

# Pr<sup>3+</sup>ドープフッ化ガラスファイバレーザーの波長同調パルス発振

## Wavelength tunable Q-switch laser in visible region with Pr<sup>3+</sup>-doped fluoride-glass fiber pumped by GaN diode laser

小城 絢一朗(D3)

Junichiro Kojou

### Abstract

We demonstrate pulse laser operation of a 4-cm-long Pr<sup>3+</sup>-doped fluoride-glass fiber laser pumped by GaN-based laser diodes (444 nm) using an acousto-optic modulator Q-switch. We obtained maximum laser peak power of 105.6 W (2.1 μJ/pulse) with a pulse width of 20 ns at an 8.3-kHz repetition rate for a 607-nm wavelength. Employing a prism tuning cavity, we obtained wavelength tunable Q-switch pulse laser oscillation in the visible region (488-491, 520-526, 601-624 and 631-644 nm).

### 1. はじめに

近年、ディスプレイ、バイオイメーjing、フォトリソグラフィといった多岐にわたる分野で可視光レーザーは注目されている。Pr<sup>3+</sup>をドープしたフッ化物材料は、青色から赤色にかけて多数の光学遷移があり、InGaN系半導体レーザーにより直接励起が可能である[1-3]。Pr<sup>3+</sup>:YLFレーザーでは、レッド、オレンジ、グリーン帯域でのCW発振および、AO-Qスイッチ動作によるパルス化、SHGの発生を実現した[4]。本研究では、Pr<sup>3+</sup>ドープフッ化ガラスファイバ(PDF)を使用した。本ファイバは444nm帯の大きな吸収断面積から10cm未満で励起光を完全に吸収する[5]。Pr:YLFレーザーと比較してPDFレーザーの利点は吸収帯域が広く励起光の吸収率が高い、そして10 μm以下のコア径閉じ込められるた

めレーザー利得が高く、広帯域の波長可変が行えることである。これまで、Pr:YLF等の結晶を用いたレーザー発振ではパルス化が報告されているが、PDFレーザーでのパルス化は報告されていない。

### 2. 実験1：フリーランニング発振

ファイバ長4cm、コア径8 μm、NA=0.23、ドープ濃度3000 ppmのフッ化物ファイバを使用した。ファイバ端面はARコートされており、フレネル反射による赤色発振を抑えている。Fig.1にPDFレーザーの実験セットアップを示す。励起源は最大出力1Wと500 mWのInGaN LD (Nichia Co.) 2台を使用しPBSを用いて偏光重畳しファイバに入射させた。励起レーザーのビーム品質は1W(500 mW)それぞれM<sup>2</sup>=1.3 (fast axis) × 5.4 (slow axis) (1.1×5.2)であった。励起レーザーを4.6 (3.1) mmのレンズでコリメートし、焦点距離30 (20) mmと100(100) mmのシリンダリカルレンズを用いて広がり角の小さい方のビームを広げた。f=7.5 mmのレンズでファイバに集光した。その時のスポット径を計測するために焦点距離の長いf=200 mmのレンズで絞りを絞って、CMOSイメージセンサでビーム径を計測しその値を用いてf=7.5 mmで集光した時のビーム径を換算した。その結果1 WLDのビーム径は5.1 μm (NA=0.15) × 6.8 μm (NA=0.25)、500 mWのLDのビーム径は5.5 μm (NA=0.15) × 5.7 μm (NA=0.21)となった。単純なM<sup>2</sup>広いがりでの見積もり値と一致しないのは、LDの等価発光点が縦と横方向が一致しないため

ある。入射側に使用したミラーは HR@488-590 nm と HR@580-650 nm の二枚を各帯域に応じて使用した。ファイバ出射側の直後にコリメート用の  $f=7.5$  mm のレンズを使用した。赤とオレンジの出力鏡は透過率  $T=40\%$  の使用し、グリーン用には  $T=10\%$ 、シアン用には  $T=2\%$  のミラーを使用した。

