強い方に関しては NA の変化は見られない。また、

伝送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ている。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および加工領域の拡張が大きくなり、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のだと考えられる。一方、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、加工領域がレーザ進行方向に長く伸びてしまい負の屈折率変化は小さくなるため、結果的に大きい方の NA はほとんど変わらず、加工領域のいびつさも大きくなるため伝送損失が悪化しているのだと考えられる。なお、 $2 \mu\text{J}$ で作製した導波路に関しては十分な屈折率変化が引き起こされず導波路としての機能が確認されなかった。

また、トラックの間隔を狭くしていくと導波路の NA はほとんど変わっていないものの、伝送損失に関してはトラック間隔が広いもののほうが小さくなっている。この結果だけを見るとトラック間隔は大きいもののほうがいいように思えるが、レーザ発振を目指すうえで利得の大きさはコアの大きさに大きく依存し、極力コアを小さくすることが望ましい。したがって、損失は大きくなってしまふもののトラック間隔は $15 \mu\text{m}$ 以下にすることが適当である。なお、トラック間隔 $10 \mu\text{m}$ の場合には導波路として機能が見られなかった。

走査速度に関しては、 $500 \mu\text{m/s}$ をピークに走査速度を速くしても遅くしても導波路 NA は低下し伝送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、クラッド領域の凸凹が大きくなってしまい、速度が遅い場合に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たことが原因であると考えられる。なお、走査速度 $100 \mu\text{m/s}$ 以下の場合には、加工領域の重なりが 96%程度まで大きくなっている影響で

導波路としての機能が確認できなかった。

パルス幅を長くした場合は導波路 NA が向上, 伝送損失は増大している. フィラメンテーションの影響を減少させたことで集光点付近の屈折率変化が大きくなり, 導波路 NA が向上したのだと考えられる. 一方で, ロングパルスによる加工の形状は FTL による加工と比べて加工痕がいびつになり, 加工範囲も広がる. これは, パルス滞在時間が長くなったことと, 効果的にエネルギーが吸収されたこととで, 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.

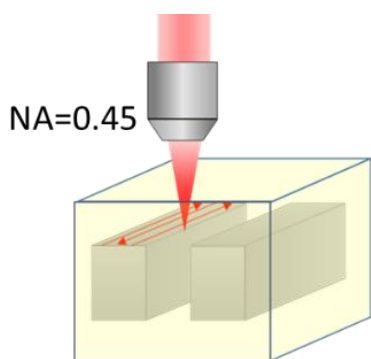


Fig. 4.1 Schematic of a thick-clad waveguide fabrication

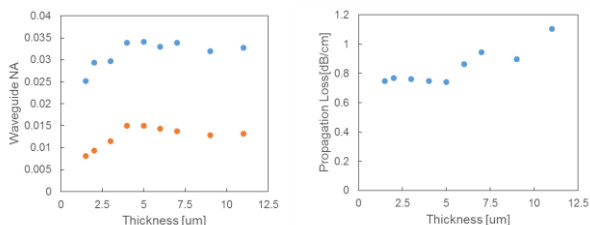


Fig. 4.2 Dependence of waveguide NA and propagation loss on clad thickness.

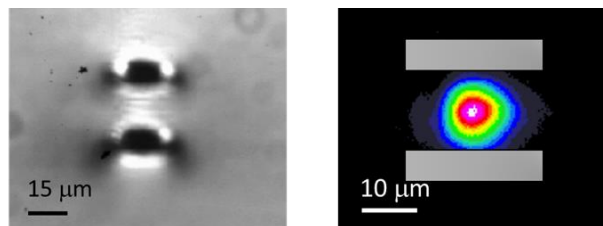


Fig. 4.3 Fabricated waveguide with thick clads. (Left) Microscope image of fabricated waveguide. (Right) Near-field image of guided mode at 632 nm.

