

受動 Q スイッチ Pr³⁺ドープフッ化ガラスファイバレーザ

Passively Q-switched Pr³⁺-doped Fluoride Glass Fiber Laser

田中 裕樹 (M1)

Hiroki Tanaka

Abstract

In this paper an attempt to realize a passively Q-switched Pr³⁺-doped fiber laser is reported. As a saturable absorber we employ mainly a Cr⁴⁺:YAG crystal, which is widely used for Q-switched Nd-doped lasers at 1 μm, and also SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror). As it turns out the Q-switch operation is not observed so a discussion about why such operation is not achieved is described.

1. はじめに

Pr³⁺イオンは可視領域において複数の輻射遷移を持ち、これまで Pr³⁺イオンを利得媒質として、Pr³⁺:YLF (LiYF₄)を始めとした複数の固体レーザが報告されている[1,2]. 特に InGaN 青色半導体レーザの登場以来、Pr³⁺の 440 nm 周辺の吸収バンドへ直接励起が可能となったことでより高効率なレーザ発振が可能となった。Pr³⁺レーザの発振波長はシアン(~490 nm), 緑(~520 nm), オレンジ(~610 nm), 赤(~640 nm), 及び近赤外(~720 nm)の 5 つである。今回我々が扱うのは Pr³⁺ドープフッ化ガラスファイバレーザであり、これまでに藤本らによって上で挙げた内 4 つの波長において高効率な cw レーザが報告されている[3]. また不均一媒質であるが故の広い利得帯域を活かし、波長可変な cw レーザ[4]及び波長可変受動 Q スイッチレーザ[5]が実現している。今回我々が試みた、可飽和吸収体を用いた Q スイッチ動作は Pr³⁺ファイバレーザでは未だ報告がなされていない。広い利得特性を活かした受動モード同期超短パルスレーザの実現に向けて、受動 Q スイッチ動作は重要な第一歩である。

可飽和吸収体として我々はまず、従来 Nd:YAG レー

ザを始めとした、1-μm レーザの受動 Q スイッチ動作に用いられてきた Cr⁴⁺:YAG 結晶に着目した。我々はこれまでに Cr⁴⁺:YAG が可視域においても可飽和吸収特性を持つことを見出し[6], これを用いた Pr³⁺:YLF 受動 Q スイッチレーザをオレンジ, 赤の波長域において実現している。本可飽和吸収体を Pr³⁺ファイバレーザに適用し、受動 Q スイッチ動作を試みた。また、半導体可飽和吸収ミラー(SESAM)を用いた試みも合わせて報告する。しかしながら今までのところ、これらの可飽和吸収体による受動 Q スイッチ動作は確認出来ていないため、その原因について考察する。

2. cw 発振特性

まず Pr³⁺ファイバレーザの cw 発振特性について述べる。フッ化ガラスにドープした Pr³⁺のエネルギー遷移は Fig. 1 に示すよう 5 つ存在する。

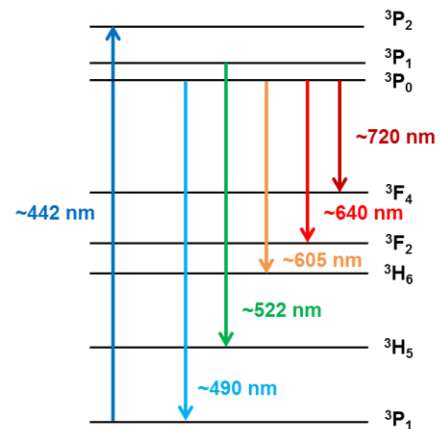


Fig. 1 Energy diagram of Pr³⁺ doped in fluoride glass

図に示すよう 442 nm を中心とした広い吸収バンドが存在するため、InGaN 半導体レーザ(~440 nm)によって直接励起が可能であり、シアン(~490 nm)を除いた遷移は

4 準位のレーザとして機能する. Fig. 2 に示すのが実際に用いた住田光学ガラス(株)製の Pr^{3+} ドープフッ化ガラスファイバである. コアとクラッドが非常に硬いジルコニアフェルルールで覆われた構造をしている.



