

フェムト秒レーザー直描によるネオジウムイオン添加結晶への導波路レーザー作製

Neodymium doped crystals waveguide laser fabricated by femtosecond laser direct writing

佐藤 琢哉 (B4), 山中 雄介 (M1), 廣澤 賢一 (助教)

Takuya Sato, Yusuke Yamanaka, and Kenichi Hirose

Abstract

We fabricated channel waveguides in Nd:YVO₄ and Nd:YLF crystals with 800-nm and 400-nm femtosecond laser pulses, respectively. The laser oscillation of Nd:YVO₄ at 1064 nm pumped by an 808-nm laser and Nd:YLF 1047 nm pumped by a 792-nm laser have been realized.

1. はじめに

フェムト秒レーザーはその高いピークパワーにより、様々な物質と非線形な相互作用を起こすことができる。その一つが、フェムト秒レーザーによる透明材料内部の加工である。吸収を持たない波長のフェムト秒レーザーを物質の内部に集光照射することにより、多光子吸収過程を経てマイクロ～ナノサイズサイズの屈折率変化が引き起こされる。この屈折率変化を利用し、物質内部に光が導波伝搬できるような加工を施すことができる。フェムト秒レーザー照射による導波路加工は、他のリソグラフィ等の加工方法と比較して安価かつ簡便で自在に 3 次元構造の加工できるという特徴を持っており、これまでにビームスプリッター[1] やブラッググレーティング[2] マッハツェンダー干渉計[3] など様々な光回路作製に応用されている。

また、レーザー媒質となる固体材料内に描画された導波路へ励起光を入射させることにより導波路レーザーとして発振させることも可能である。これまでに、Nd:YAG[4]、Nd:YVO₄[5]、Pr:YLF[6]、Tm:ZBLAN[7]など様々な結晶やセラミック、ガラスでの導波路レーザーの作製とレーザー発振が報告さ

れている。

今回、我々は Nd:YVO₄、Nd:YLF という 2 種類のネオジウムイオンドープ結晶に対して導波路の作製を行った。バルク内部に加工するため、加工用レーザーのスペクトルを各結晶固有の吸収スペクトルと重ならないようにする必要がある。Nd:YVO₄ 結晶加工の際には 800 nm フェムト秒レーザーの長波長成分のカット、Nd:YLF 結晶加工の際には第二高調波発生(SHG)により、加工用レーザーの波長をチューニングした。また、各結晶に書き込まれた導波路対し、CW チタンサファイアレーザーを励起光としてレーザー発振に成功した。

2. 導波路作製

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チタンサファイアレーザー (繰り返し周波数 1 kHz, 中心波長 805 nm, フーリエ限界パルス幅 50 fs) を用いて、Nd:YVO₄ 結晶 (20 mm × 10 mm × 0.5 mm (c 軸)), Nd:YLF 結晶 (5 mm × 5 mm × 2 mm (c 軸)) に対し導波路加工を試みた。しかし、Fig. 1 に示す CPA からの出力のスペクトルが、Fig. 2, 3 に示す各ネオジウム結晶の吸収スペクトルと重なってしまい、一光子吸収が発生してしまう。もし入射パワーが低い場合、入射したパワーのほとんどは集光位置に到達する前に結晶に吸収されてしまい、集光部分での屈折率変化は発生しない。逆に入射パワーが高い場合、結晶表面でのレーザーのパワー密度が高くなってしまい、アブレーションが発生してしまう。したがって、加工用レーザーの波長と結晶の吸収波長が重なるこ

とは好ましくなく、加工用レーザの波長を変える必要がある。

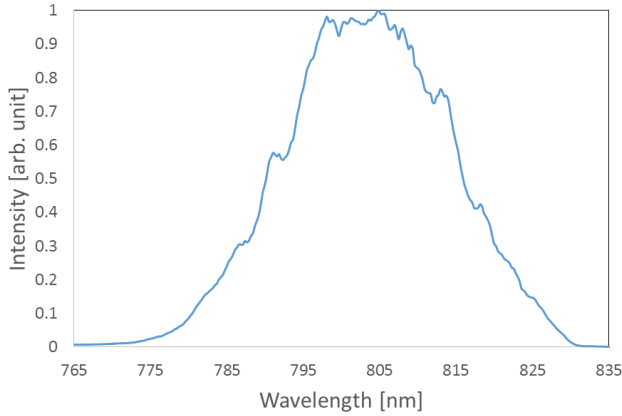


Fig. 1 Output spectrum of our CPA laser system.