続いて, 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. クラッドの厚い導波路作製のセットアップを Fig. 4.1 に示す. 少しずつ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厚いクラッドを実現している. Fig. 4.2 にクラッドの厚さと導波路 NA, 導波路伝送損失との関係を示す. なお, パルス幅は 50 fs, パルスエネルギーは 3 μJ, トラック間隔は 15 μm, 走査速度は 500 μm/s, シート加工のピッチは 0.5 μm で実験を行った. この結果を見ると, クラッドを厚くすると導波路 NA は向上するが, 厚さ 4 μm のあたりで頭打ちになっていることがわかる. 一方で, 伝送損失はクラッドの厚さに伴って大きくなっている. これはクラッドを厚くするために導波路付近を何度も加工して加工領域を広げたことでひずみが発生してしまっていることや加工領域の重なりによって集光状態が変化してしまったことが原因と考えられる. 以上のことから, 導波路としての特性は厚さ 4 μm の条件においてもっともよくなった. この条件で作製した導波路の終端の明視野像と近視野像を Fig. 4.3 に示す. また, この時の導波路 NA は 0.35×0.12 , 伝送損失は 0.75 dB/cm である.

さらに、先述したロングパルスによる加工と厚いクラッドを組み合わせた導波路作製を行った。ロングパルスによる加工では、加工領域のいびつさが導波路内での光の散乱を増大させ、伝送損失の悪化につながっていた。そこで、光の通るコア部分に近い箇所は FTL で書き込みを行い、コアから遠い箇所はロングパルスによる書き込みを行う手法をとった。Fig. 5.1 にその原理図を示す。また、この手法を用いて作製した導波路の終端の明視野像と近視野像を Fig. 5.2 に示す。この時、パルス幅は 50 fs と 1000 fs、パルスエネルギーはともに 4 μ J、トラック間隔は 15 μ m、走査速度は 500 μ m/s、クラッドの厚さは 4 μ m である。この導波路 NA は 0.038 \times 0.15、伝送損失は 0.83 dB/cm であり、導波路 NA の向上が確認された。一方、伝送損失は若干大きくなってしまったものの、コア付近を FTL で書き込んだことでロングパルスのみによる加工と比べて大幅に低減されていることがわかる。

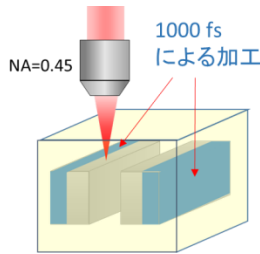


Fig. 5.1 Schematic of a thick-clad waveguide fabrication with long pulses and FTL pulses

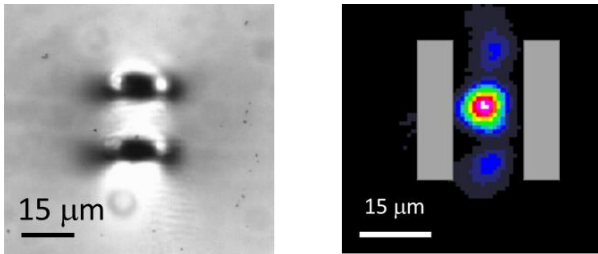


Fig. 5.2 Fabricated waveguide with long pulses and FTL pulses. (Left) Microscope image of fabricated waveguide. (Right) Near-field image of guided mode at 632 nm.

3. 青色 LD 励起による He-Ne レーザ増幅及び Pr:ZBLAN 導波路レーザ発振実験

前章で示した新規加工手法による導波路特性の向上が青色 LD で励起した際の利得にどのような影響を及ぼすか調査をおこなうため、He-Ne レーザの増幅実験を行った。実験セットアップを Fig. 6 に示す。

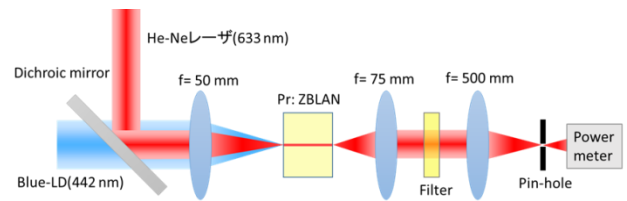


Fig. 6 Experimental setup for He-Ne laser amplification with blue-LD

本セットアップでは He-Ne レーザと励起光(3.5W blue-LD)をダイクロイックミラーによって合波し、同軸で導波路に入射している。導波路から出射した光は f=75 mm と f=500mm のレンズによって構成される拡大光学系を経てピンホールの位置に結像し、導波路内部を伝送された光以外を除去したうえで強度の測定を行った。本実験において測定されるものは励起光と He-Ne レーザの入射強度および伝送光強度のみである。そこで、これらの値を用いて励起光結合効率、吸収された励起光強度、He-Ne レーザの波長および発振波長における小信号利得の見積もりを行った。算出方法は以下のとおりである。