Fig. 2 Photograph of the employed Pr-doped fluoride fiber fabricated by Sumita Optical Glass Inc.

ファイバ長 4 cm, ドープ濃度 3000 ppm, コア径 11 μm , N.A. 0.30, 入射面に 600 から 670 nm にかけて HR コート, 430 から 480 nm にかけて AR コートされ, かつ出射面をフレネル反射による発振を防ぐために 8 度にカットされたものを使用し, Fig. 3 に示すレーザを構成した.

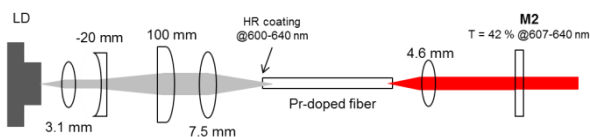


Fig. 3 Experimental setup of cw Pr-doped fiber laser

励起光として 3.5 W 出力の InGaN 半導体レーザを用いている. 発振波長を吸収が最も良い 442 nm に固定する為に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冷却温度を 20°C に固定している. 縦横比が大きく異なる励起光は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, 焦点距離 7.5 mm の非球面レンズによってファイバ入射面に集光される. 焦点距離 150 mm のレンズで集光されたビームを CMOS イメージセンサ(解像度 1.75 μm)で取得したビームプロファイルを Fig. 4 に示す. ビーム形状は長方形となっているが, これは半導体レーザのエミッタの形状を反映した結果である. この時のスポットサイズが縦横それぞれ 40 x 110 μm であったことから, 焦点距離 7.5 mm のレンズ

を用いた場合の集光スポットサイズは 2.0 x 5.5 μm であると見積もられる.

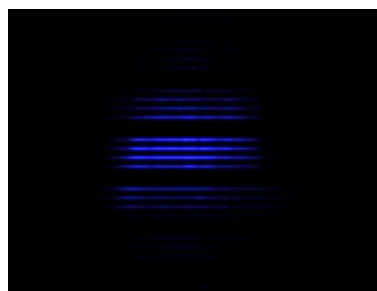


Fig. 4 Profile of focused pump beam

Fig. 5, 6 に得られた出力特性, 最大励起時のスペクトルを示す. 波長 600-610, 630-640 nm 波長域で発振し, 得られたスロープ効率 は 24 % であった.