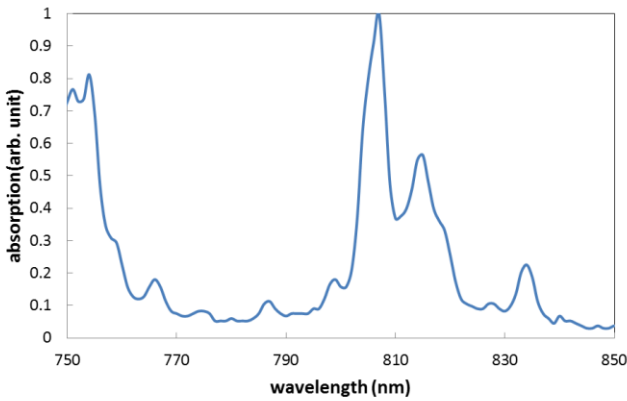


Fig. 2 Absorption spectrum of 1at.% Nd:YVO₄

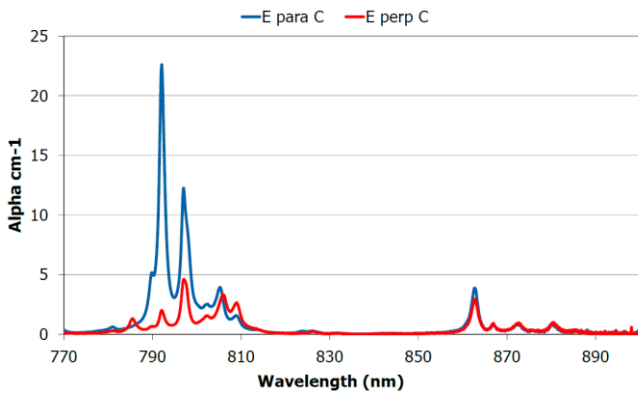


Fig. 3 Absorption spectrum of Nd:YLF[8]

2.1 Nd:YVO₄ 結晶加工

Fig. 2 に示す通り、Nd:YVO₄ 結晶は 800~820 nm 付近に強い吸収をもつ。したがって、Fig. 4 のようにコンプレッサ内にナイフエッジを挿入し長波長成分をカットすることで波長チューニングを行った。これにより得られた CPA のスペクトルを Fig. 5 に示す。