導波路の伝送損失 L_{prop} [dB/cm] は同じ加工条件で長さだけ (6 mm, 3 mm) が違う二つの導波路を作製し、その二つの導波路の伝送光強度から以下の式によって算出される。

$$L_{prop}[\text{dB/cm}] = \frac{10}{3} \times 10 \log \left(\frac{P_{out,6\text{mm}}}{P_{out,3\text{mm}}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $P_{out,3\text{mm}}$ 、 $P_{out,6\text{mm}}$ はそれぞれの長さの導波路の伝送光強度である。

Pr:ZBLAN 導波路内部において結合した励起光強度は導波路始端からの距離 x に対して以下の式で表すことができる。

$$P(x) = P(0)\exp(-ax - L'_{prop}x) \quad (2)$$

ここで、 $P(0)$ は導波路始端における励起光強度、 $L'_{prop}/23.03 = L_{prop}$ は L_{prop} に対して \log と \ln の変換を行った結果である。 a は Pr:ZBLAN の吸収係数であり、加工されていない箇所での励起光強度の減衰を計測した結果 $0.087/\text{cm}$ と見積もられた。ただし、この計算は He-Ne レーザにおける伝送損失が励起光に対してもそのまま適用できるという仮定の下で行っており、導波路形状にしたことによる吸収係数の変化、クラッド伝搬はないものと仮定している。この式によって算出した $P(0)$ の値を用いて励起光結合効率 η_{couple} を以下の式で見積もることができる。

$$\eta_{couple} = \frac{P(0)}{P_{in}(1 - R_{fres})} \quad (3)$$

ここで、 P_{in} は励起光の入射光強度、 R_{fres} はフレネル反射率である。

また、吸収された励起光強度 P_{abs} は以下の式を用いて算出した。

$$P_{loss} + P_{abs} = \frac{(P(6) - P(0))}{(1 - R_{fres})} \quad (4)$$

$$P_{loss}:P_{abs} = e^{L'_{prop}}:e^a \quad (5)$$

ここで、 P_{loss} はロスになった励起光強度である。

また、本実験において小信号利得 G は以下の式のように He-Ne レーザの伝送光強度が励起の有無で何倍になったかを計算している。

$$G = \frac{P_{out\text{励起あり}}}{P_{out\text{励起なし}}} \quad (6)$$

本実験に用いた導波路の作製条件とその特性を Table 1 に示す。本実験ではコアの大きさと、パルス幅、クラッドの厚さに関して利得に対する影響の調査を行った。

Table 1 Waveguide characteristics in several fabricated conditions

	τ [fs]	E[μ J]	v[μ m/s]	d[μ m]	t[μ m]	L_{prop} [dB/cm]	NA 縦	NA 横
WG1	50	4	500	15	1.5	0.767	0.0269	0.0113
WG2	50	4	500	12.5	1.5	0.804	0.283	0.0113
WG3	50	4	500	15	2	0.814	0.033	0.0115
WG4	50	4	500	15	4	0.804	0.0347	0.012
WG5	50	4	500	15	6	0.927	0.035	0.0122
WG6	500	4	500	15	1.5	1.003	0.0319	0.0118
WG7	1000	4	500	15	1.5	1.169	0.035	0.0134
WG8	1500	4	500	15	1.5	0.943	0.0291	0.0112
WG9	50+1000	4	500	15	2+2	0.855	0.0381	0.0146
WG10	1000	4	500	15	4	1.353	0.0392	0.0154

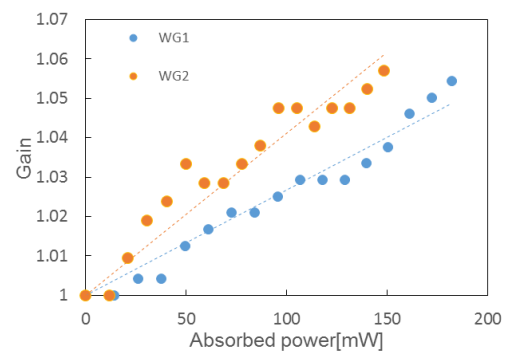


Fig. 7.1 Dependence of gain characteristics on track distance.

