

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656020

研究課題名（和文） プラセオジム添加フッ化物ガラスを用いた全固体可視域モード同期ファイバレーザ

研究課題名（英文） All-solid-state mode-locked fiber laser operated in visible region using Pr-doped fluoride glass

研究代表者

神成 文彦（KANNARI FUMIHIKO）

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：40204804

研究成果の概要（和文）：

可視域において連続的波長化変性を実現されているプラセオジムイオン(Pr^{3+})ドープフッ化物ガラス媒質を用い、可視域で超短パルスレーザを発生できる全固体モード同期レーザの開発を目的とした研究を行った。受動モード同期の実現には可視域で利用可能な過飽和吸収体の探査が不可欠である。 Cr^{4+} :YAG結晶、半導体微粒子含有ガラス、半導体多層膜ミラーについて波長639 nmでの過飽和吸収特性を確認し受動Qスイッチ動作を波長639, 607 nmにおいて実現した。

研究成果の概要（英文）：

Development of a visible mode-locked laser utilizing Pr^{3+} -doped fluoride glass material that enables us continuous laser wavelength tuning in the visible region was aimed in this study. For passive modelocking, we investigated some potential candidates for saturable absorber in the visible region. We successfully proved that a Cr^{4+} :YAG crystal, a ZnSe colloiddally colored glass, and a semiconductor multi-layer mirror can exhibit saturable absorption around 639 nm. We demonstrated passive Q-switching at 639 and 607 nm for the first time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	0	1,900,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	390,000	3,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学，応用光学・量子光工学

キーワード：可視域レーザ，プラセオジムイオン，過飽和吸収体，モード同期レーザ

1. 研究開始当初の背景

GaN 青色半導体レーザを励起源に用いた Pr^{3+} :YLF レーザは、すでに申請者が高効率（～40%）で赤色レーザ発振可能であることを実証しているレーザである。 Pr^{3+} イオンは、YLF結晶のみならずフッ化物ガラス($\text{AlF}_3 \cdot \text{YF}_3 \cdot \text{CaF}_2 \cdot \text{BaF}_2$)母材においても同様の光

学遷移を示し、むしろファイバ形状にすることで高い励起密度を実現でき高い利得を示すことができる。申請者は、最高500 mW出力の GaN 半導体レーザを用いたファイバレーザ実験において、波長595～650 nm, 515～550 nm, および480～500 nmでの連続的波長可変性が明らかになっており、正に可視

域でのモード同期発振が期待できる。フェムト秒レーザーは、現状では波長 800 nm より長い発振波長帯が実用化され、光科学のみならず加工、蛍光顕微計測応用などに広く用いられているが、可視域で直接フェムト秒パルスが発生可能になることで、さらに応用域を拡大することが可能になる。さらに、1 回の 2 倍波長変換で紫外域のフェムト秒光パルスを得ることも可能となり、その利点は絶大である。

2. 研究の目的

波長 490 nm (青), 522 nm (緑), 607 nm (オレンジ), 640, 697, 720 nm (赤色) の可視域に複数の発振波長を有するプラセオジムイオン (Pr^{3+}) ドープフッ化物ガラス媒質を用い、可視域で超短パルスレーザーを発生できる全固体モード同期ファイバレーザーの開発研究を行う。そのために、以下の 2 つのスキームを研究する。

(1) 当該波長帯で動作可能な可飽和吸収体の探査とモード同期ファイバレーザーへの適用性を調べる。励起レーザーには GaN 青色半導体レーザーを用いる。

(2) 非線形偏光回転を用いたモード同期ファイバレーザーを構築し特性を調べる。十分な励起強度を実現するために、本スキームには高出力 835 nm 帯半導体レーザーを用いた $\text{Pr}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ アップコンバージョン励起方式を用いる。

3. 研究の方法

以下の研究を順番に行う。

(1) 出力 1~2 W の青色 GaN 半導体レーザーを励起源に用い、連続波長選択発振可能な帯域の拡張を行う。

(2) 受動モード同期に適切な可視域で動作可能な可飽和吸収体を探査し、モード同期に必要な共振器構成、励起条件、吸収体濃度等のパラメータを最適化する。目標は、青色、緑色、赤色それぞれの波長帯域での GaN 半導体レーザー励起フェムト秒モード同期発振である。