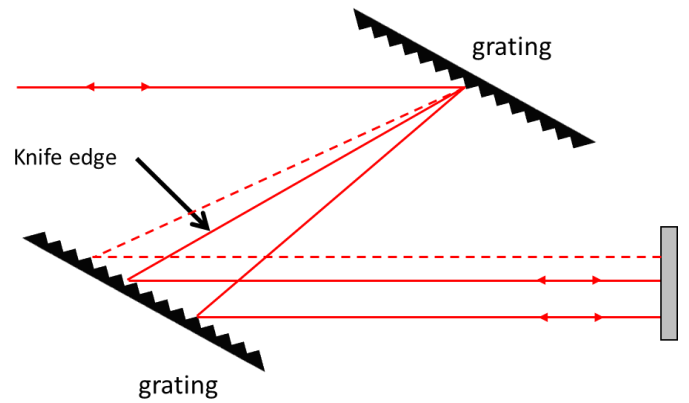


Fig. 4 Schematic of long wavelength cut in pulse compressor

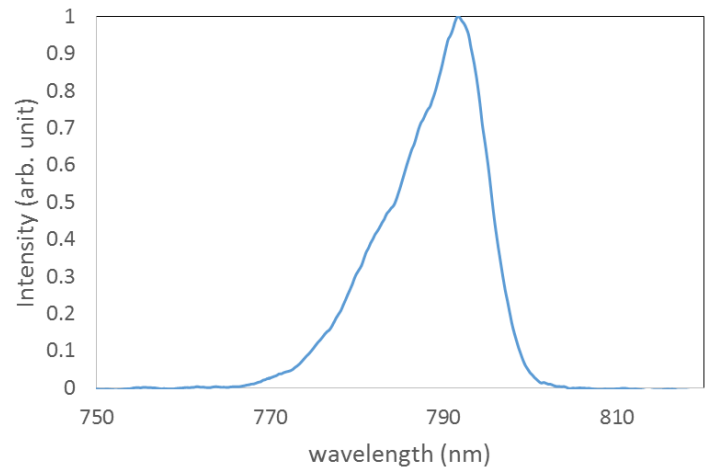


Fig. 5 Output spectrum of writing laser for Nd:YVO₄

20×10×0.5(c 軸) mm³ の Nd:YVO₄ 結晶に対し、Fig. 6 に示すセットアップで導波路長が 10 mm のダブルトラック導波路を作製した。また、加工に用いたパラメータを Table 1 に示す。

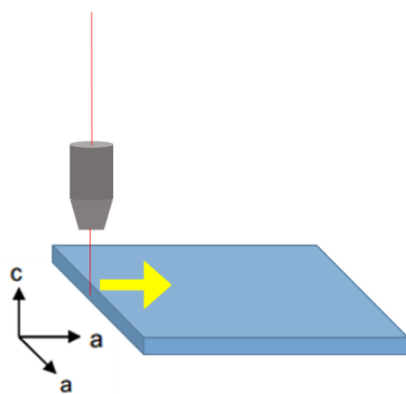
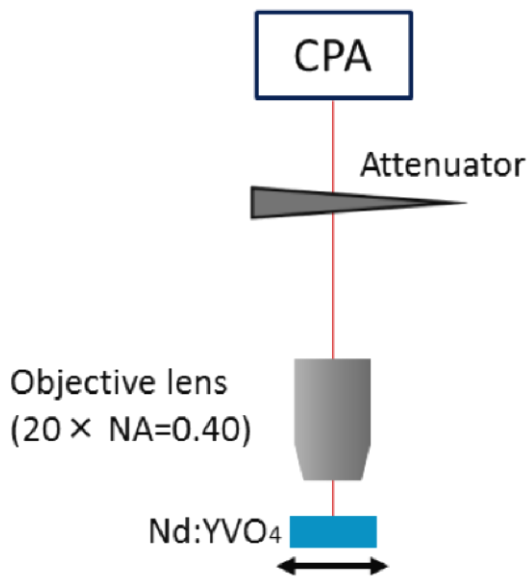


Fig. 6 Experimental setup of Nd:YVO₄ fabrication (upper), Schematic of Nd:YVO₄ fabrication geometry (lower)

Table 1 Parameters for Nd:YVO₄ fabrication

Core diameter	25 μm , 50 μm
Writing speed	50 $\mu\text{m/s}$, 200 $\mu\text{m/s}$
Pulse duration	70 fs, 440 fs, 720 fs, 1150 fs
Pulse energy	7 $\mu\text{J/pulse}$, 3 $\mu\text{J/pulse}$

実際に加工された導波路を位相差顕微鏡にて観察した図を Fig. 7 に示す。この時、加工に用いたパラメータはパルスエネルギー7 μJ , 加工速度 50 $\mu\text{m/s}$, パルス幅 70 fs である。