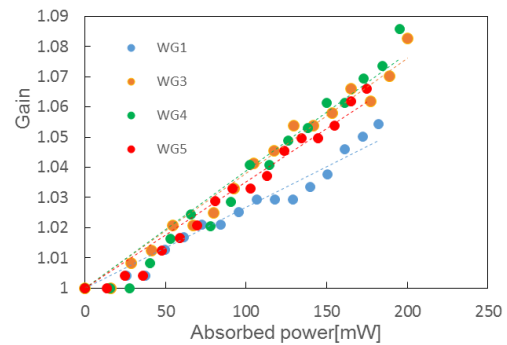


Fig. 7.2 Dependence of gain characteristics on clad thickness.

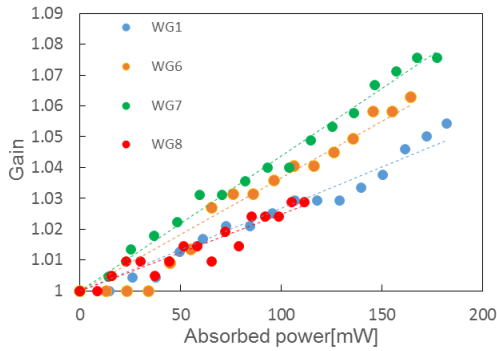


Fig. 7.3 Dependence of gain characteristics on pulse duration.

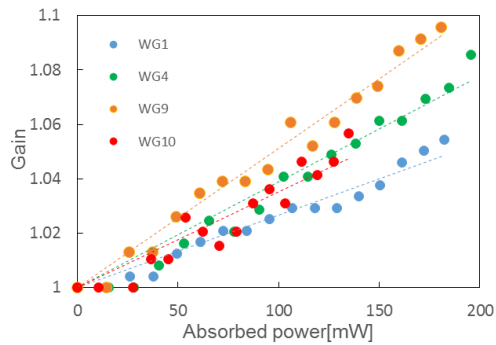


Fig. 7.4 Dependence of gain characteristics on clad thickness and pulse duration.

Fig. 7.1 ~ 7.4 に各加工条件における，LD 励起による He-Ne レーザの増幅の様子を示す． Fig. 7.1 を見ると，コアを小さくすることで同じ吸収光強度に対する利得は向上するものの，励起光の結合効率が悪化してしまうため励起光の最大吸収光強度が小さくなってしまい，入射する励起光強度に対する利得の値はほとんど変わらないという結果が得られた．また， Fig. 7.2 を見るとクラッドの厚さを厚くしたことで，励起光の結合効率が利得も向上していることがわかる．同様に，パルス幅を 1000 fs にした場合(Fig. 7.3, WG7)でも励起光の結合効率と利得が向上しており，特に前章で最も良い導波路特性が得られた FTL(50 fs)とロングパルス(1000 fs)を組み合わせる用いた厚いクラッドの導波路(Fig. 7.4,

WG9)において最大の利得 1.098 が得られた．

続いて，Pr:ZBLAN の発振波長と He-Ne-レーザの波長との間にはずれがあるため，その補正を行ったうえでの発振可能性の検討を行った．その補正は Fig. 8 に示す Pr:ZBLAN の蛍光スペクトルと以下の式によって行った．

$$g_{0.636} = \frac{g_{0.633}}{0.42} \quad (7)$$

$$G' = e^{2(g_{0.636} - L'_{prop})l} \quad (8)$$

ここで， $g_{0.636}$, $g_{0.633}$ は各波長における小信号利得係数， G' は伝送損失も加味したうえでの共振器一往復あたりの正味の利得である．

Table. 2 に先述した各導波路における G' の見積もりの結果を示す．この結果から新規加工手法による導波路特性の向上は利得特性の向上にもつながり，レーザ発振の可能性を大幅に高めるとことが示され，本実験において利得が最大になったのは FTL(50 fs)とロングパルス(1000 fs)を組み合わせる用いた厚いクラッドの導波路(WG9)で，正味の利得は 1.207 となった．