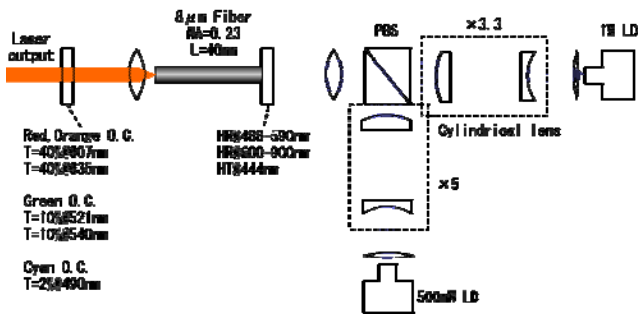


Fig.1 Experimental setups of CW PDF laser

赤色とオレンジは発振利得が高く、本実験に用いた HR 鏡の反射帯域と、同程度の透過率の取り出し鏡から成る共振器では同時発振してしまう。単独波長の出力特性を計測することができなかつたため、赤とオレンジ両方を合わせたパワーとしてプロットしている。その時の赤色の中心波長は 636 nm, オレンジの中心波長は 607 nm であった。最大 1 W で励起したときに、380 mW の出力が得られた。その時のスロープ効率は 43% であった。グリーン (521 nm) の発振閾値は 190 mW, 1 W 励起で 258 mW の出力が得られた。スロープ効率は 32% であった。シアンの発振閾値は 220 mW, 1 W 励起で 147 mW の出力が得られた。スロープ効率は 20% であった。ファイバ出射側のコリメートレンズの位置を前後させることで赤色とオレンジの同時発振を低パワー励起の時は調整することができる。これは赤とオレンジで 30 nm 波長が違うので色収差によりフォーカスする位置が少しだけ異なることから微調が利くためである。しかし、高い励起パワーのときは同時発振するので赤のみを取り出したい場合は共振器内に複屈折フィルタを挿入し特定波

長のみ増幅されるように工夫しなければいけない。しかし、赤、オレンジ帯においては複屈折フィルタ (3 mm 長) を用いても完全にシングルライン発振にすることができない波長帯もある。利得が低い帯域ではシングルライン発振をする波長帯もある。Fig.3 に 1W 励起時の赤、オレンジ同時発振スペクトルを示す。

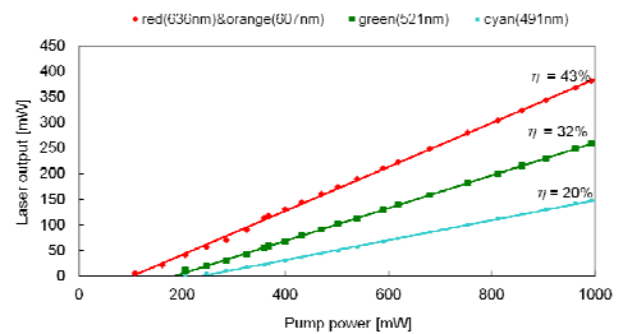


Fig.2 Plots of the output power at 637nm & 607nm, 522 nm, 491nm as a function of absorbed pump power.

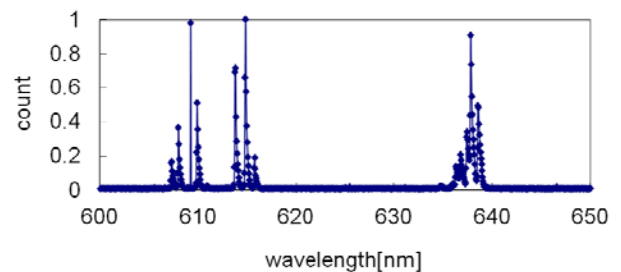


Fig.3 Multiline oscillation at red and orange spectrum.

### 3. 実験 2 : CW 波長可変動作

共振器内にプリズム (SF10) を挿入し、, 波長同調実験を行った。その時の実験セットアップを Fig.4 に示す。

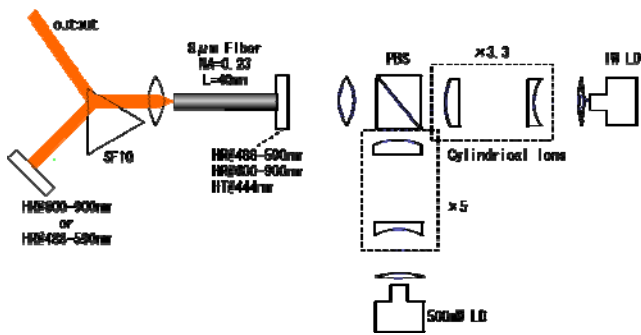


Fig.4 Experimental setup of wavelength tunable PDF laser pumped by GaN Laser diodes.