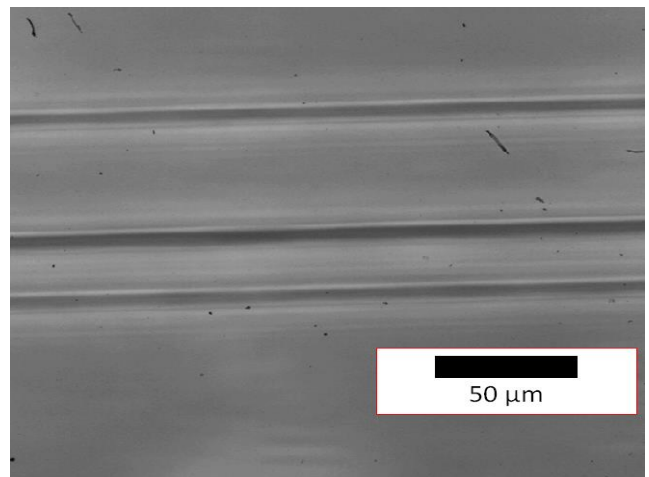


Fig. 7 Nd:YVO₄ waveguide written by 7 $\mu\text{J/pulse}$, 50 $\mu\text{m/s}$, 70 fs pulse duration

加工によって誘起された屈折率の変化を光学顕微鏡の明視野像を用いて測定したところ[9], およそ 1.0×10^{-3} と見積もられた。したがって, 作成された導波路の NA はおよそ 0.063 である。

2.2 Nd:YLF 結晶加工

Fig. 3 に示す通り, Nd:YLF 結晶は 790~810 nm に強い吸収を持つ。したがって, Nd:YVO₄ 結晶と同様の方法を用いることはできない。そこで, 我々は CPA の第二高調波 (SHG) を用いて加工を行うことにした。

SHG を発生させるために, TYPE II, 厚さ 2 mm の BBO 結晶を用いた。発生した SHG のスペクトルを Fig. 8 に示す。スペクトル幅が約 2 nm であることから, 基本波がフーリエ限界の時のパルス幅は約 120 fs と見積もられた。

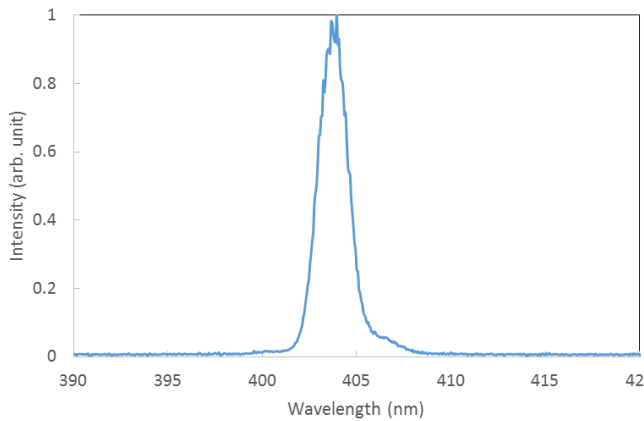


Fig. 8 Output spectrum of writing laser for Nd:YLF

5×5×2(c 軸) mm³ の Nd:YLF 結晶に対し, Fig. 9 に示すセットアップで導波路長が 5 mm のダブルトラック導波路を作製した. また, 加工に用いたパラメータを Table 2 に示す.

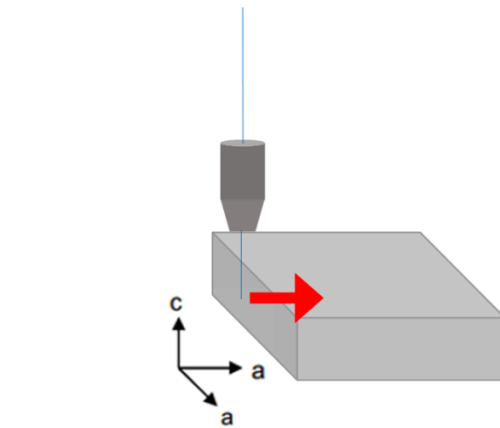
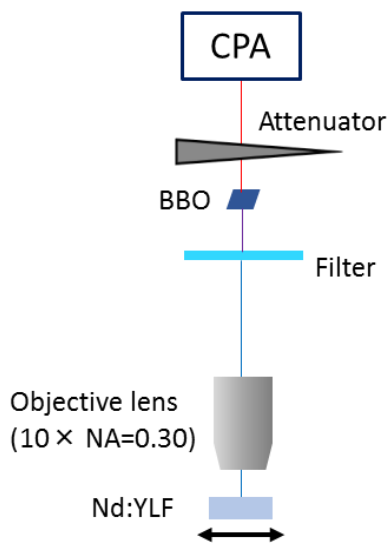