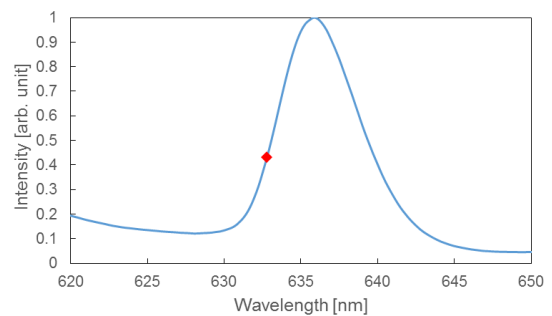


Fig. 8 Fluorescence spectrum of Pr:ZBLAN glass. The red point shows a wavelength of He-Ne laser.

Table. 2 Gain characteristics in several fabricated conditions

	t [fs]	E [μ J]	v [μ m/s]	d [μ m]	t [μ m]	η_{coup}	G_{max}	G
WG1	50	4	500	15	1.5	0.270	1.054	1.035
WG2	50	4	500	12.5	1.5	0.252	1.057	1.037
WG3	50	4	500	15	2	0.304	1.083	1.155
WG4	50	4	500	15	4	0.296	1.086	1.174
WG5	50	4	500	15	6	0.273	1.066	1.043
WG6	500	4	500	15	1.5	0.220	1.072	1.046
WG7	1000	4	500	15	1.5	0.281	1.093	1.097
WG8	1500	4	500	15	1.5	0.174	1.029	0.880
WG9	50+1000	4	500	15	2+2	0.277	1.096	1.207
WG10	1000	4	500	15	4	0.221	1.057	0.889

一般にレーザ発振は以下の条件を満たしたときに達成される。

$$G' \times R_1 R_2 \eta_1 \eta_2 > 1 \quad (4.9)$$

ここで、 R_1, R_2 は HR ミラー，アウトプットカップラの反射率， η_1, η_2 は HR ミラー，アウトプットカップラにおける共振器結合効率である。したがって、現行の導波路でレーザ発振を達成するためには η_1, η_2 を 0.92 程度にする必要がある。本実験のような Pr:ZBLAN バルク端面にミラーを押し付けた場合は端面の凹凸やゆがみによって各ミラーで 15~20% 程度の損失が生じてしまう。仮に 20% の損失があったと仮定した場合には G' は 1.59 以上にする必要がある。つまり、レーザ発振を実現するためには励起光の duty 比を下げて熱損傷を回避しつつ強励起を行う、もしくはコアサイズを 10 μ m 程度まで縮小するか励起光結合効率を上昇させる加工手法を模索する、または共振器結合効率を高めるために導波路作製後に表面を研磨し、ミラーコートを行うなどの手法をとることが必要であるという結論に至った。

そこで、励起光の duty 比を下げて熱損傷を回避しつつ強励起を行うため、LD を Q-CW(Quasi-CW) 動作させて励起を行った。その実験セットアップを Fig. 9.1 に示す。本実験においては励起光源に二台の LD を用いており、Pr:ZBLAN 導波路の吸収特性、導波路特性は励起光の偏光方向に依存しないため、二つの励起光は偏光ビームスプリッタを用いた偏光多重により合波している。また、励起光は Duty

比 1/20, 繰り返し周波数 50 Hz で Q-CW 動作しており、on-time における励起光の平均強度は集光レンズ後の位置で最大 5.4W となっている。

Fig. 9.2 に導波路終端における励起光の近視野像を示す。この時、励起光は Fig. 9.2 の横方向の直線偏光となっている。これによって励起光が導波路に結合していることが確認された。しかしながら、本実験においてレーザ発振は達成されなかった。先述した見積もりによると、WG9 を用いた場合には平均強度 5.4W の励起光が入射された際の G' は約 2.11 となる。この条件下で発振が達成されなかった原因としては、実験の過程で生じた ZBLAN 表面の微小な傷などの要因によって、各ミラーにおける共振器結合効率が 70% 以下になってしまっている可能性が考えられる。