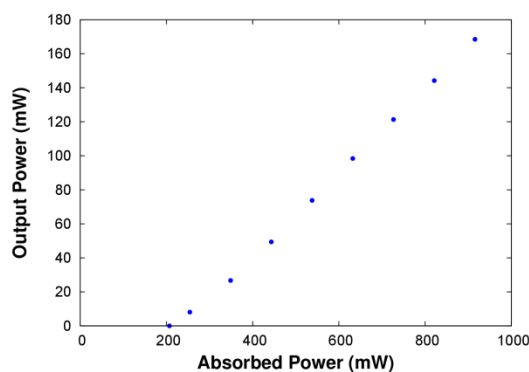


Fig. 5 Input-output power characteristics Pr-doped fiber laser in cw mode

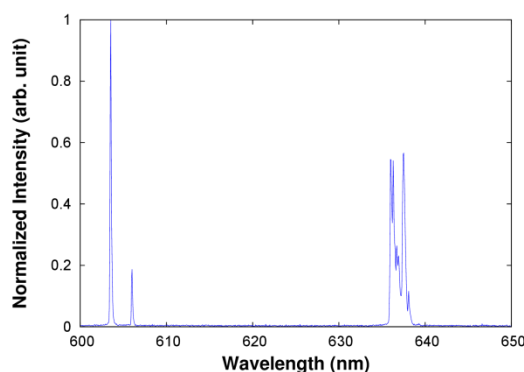


Fig. 6 Spectrum of Pr-doped fiber laser with absorbed pump power of 1.1 W

Fig. 5 の横軸の吸収パワーは, 集光された励起光のエネルギーから透過したエネルギーを引いたものとして

いる。用いたファイバの 442 nm の励起光に対する吸収係数は 0.56 /cm であることから、4 cm のファイバによって入射したパワーの内 89.4 % が吸収される計算である。ファイバ入射面に集光されたビームの一部はファイバ端面において散乱またはクラッドを伝搬するため、厳密にどれだけの励起光がファイバコアで吸収されるかは評価が難しいが、もし仮にクラッド伝搬光がないと仮定すると励起光のコアへの結合効率は 94 % と見積もることができる。ここで得られた出力特性は藤本らの報告 [7] (赤色の発振においてスロープ効率 42.4 %, 605, 638 nm でのアウトプットカップラー透過率はそれぞれ 39.1, 19.2 %) と比較して大きく劣っている。この原因として、我々が用いたアウトプットカップラーの透過率が最適でないこと、共振器内のレンズによる損失が挙げられる。特に藤本らはファイバ両面にコーティングを施している為に共振器内損失が我々のそれと比べて非常に小さいと考えられる。

3. Cr⁴⁺:YAG 可飽和吸収体を用いた Q スイッチ動作の試み

Cr⁴⁺:YAG 可飽和吸収体を共振器内に挿入し、受動 Q スイッチ動作を試みた。実際に用いた Cr⁴⁺:YAG 結晶は厚さ 1.3 mm, 初期透過率 88 %, 両面を波長 640 nm に対して AR コートされている。面方位は一般に 1- μ m レーザに用いる際と同様<100>である。Fig. 7 に実験セットアップを示す。Cr⁴⁺:YAG 結晶はファイバ出射面に密着する形で配置している。



Fig. 7 Experimental setup of passively Q-switched Pr-doped fiber laser by utilizing a Cr⁴⁺:YAG saturable absorber

また、共振器内のパワーを大きくするために、600 から 640 nm の波長にかけて透過率 2 % のアウトプットカップ

ラーを使用した。この時の発振閾値は 213 mW であり、最大出力 12 mW を得た。しかしながら Q スイッチ動作を確認することが出来ず、cw レーザとして発振した。出力から共振器内のパワーを見積もると、

$$(\text{Intracavity Power}) = \frac{(\text{Output Power})}{-\ln(R)}$$

の関係から 594 mW と計算出来る。ファイバと Cr⁴⁺:YAG の間に隙間がないと仮定すると、Cr⁴⁺:YAG 内のビーム半径の分布は Fig. 8 のようになっている (M² 因子を 8.5 とした)。

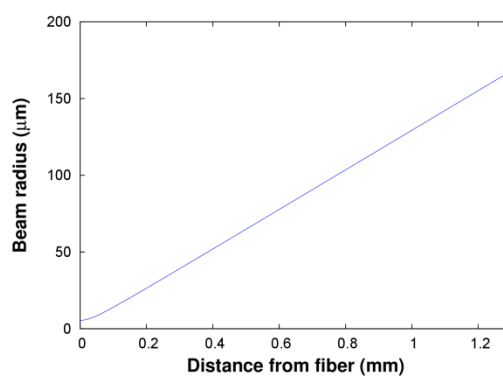


Fig. 8 Laser beam radius inside the Cr⁴⁺:YAG

ビーム断面積と共振器内のパワーから、Cr⁴⁺:YAG の長さにかけてレーザービームの強度は最小で 675 W/cm², 最大で 6.25 x 10⁵ W/cm² となる。パワー不足によって Cr⁴⁺:YAG が飽和していない可能性を考慮し、Fig. 9 に示す短い焦点距離のレンズを用いて同様の実験を行った。