Fig. 9 Experimental setup of Nd:YLF fabrication(upper), Schematic of Nd:YLF fabrication geometry(lower)

Table 2 Parameters for Nd:YLF fabrication

Core diameter	25 μm, 50 μm
Writing speed	50μm/s, 200μm/s
Pulse energy	3μJ/pulse, 1μJ/pulse



実際に加工された導波路を位相差顕微鏡にて観察した図を Fig. 10 に示す. この時, 加工に用いたパラメータはパルスエネルギー3 μJ, 加工速度 50 μm/s, である.

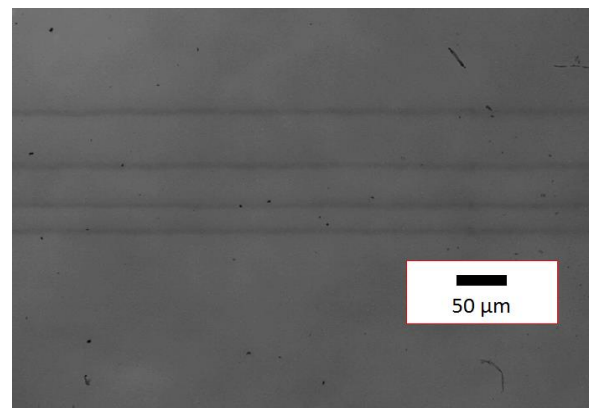


Fig. 10 Nd:YLF waveguide transverse section written by 3 μJ/pulse 50 μm/s

屈折率変化を Nd:YVO₄ 結晶と同様に測定したところ, およそ 1.0×10^{-3} と見積もられた. したがって, 作成された導波路の NA はおよそ 0.054 である.

3. 導波路特性計測

作製した導波路に、結晶の吸収がない波長にチューニングした波長可変のチタンサファイアレーザーを入射し、導波路特性を計測した。コア径 $50\ \mu\text{m}$ の Nd:YVO₄ 結晶導波路の近視野像を Fig. 11 に示す。このように、導波路内に十分光が閉じ込められており、導波路として機能していることがわかる。このとき、V ナンバーはトラック幅を a とすると、

$$V = \frac{\pi a \text{NA}}{\lambda} \approx 10.6$$

となり、2.405 を大きく超えているため、この導波路はマルチモードの導波路として機能している。

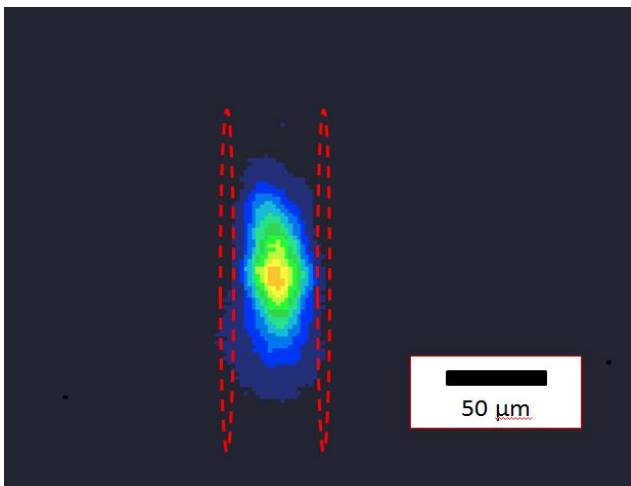


Fig. 11 Near-field image of Nd:YVO₄ waveguide (core diameter $50\ \mu\text{m}$)