入射側には HR@488-590 nm と HR@600-900 nm の 2 枚のミラーを使用した。出射側にも同様のミラーを使用し、シアンから近赤外域にかけての波長同調実験を行った。使用している光学系レンズ、ミラーは全て 400-650 nm 帯で AR コートされているものを使用しているが、650 nm より長い波長帯では AR コートされていないものを使用しているため、近赤外域の発振特性はベストパフォーマンスの特性とは言えない。この光学系でのフリーランニング時の発振閾値は 20 mW (607 nm)であったが、プリズムを挿入したことによりロスが増え発振閾値は 60 mW になった。この時の波長同調特性および出力特性を Fig.5 に示す。同調域は 488-495, 518-544, 600-624, 631-645, 720-728, 889-890 nm であった。この時 488-645 nm は吸収パワー1Wの時の出力特性であり、720-890 nm は 450 mW で励起した時の出力特性である。近赤外域を 450 mW で励起した理由は 500 mW に上げた際突然ファイバが破損したためである。フォトダークニングの影響により壊れたのか調査する必要があるが、現在のところ破損した理由はわかっていない。今回、レーザー出力は、プリズムのブリュースター面での反射を用いた。すなわち、ファイバーが偏光保持ではないことによる偏光散乱による直交成分を取り出している。したがって、取り出し効率は最適化されていない。

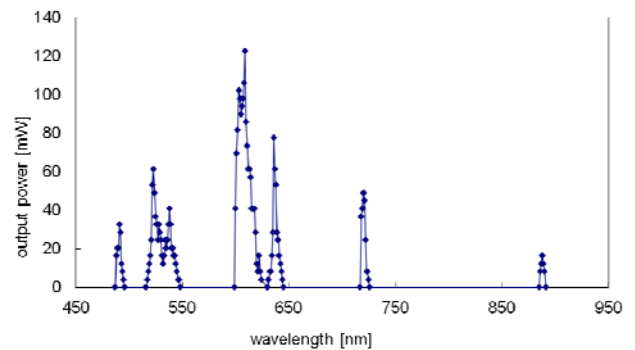


Fig.5 Tunability of cw Pr: fiber laser.

#### 4. 実験 3 : AO-Q スイッチ動作

Fig.1 の実験セットアップのファイバ出射直後のコリメートレンズの後に音響光学素子 AOM を挿入し Q スイッチ動作を行った。AOM の ON-OFF シーケンスは ON 110  $\mu$ s, OFF 10  $\mu$ s, 繰り返し周波数 8.33 kHz とした。ON の時間は蛍光寿命の 2 倍程度にすることで、短パルス化することができ、これより長くエネルギーを溜めてもパルス幅が短くなることはなく繰り返し周波数が下がって行くだけである。PDF の蛍光寿命は  $\sim$ 50  $\mu$ s ほどである。そこで我々は AO-Q スイッチ動作を行う際は蛍光寿命の 2 倍の時間を ON にすることにした。

音響光学素子の最大回折効率 は 90% である。可視光域の音響光学素子のロス は 3% である。共振器長は 100 mm, 出力鏡 T=40%@607 nm のものを使用しオレンジパルス発振させた。AOM 挿入後の閾値は 120 mW であった。最大 370 mW ( $r=3.1$ ) で励起したときの特性を Fig.6 に示す。370 mW 以上励起した際は音響光学素子の 0 次回折による CW 発振を抑制することができず、CW 発振と Q スイッチが合わさったものになる。そこで今回は 370 mW 励起で計測を中断した。370 mW で励起した時の最大ピークパワーは 105.6 W, パルス幅は 20 ns, パルスエネルギーは 2.1  $\mu$ J であった。さらなる短パルス化を目指すには透過率の高いミラーを使用して

CW 発振抑制し共振器寿命を短くし、CW 発振を抑制する必要がある。

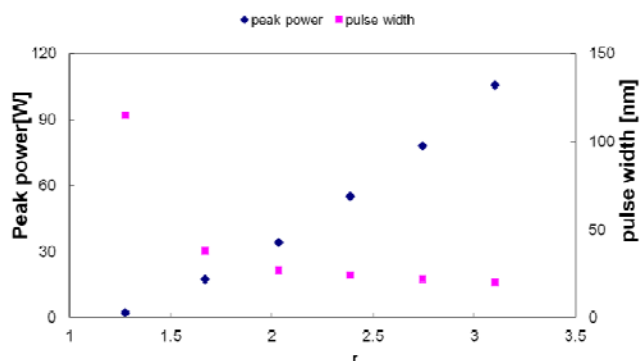


Fig.6 Plots of Q-switched 607 nm laser peak power obtained from straight cavity as a function of initial inversion ratio  $r$ , defined by absorbed pumping laser power divided by threshold pumping power (=120 mW).