(3) 現状の青色 GaN 半導体レーザー出力では、数 100 mW の高出力モード同期レーザーは期待できないので、高出力化および非線形偏光回転を用いた受動モード同期の実現のために、波長 835nm 帯半導体レーザーを用いたアップコンバージョン励起を実験実証する。

4. 研究成果

(1) CW フリーランニング動作

ファイバ長 4cm, NA = 0.23, 濃度 3000 ppm の Pr ドープ AlF_3 系フッ化物ファイバ (PDF) 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。図 1 に PDF レーザの実験セットアップを示す。励起源は最大出力 1 W と 500 mW の InGaN LD (Nichia Co.) を使用し偏光ビームスプリッタ (PBS) を用いて偏光重畳しファイバに入射させた。ビームクオリティは 1 W (500 mW) それぞれ $M^2 = 1.3$ (高速

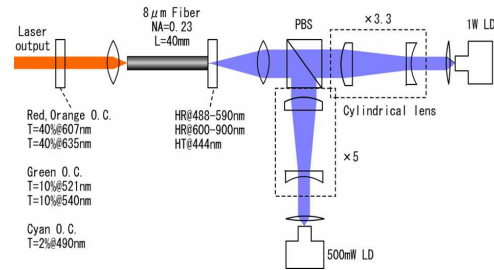


図 1 CW PDF レーザの励起および共振器セットアップ

軸) $\times 5.4$ (低速軸) (1.1 \times 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 のシリンド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 のレンズで集光しファイバに入射させた。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、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 W-LD のビーム径は 5.1 μm (NA=0.15) \times 6.8 μm (NA=0.25), 500 mW の LD のビーム径は 5.5 μm (NA=0.15) \times 5.7 μm (NA=0.21) となった。入射側に使用したミラーは高反射 (HR) (488-590 nm) と HR(580-650 nm) の二枚を使用した。ファイバ出射端の直後に蛍光をコリメートするために f=7.5mm 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。

赤色とオレンジは同時発振利得が高く、同じ透過率のミラーでは同時発振してしまうことから、赤のみとオレンジのみの出力特性を計測することができなかったため、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 30nm 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のだが,高い励起パワーのときは同時発振する．

(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図 2 に示す．

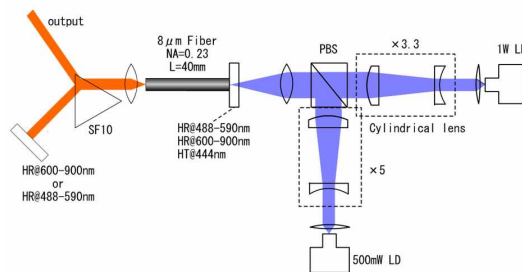


図 2 プリズム波長同調時の共振器セットアップ

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,ミラー全て 400-650nm 帯で AR コートされているものを使用しているが,650nm 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

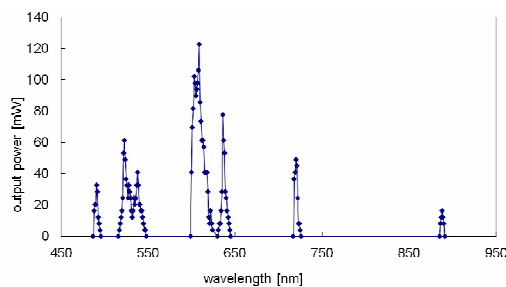


図 3 CW 波長同調特性

るため,近赤外域の発振特性は最適特性とは言えない．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図 3 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．

(3) 波長同調能動 Q スイッチ動作

図 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 μs, OFF 10 μs 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いただけである．PDF の蛍光寿命は ~ 50 μs ほどである．音響光学素子の最大回折効率率は 90% である．可視光域の音響光学素子のロス率は 3% である．共振器長 100 mm,出力鏡透過率 T=40% (607 nm)のものを使用しオレンジ色でパルス発振させた．AOM 挿入後の閾値は 120 mW であった．最大 370 mW (励起パワーの閾値パワーに対する比 r=3.1)で励起したときの特性を図 4 に示す．370 mW 以上で励