同様に Nd:YLF 結晶に作成したコア径 $50\ \mu\text{m}$ の導波路の近視野像を Fig. 12 に示す。Nd:YVO₄ 結晶と比較すると、NA が小さい関係上、多少の染み出しがあるものの、導波路として機能していることがわかる。

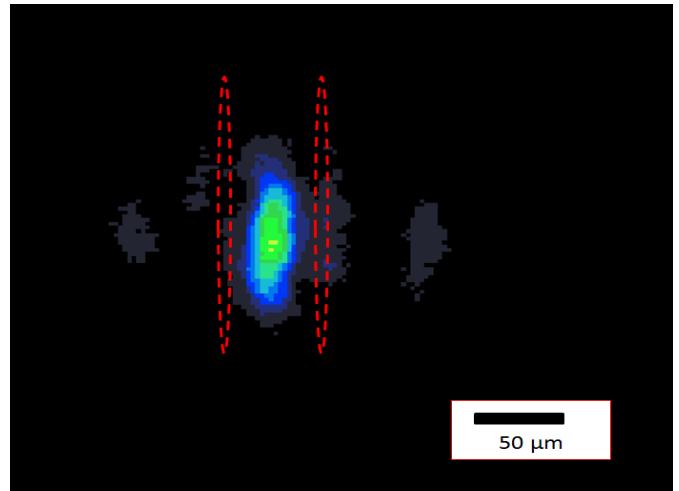


Fig. 12 Near-field image of Nd:YLF waveguide (core diameter $50\ \mu\text{m}$)

4. レーザ発振実験

波長可変のチタンサファイアレーザーを励起光に用い、Fig. 13 に示すセットアップでレーザー発振を試みた。励起光はそれぞれの結晶の吸収がピークとなる波長に合わせた ($808\ \text{nm}$ (Nd:YVO₄), $792\ \text{nm}$ (Nd:YLF))。

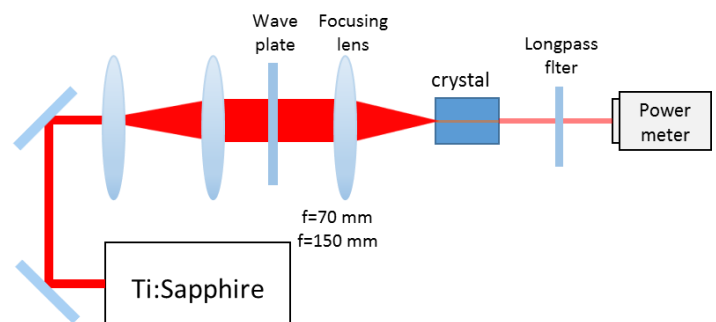


Fig. 13 Experimental setup of exciting optical system

Fig. 14 に Nd:YVO₄ 結晶の出力側で得られたスペクトルを示す。入射パワーが高いときは、低いときと比較して明らかに鋭いスペクトルが立っており、レーザー発振していると判断できる。また、Fig. 15 に、パルスエネルギー $7\ \mu\text{J}$ 、加工速度 $50\ \mu\text{m/s}$ 、パル

ス幅 70 fs の加工パラメータで作製された導波路への、入射パワーと出力パワーの関係を示す。この結果より、コア径が 50 μm の導波路の入射パワーのしきい値はおよそ 700 mW、入射パワーに対するスロープ効率はおよそ 15 % であり、コア径が 25 μm の導波路の入射パワーのしきい値はおよそ 400 mW、入射パワーに対するスロープ効率はおよそ 20 % であった。また、加工エネルギー、加工速度、パルス幅による結果の違いはほとんど見られなかった。