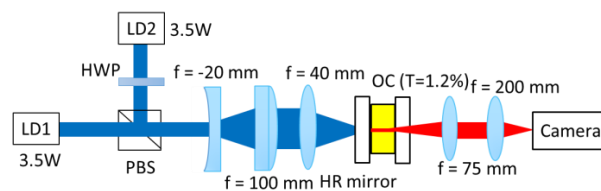


Fig. 9.1 Schematic of the resonator of Pr:ZBLAN waveguide laser with Q-CW laser pumping

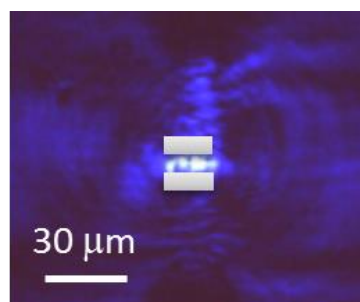


Fig. 9.2 A near-field distribution of guided mode at 442 nm (pumping laser)

4. Nd:YLF 導波路レーザ発振実験

先述した新規加工手法による導波路特性および利得特性の向上が Nd:YLF 結晶に対しても有効かつ、レーザ動作させたときの出力特性の向上にもつながることを示すために Nd:YLF 結晶内部に直描型導波路レーザを作製し、その発振特性の評価を行った。Nd:YLF 結晶はその誘導放出断面積の大きさと上準位寿命の長さから、Pr:ZBLAN よりも 250 倍以上大きな小信号利得係数が得られる。Fig. 10.1 に導波路作製セットアップを示す。Nd:YLF 結晶の吸収帯域は CPA パルスの波長と大部分が重なっているため、そこで、導波路の作製には長さ 2 mm の Type I BBO 結晶を用いて発生させた CPA パルスの二倍波を用い、NA=0.45 の対物レンズによって材料の深さ 300 μm の位置に集光している。また、パルスエネルギーは 4 μJ 、トラック間隔は 15 μm 、走査速度は 500 $\mu\text{m}/\text{s}$ で、クラッド幅 1.5 μm (以下 WG11) と 4 μm (以下 WG12)の二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。なお SHG パルスのスペクトルは CPA パルスに比べて狭帯化し、スペクトル幅 (FWHM) 2 nm 程度になっているため FTL であったとしてもパルス幅は 120 fs 程度であり、さらに対物レンズ等で二次分散が付加されて集光点付近では 126 fs 程度のパルス幅であると推定される。作製した導波路の終端の明視野像は Fig. 10.2 に示す。Pr:ZBLAN の場合と同様に He-Ne レーザを用いて導波路特性の評価を行った結果、WG11 は導波路 NA=0.023,伝送損失 1.13 dB/cm, WG12 は導波路 NA=0.027,伝送損失 1.17 dB/cm となり、クラッドを厚くすることは Nd:YLF 結晶においても導波路 NA の向上につながることを示した。なおこの特性取得の際の He-Ne レーザの偏光はクラッドに垂直な方向(Fig.10.2 の横方向)の直線偏光になっている。

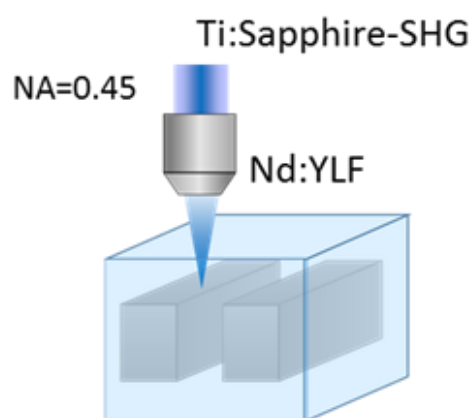


Fig. 10.1 Schematic of waveguide fabrication in Nd:YLF crystal

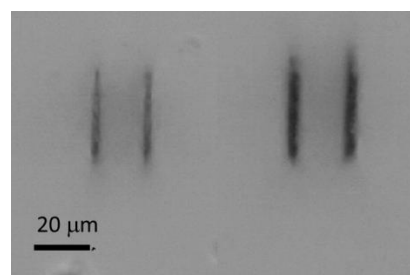


Fig. 10.2 Microscope image of fabricated waveguide with (left) 1.5 μm and (right) 4 μm of clad thickness.