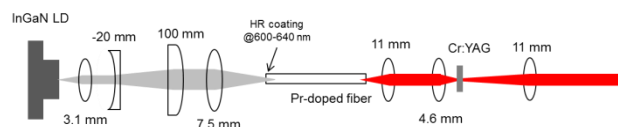


Fig. 9 Experimental setup of passively Q-switched Pr-doped fiber laser in which the laser beam is focused strongly into Cr⁴⁺:YAG saturable absorber

本セットアップにおいて、ビームはファイバ出射後直径 $D = 6.92$ mm にコリメートされ、焦点距離 4.6 mm のレンズによって可飽和吸収体に集光される。以下の式から、

集光スポットの直径 d は $4.6 \mu\text{m}$ と計算できる。

$$d = \frac{4M^2 \lambda f}{\pi D} \quad (1)$$

しかし同様に Q スイッチ動作は得られなかった。Q スイッチ動作が得られなかった主な理由として以下の 2 つが考えられる。

- 偏光がランダムであるために $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ が飽和していない
- 厚さ 1 mm 全体に吸収飽和が実現できていない
- レーザの立ち上がりが可飽和吸収体の吸収回復時間よりも遅い

これまでに $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザにおいて $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ を用いた受動 Q スイッチ動作が確認出来ている。ファイバレーザとの大きな違いは、 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザは直線偏光で発振しているのに対し、ファイバレーザでは偏光がランダムであることである。常包らの報告 [8] によると、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ の吸収は偏光が直交している場合は独立に扱わなければならない。つまり偏光がランダムである場合の可飽和吸収体の飽和強度は、直線偏光である場合の 2 倍大きくなると言える。ファイバレーザは共振器内に偏光ビームスプリッタを挿入することで、直線偏光で発振させることが出来る。もし仮に偏光がランダムであることが原因とするならば、Fig. 10 に示すセットアップならば Q スイッチ動作が得られることが期待出来る。

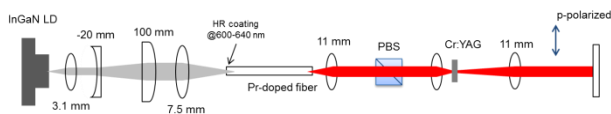


Fig. 10 Experimental setup of passively Q-switched Pr-doped fiber laser in which the laser is linearly polarized

もし仮にレーザの立ち上がり時間が可飽和吸収体の緩和時間 (吸収回復時間) よりも長いとするならば、可飽和吸収体が飽和していたとしても、蓄積した反転分布がジャイアントパルスを形成する前に可飽和吸収体が

緩和し、非飽和時透過率に戻るため、Q スイッチ動作が得られない。4 準位レーザの小信号利得係数 g_0 は以下の式によって記述出来ることが知られている。

$$g_0 = \sigma n_0 \tau_f W_p \quad (2)$$

ここで σ , n_0 , τ_f , W_p はそれぞれ、誘導放出断面積、利得媒質密度、蛍光寿命、ポンピングレートである。ポンピングレート W_p は以下の(3)式によって表現される。

$$W_p = \eta_q \eta_p \eta_m \frac{P_{ab}}{h\nu_L V} \quad (3)$$

ここで η_q , η_p , η_m , P_{ab} , h , ν_L , V はそれぞれ原子量子効率、励起効率、モード整合効率、吸収パワー、プランク定数、レーザの周波数、モード体積である。[6]での $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザ (ドープ濃度 0.5 at%) と Pr^{3+} ファイバレーザ (ドープ濃度 3000 ppm) の小信号利得係数をおおまかに比較する。 Pr^{3+} ファイバレーザの誘導放出断面積は 10^{-20} cm^2 のオーダーであり、 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザのそれよりも一桁小さい。また、ファイバレーザのモード体積 (コア径 $5.5 \mu\text{m}$, ファイバ長 4 cm) $3.8 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ に対し、 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ レーザのモード体積は一桁大きく、およそ $3.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$ である。他のパラメータが同程度であると仮定すると、小信号利得係数のオーダーは同じであると考えられる。ワンパスでの利得は以下の(4)式によって表されるため、小信号利得係数 g_0 が同程度であってもその利得長によってトータルの利得は大きく異なってくる。