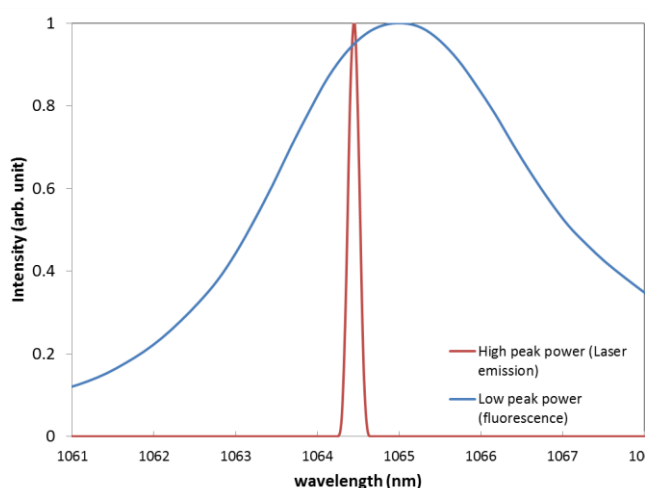


Fig. 14 Nd:YVO₄ emission spectrum change below and above the threshold pump power.

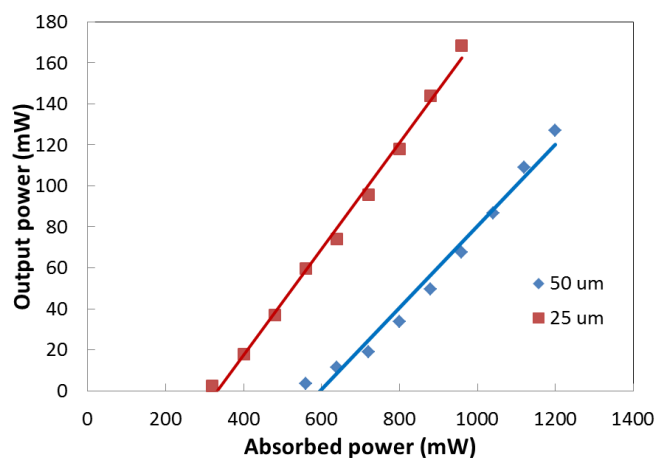


Fig. 15 Dependence of output power at 1064 nm on incident pump power

同様の実験を、Nd:YLF 結晶に対しても行った。しかし、励起光のパワーを 1.5 W まで上げててもレーザ発振は得られなかった。そこで、励起光の入射面に接するように励起光全透過、発振光全反射の平面ミラーを設置した。その結果、Fig. 16 のような結果が得られ、レーザ発振が確認された。また、Fig. 17 に、コア径 50 μm 、パルスエネルギー 3 μJ 、加工速度 50 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、パルス幅 120 fs の加工パラメータで作製された導波路への、入射パワーと出力パワーの関係を示す。この結果より、入射パワーのしきい値はおよそ 1.1 W、入射パワーに対するスロープ効率はおよそ 31 % であり、入射パワーを 1.5 W まで上げた時の最大出力パワーは 127 mW であった。加工エネルギー、加工速度、パルス幅による結果の違いはほとんど見られず、コア径が 25 μm の時は、導波路の NA に対し、集光の NA が大きすぎたため発振しなかった。

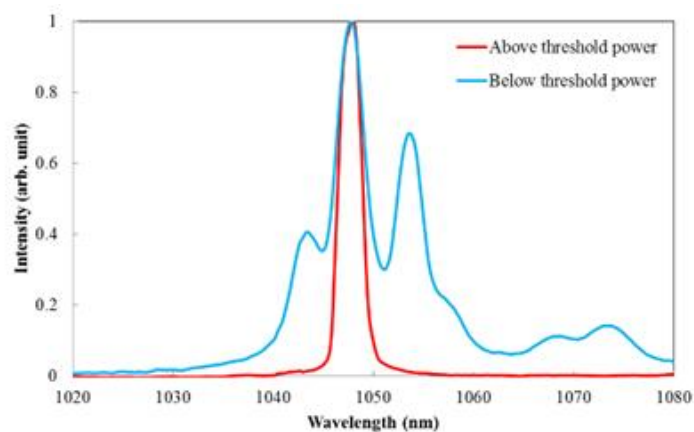


Fig. 16 Nd:YLF emission spectrum change below and above the threshold pump power.