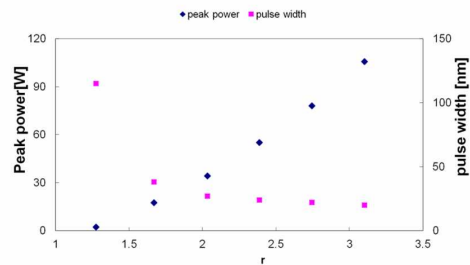


図 4 励起パワーに対する波長 409 nm Q スイッチパルスのピーク強度とパルス幅の変化

起した際は音響光学素子の 0 次透過成分のため CW 発振を抑制することができず, CW 発振と Q スイッチが混合した．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 μJ 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するなどして CW 発振を抑制する必要がある．

(4) 能動 Q スイッチ波長可変動作

図 2 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,71mW となった .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 . その時の波長同調および出力特性を図 5 に示す .

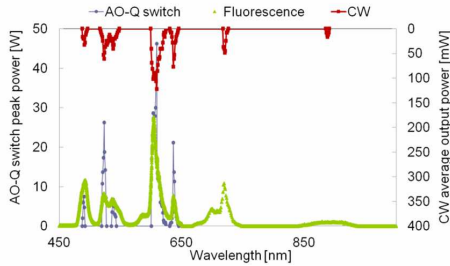


図 5 能動 Q スイッチ動作時の波長同調特性

(5) Cr:YAG の可飽和吸収特性計測実験および結果

受動 Q スイッチレーザ発振実験に先立ち , Cr⁴⁺:YAG 結晶の可飽和吸収特性を Pr:YLF レーザパルスを用いた Z-scan 計測で検証を行った .図 6 に Z-scan 法による Cr⁴⁺:YAG 結晶の可飽和吸収特性計測の実験セットアップを示す .

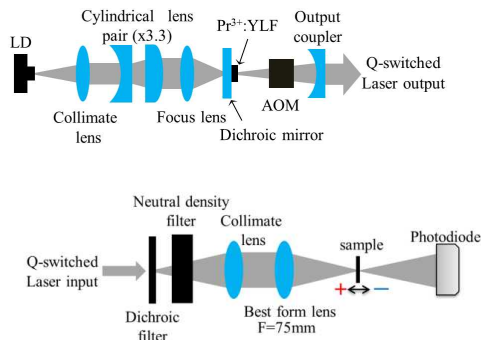


図 6 プロブ用パルス Pr:YLF レーザの構成図 (上図). Z-scan 実験セットアップ (下図).

Z-scan 法で用いたレーザのポンプ光は最大出力パワー 1 W ,発振波長 444 ~ 447nm の InGaN 系半導体レーザである . 能動 Q スイッチ Pr:YLF レーザは ,繰り返し周波数 11.1 kHz . (パルス幅: 639, 607 nm は 25 ns , 521 nm は 130 ns) である . 出射されたレーザのエネルギーは ND 可変フィルタによって調整を行っている . Cr⁴⁺:YAG は , 88% の透過率

である (@633 nm) . 厚さは 1.323 mm , 結晶軸は (1 0 0) , 直径 4 mm であり AR コート (600~640nm) を施してある . サンプルに照射したレーザエネルギー , および , 焦点でのエネルギーは , それぞれ 639 nm : 照射レーザエネルギー 3.60 μ J (焦点フルエンス 24.7 J/cm²) , 607 nm : 1.32 μ J (9.96 J/cm²) , 521 nm : 0.41 μ J (4.26 J/cm²) である . 得られた結果を図 7 に示す . 縦軸は透過率変化を示す . ここでは , 639, 607, and 521 nm においての可飽和吸収特性が示されている .

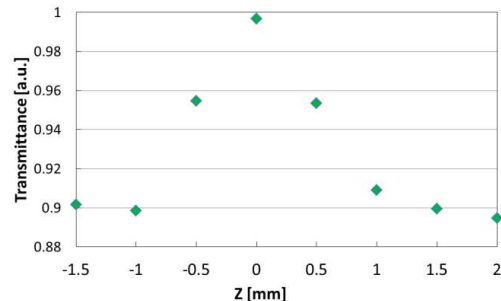
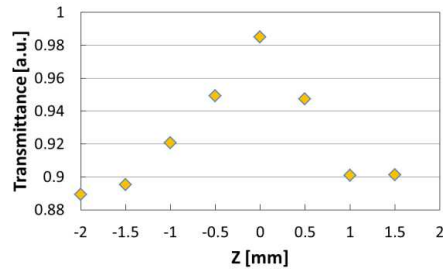
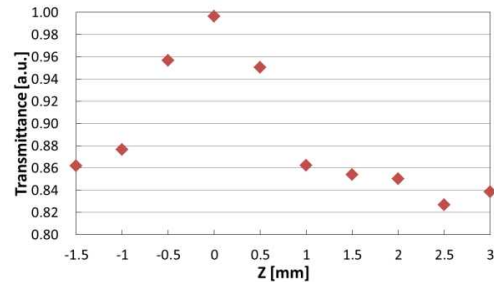