## 5. 実験 4 : AO-Q スイッチ波長可変動作

Fig.4 の実験セットアップのファイバ出射直後のコリメートレンズの後に AOM を挿入し Q スイッチ動作を行った。フリーランニング時の発振閾値は 20 mW (607 nm), プリズム挿入により閾値は 60 mW になり, AOM を挿入したことで発振閾値は, 71 mW となった。AOM の ON-OFF シーケンスは実験 3 同様の ON 110  $\mu$ s, OFF 10  $\mu$ s, 繰り返し周波数 8.33 kHz で動作させた。この実験セットアップの共振器長は 200 mm である。488-526 nm 帯での励起パワーは 800 mW で実験し, 601-644 nm 帯は 450 mW で実験を行った。これは実験 3 でも報告したように AOM の回折効率 90%では CW 発振を止めることができないため, 上記のようなパワーで実験を行なっている。その時の波長同調および出力特性を Fig.7 に示す。PDF の蛍光スペクトルを 2 台のスペクトルアナライザーを使用して計測を行いオーシャンオプティクス製の HR4000 で 450 -650nm の蛍光を計測し, 相馬光学社製の分光

器 Fastevert S-2600 を使用して 650-950nm の蛍光を計測し 634nm で規格化した。その結果を Fig.7 に示す。

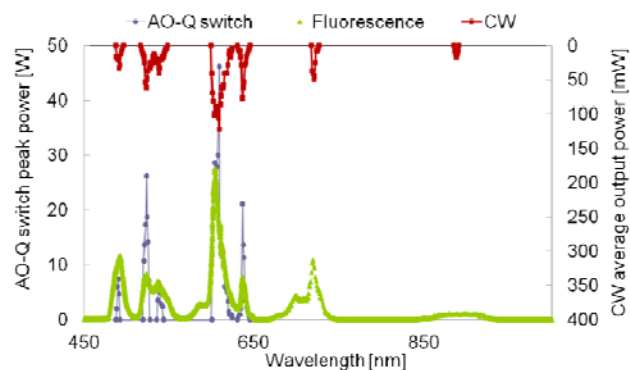


Fig.7 Tunability of CW and Q-switched Pr: fiber laser. The fluorescence spectrum is also shown. Note that the fluorescence was measured by different spectrometers for the wavelength region (450- 650 nm) and (650-950 nm) and normalized at 634 nm.

## 6. まとめ

我々は InGaN LD とファイバ長 4cm の PDF を使用して波長可変 Q スイッチ動作の実証を行った。その時の波長同調幅は( $\lambda$ =488-491, 520-526, 536-542, 601-624 and 631-644 nm)である。CW 波長同調では, ( $\lambda$ =488-495, 518-544, 600-624, 631- 645, 720-728 and 886-890 nm)とシアンから近赤外までの同調をすることが出来た。直線共振器での AO-Q スイッチ動作では 370 mW 励起時, 最大ピークパワー105.6 W(2.1  $\mu$ J/ pulse), 20 ns, 8.3 kHz が得られた。可視領域におけるパルス PDF レーザはバイオイメージングなどのアプリケーションに使用できると期待される。

## References

[1] T. Sandrock, T. Danger, E. Heumann, G. Huber, and B. H. T. Chai, App. Phys. B 58

(1994) 149-151.

- [2] A. Richter, N. Pavel, E. Heumann, G. Huber, D. Parisi, A. Toncelli, M. Tonelli, A. Dening, and W. Seelert, *Opt. Express* **14** (2006) 3282-3287.
- [3] K. Hashimoto and F. Kannari, *Opt. Lett.* **32** (2007) 2493-2495.
- [4] J. Kojou, Y. Watanabe, H. Nemoto, F. Kannari *Appl. Opt.* vol.51 (2012) (in press).
- [5] T. Miyoshi, T. Kozaki, T. Yanamoto, Y. Fujimura, S. Nagahama, and T. Mukai, *J. Soc. Info. Display* **15** (2007) 157-160.