Fig. 11.1 に Nd:YLF 導波路レーザの共振器のセットアップを示す。なお、発振波長である 1047 nm の偏光方向はクラッドに垂直な方向となっている。励起光源として中心波長を 794 nm に設定した Ti:Sapphire レーザ(Spectra-Physics, Mai-Tai)を用い、 $f = 50 \text{ mm}$ のレンズによって集光して導波路に入射した。入射側の端面には 1047 nm で HR のミラーを押しつけており、出射側の端面には何も置いていない。先述の通り,Nd:YLF は利得が大きいいため出力側は端面のフレネル反射のみでも十分発振を達成可能である。なお、Nd:YLF の屈折率は 1.45 程度であるためフレネル反射率は 3%程度である。Fig. 4.19 に各導波路の発振特性を示す。実験の結果、入射した励起光強度に対して WG11 では発振閾値 70 mW, スロープ効率 8%が得られた一方で、WG12 では発

振閾値 40 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. このことから,クラッドを厚くすることによる導波路特性の向上は励起光結合効率を改善し,出力特性の向上にもつながることが示された.

WG12 に励起光を 600mW 入射した条件下における出力光の近視野像を Fig.11.3 に示す. また, 出力光を $f = 75 \text{ mm}$ のレンズでコリメートした後, $f = 200 \text{ mm}$ のレンズで集光し, その集光特性を計測した結果を Fig.11.4 に示す. この結果から,x,y 各方向の M^2 は 1.06×1.9 と見積もられ, 高いビーム品質が実現されていることが示された.