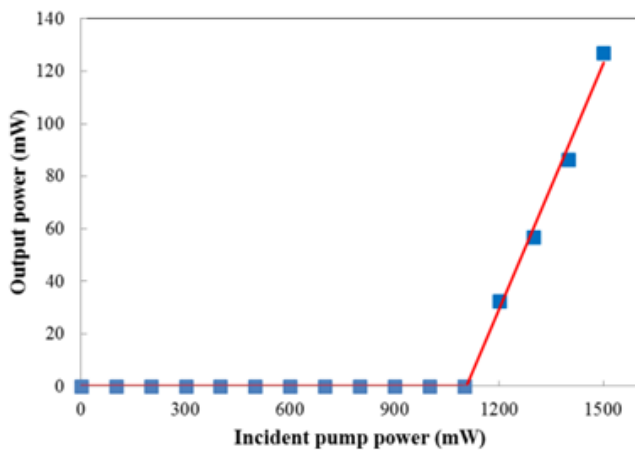


Fig. 17 Dependence of output power at 1047 nm on incident pump power

5. まとめ

フェムト秒レーザを集光照射することによりネオジウムイオンドープ結晶内部に導波路を作製し、ビームクオリティの良いチタンサファイアレーザを励起光に用いた導波路レーザの作製に成功した。導波路加工の際、Nd:YVO₄ 結晶加工には長波長成分のカット、Nd:YLF 結晶加工には SHG を利用することで、一光子吸収の起きるスペクトルをもつレーザによる加工を実現した。特に SHG による加工は、広い吸収スペクトルを持つ結晶内部に加工をする手段の一つとして期待できる。

References

- [1] W. Watanabe, T. Asano, K. Yamada, K. Itoh, and J. Nishii, "Wavelength division with three-dimensional couplers fabricated by filamentation of femtosecond laser pulses.," *Opt. Lett.* **28**, 2491–2493 (2003)..
- [2] A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, and I. Bennion, "Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser," *Electron. Lett.* **40**, 1170 (2004).
- [3] Y. Liao, J. Xu, Y. Cheng, Z. Zhou, F. He, H. Sun, J. Song, X. Wang, Z. Xu, K. Sugioka, and K. Midorikawa, "Electro-optic integration of embedded electrodes and waveguides in LiNbO₃ using a femtosecond laser.," *Opt. Lett.* **33**, 2281–2283 (2008).
- [4] A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov, I. Khrushchev, and J. Mitchell, "Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG:Nd³⁺ crystal by femtosecond laser writing.," *Opt. Lett.* **30**, 2248–2250 (2005).
- [5] Y. Tan, F. Chen, J. R. Vázquez de Aldana, G. A. Torchia, A. Benayas, and D. Jaque, "Continuous wave laser generation at 1064 nm in femtosecond laser inscribed Nd:YVO₄ channel waveguides," *Appl. Phys. Lett.* **97**, 031119 (2010).
- [6] S. Müller, T. Calmano, P. Metz, N.-O. Hansen, C. Kränkel, and G. Huber, "Femtosecond-laser-written diode-pumped Pr:LiYF₄ waveguide laser.," *Opt. Lett.* **37**, 5223–5 (2012).
- [7] D. G. Lancaster, S. Gross, H. Ebendorff-Heidepriem, K. Kuan, T. M. Monro, M. Ams, a Fuerbach, and M. J. Withford, "Fifty percent internal slope efficiency femtosecond direct-written Tm³⁺:ZBLAN waveguide laser.," *Opt. Lett.* **36**, 1587–9 (2011).
- [8] Northrop Grumman Corporation HP より
- [9] E. D. Barone-Nugent, a. Barty, and K. a. Nugent, "Quantitative phase-amplitude microscopy I: Optical microscopy," *J. Microsc.* **206**, 194–203 (2002).