$$G_0 = \exp(g_0 l) \quad (4)$$

ファイバ長 4 cm に対し、 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ 結晶長は 0.37 cm と非常に短いため、小信号利得が同じと仮定すると、ワンパスの利得はおよそ $\exp(4 - 0.37) = 37.7$ 倍ファイバレーザの方が大きくなる。ファイバレーザの共振器が大きな損失を内包していない限り、ファイバレーザの立ち上がりが遅いことは考えづらい。

4. SESAM を用いた Q スイッチ動作の試み

Fig. 11 に示すセットアップにおいて SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) を用いた

受動 Q スイッチを試みた。用いた SESAM は赤の波長に対して初期反射率 98 %, 飽和時反射率ほぼ 100 % のものである。しかしながら Cr^{4+} :YAG を用いた場合と同様 Q スイッチ動作は得られなかった。SESAM は非常に早い吸収緩和時間を持ち、一般的にピコ秒スケールである。cw レーザに対する可飽和吸収体の振る舞いは、以下の(5)式で与えられる飽和強度 I_{sat} によって特徴付けられる。

$$I_{sat} = \frac{hv}{\sigma_A \tau_A} \quad (5)$$

ここで hv はレーザーの光子エネルギー、 σ_A は可飽和吸収体の吸収断面積、 τ_A は吸収回復時間である。この式から明らかであるように、早い吸収回復時間をもつ SESAM の飽和強度は遅い可飽和吸収体よりも非常に大きい。このことから、ナノ秒スケールの吸収回復時間を持つ Cr^{4+} :YAG によって Q スイッチ動作が得られなかったという結果から、SESAM を用いても Q スイッチ動作しなかったのは当然の結果と言える。

5. まとめ

Cr^{4+} :YAG 及び SESAM を可飽和吸収体に用いた受動 Q スイッチ Pr^{3+} ファイバレーザの試みについて紹介した。これまでのところ Q スイッチ動作が得られていないが、これはファイバレーザがランダムな偏光で発振していることが1つの原因と予想される。偏光ビームスプリッタなどによって直線偏光で発振させることによって受動 Q スイッチ動作が得られることが期待出来る。また、厚さ 1 mm の過飽和吸収体全体で確実に吸収飽和できる共振器モードおよび共振器内強度が実現できていない可能性もある。

References

- [1] A. Richter, E. Heumann, G. Huber, V. Ostroumov, and W. Seelert, *Opt. Express* **15**, 5172 (2007).
- [2] F. Cornacchia, A. Di Lieto, M. Tonelli, A. Richter, E. Heumann, and G. Huber, *Opt. Express* **16**, 15932 (2008).
- [3] Y. Fujimoto and M. Murakami, in *Adv. Solid State Lasers*, OSA, Paris (2013), p. 2011.
- [4] H. Okamoto, K. Kasuga, I. Hara, and Y. Kubota, *Opt. Express* **17**, 20227 (2009).
- [5] J. Kojou, Y. Watanabe, P. Agrawal, T. Kamimura, and F. Kannari, *Opt. Commun.* **290**, 136 (2013).
- [6] R. Abe and J. Kojou, *Appl. Phys. Express.* **6**, 032703 (2013).
- [7] Y. Fujimoto, J. Nakanishi, T. Yamada, O. Ishii, and M. Yamazaki, *Prog. Quantum Electron.* **37**, 185 (2013).
- [8] 常包 正樹, 平等 拓範 : レーザー研究 **42** (2014) 71.