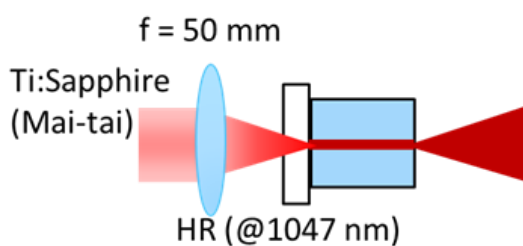


Fig. 11.1 Experimental setup of Nd:YLF waveguide laser cavity

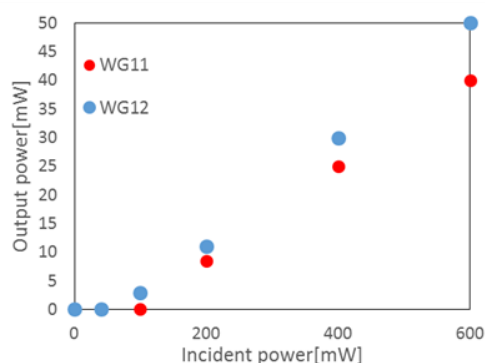


Fig. 11.2 Output characteristic of Nd:YLF waveguide lasers

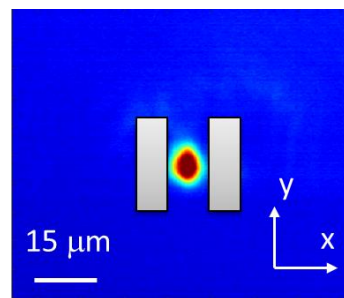


Fig. 11.3 A near-field distribution of guided mode of the laser operating

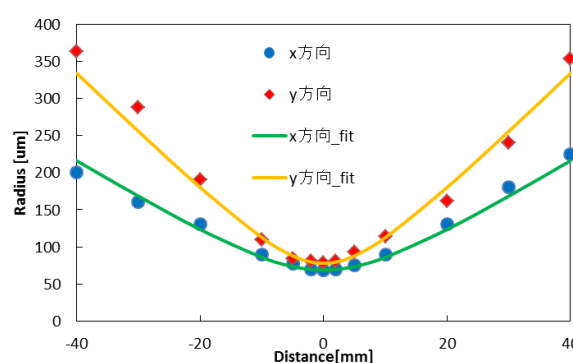


Fig. 11.4 Focusing property of the laser operating

5. Pr:YLF 導波路レーザ発振実験

Pr:YLF は Pr:ZBLAN に比べて誘導放出断面積および小信号利得係数が 1 桁大きく, 大きな利得が得られる. そこで, 可視域でのレーザ発振の実現を目指し Pr:YLF(結晶長 5 mm)内部への導波路レーザの作製を試みた. Fig. 12.1 に導波路作製セットアップを示す. Pr:ZBLAN 導波路作製の場合と同様に, CPA パルスを $NA=0.45$ の対物レンズによって材料の深さ $300 \mu\text{m}$ の位置に集光した. また, パルスエネルギーは $0.5 \mu\text{J}$, パルス幅は 50 fs , トラック間隔は $15 \mu\text{m}$, 走査速度は $500 \mu\text{m/s}$ で, クラッド幅 $6 \mu\text{m}$ の導波路を作製した. 作製した導波路の明視野像を Fig. 12.2 に示す. 続いて他の材料同様に He-Ne レーザによる導波路特性取得を行った結果を Table 3 に示す. なお, この特性取得の際に半波長板を用いて He-Ne レーザの偏光を回転させ, 縦方向と横方向それぞれの偏光方向における導波路特性を取得した.

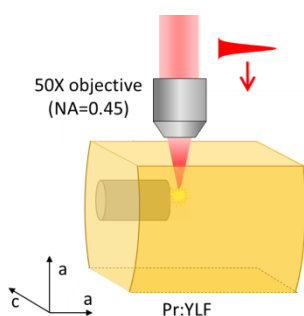


Fig. 12.1 Schematic of waveguide fabrication in Pr:YLF crystal

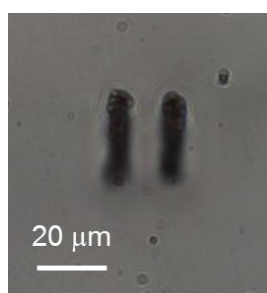


Fig. 12.2 Microscope image of fabricated waveguide with 6 μm of clad thickness.

Table 3 Characteristics of fabricated waveguide in each polarization direction

偏光方向	↑↓	←→
近視野像		
導波路NA	0.021	0.016
伝送損失[dB/cm]	1.84	5.69

この結果から、異方性結晶である Pr:YLF においては導波路のクラッドに垂直な方向(縦方向)の偏光に関しては導波路としての機能が確認されるものの、クラッドに平行な方向(横方向)ほとんど閉じ込めは起きておらず、導波路特性も低くなっていることがわかる。これを踏まえ、Fig. 13 に示すセッ

トアップにおいてレーザ発振を試みた。本実験では励起光学系に半波長板を挿入することで偏光方向を閉じ込めが強い方向に合わせており、この方向は結晶において吸収の大きい π 偏光の励起方向にあたる。しかしながら、本セットアップにおいて励起光強度を 2.2 W(集光レンズ後)まで上昇させても π 偏光に大きな誘導放出断面積を有する 407nm の発振には至らなかった。この時先述した手法で見積もった、吸収された励起光の強度は 223 mW である。作製された導波路の NA が小さかったことにより、励起光の結合効率が小さく導波路内で吸収された励起光の強度が低かったために損失を上回る利得が得られなかったのだと考えられる。したがって、Pr:YLF 結晶において可視域での発振を達成するためには、導波路 NA を向上させるために加工手法の工夫および最適化を行うか、 σ 偏光の閉じ込めが強くなるような方向の導波路を作製し、 σ 偏光で大きな誘導放出断面積を有する 640 nm での発振を目指す必要があるという結論に至った。

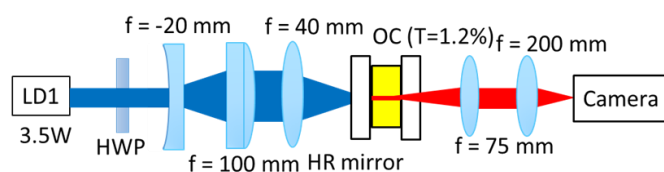


Fig. 13 Experimental setup of Pr:YLF waveguide laser cavity

参考文献

- [1] R. R. Gattass and E. Mazur, Nat. Photonics **4**, 219 (2008).
- [2] J. Kojou, Y. Watanabe, P. Agrawal, T. Kamimura, and F. Kannari, Opt. Comm. **290**, 136 (2013).
- [3] J.-P. Bérubé, M. Bernier, and R. Vallée, Opt. Mater. Express **3**, 598 (2013).