図 7 z-scan 計測による Cr:YAG の吸収飽和特性 . 上段 635 nm , 中断 607nm , した段 521 nm .

波長 639 nm における透過率変化から見積もられる吸収飽和強度は約 100 mJ/cm² である . 応答時間特性は ns オーダ以下であることを確認した .

この Cr:YAG 過飽和吸収体を Pr:YLF レーザ共振器内に挿入することで , 容易に能動 Q スイッチ動作を実現した . 639 nm での受動 Q スイッチレーザは励起吸収パワー 789 mW において , パルス幅 (FWHM) 389 ns , パルスエネルギー 58.0 nJ , 繰り返し周波数 176 kHz , 平均パワー 9 mW , ピークパワー 219 mW の出力が得られた . 励起吸収パワーの発振閾値は 702 mW であり , Cr⁴⁺:YAG を挿入しない場合に比べて 499 mW 増加

する。Pr³⁺レーザを可視域で能動Qスイッチさせた例は、ZnSeS 半導体微粒子含有色ガラスおよび液体色素で実現された例はあるが、Cr:YLF を用いたのはこれがはじめてである。利点は、色ガラスフィルタと異なり吸収スペクトルが広いことで、実際、波長 607 nm においてもQスイッチングを実現できた。

この過飽和吸収体を PDF レーザ共振器に挿入することでQスイッチ動作が確認できた。ただし、共振器寿命を極めて長く設定してきたのでパルス発振の最適化がまだ不十分である。また、ファイバ透過してきた青色励起光を遮断することも必要である。

我々は、Cr:YAG 以外に、ZnSeS 半導体微粒子含有色ガラスによる波長 535 nm でのQスイッチングも確認した。この吸収体は ps の時間応答を有するので能動モード同期に利用できる。一方、半導体過飽和吸収体も作製することに成功した。吸収変化は 2% である。レーザの変調にはまだ至っていないが、応答特性が ps 領域であることからこの素子も能動モード同期に利用できる。

以上、能動Qスイッチならびにモード同期に利用できる新たな過飽和吸収体を取得できた。

一方、当初は、非線形偏光回転を用いたモード同期ファイバレーザの方式を検討したが、現在入手できる PDF は偏波保存性がなく、また、長さ 5 cm 以下で動作するために、Er ガラスファイバレーザで用いられているこの手法は適さないと判断した。非線形偏光回転を用いるためには共振器内光強度を高める必要があり、その際には波長 835 nm 帯半導体レーザを用いたアップコンバージョン励起を想定した。しかし、本研究機関中にも GaN 系半導体レーザの高出力化が進められ単体で 3 W が得られるまでになった。この強度は単一クラッド型のファイバレーザを励起するには十分である。非線形励起方式では、高強度励起時のファイバヒューズ破壊現象が生じるということも調査の段階で判明した。以上の考察から、波長 835 nm 帯半導体レーザを用いたアップコンバージョン励起は本研究内では実施しなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

J. Kojou, Y. Watanabe, Y. Kojima, H. Nemoto, F. Kannari, "Intracavity second-harmonic generation at 320 nm of an actively Q-switched Pr:LiYF₄ laser," (査読有) Appl. Opt. vol.51, No.8, pp. 1382-1386 (2012).

〔学会発表〕(計 6 件)

J. Kojou, Y. Kikuchi, F. Kannari, "Characteristics of multi-line oscillation of visible Pr³⁺-doped ZBLAN fiber lasers pumped by GaN diode lasers," IQEC/CLEO Pacific Rim Conference 2011年8月23日, Sydney, Australia.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神成 文彦 (KANNARI FUMIHIKO)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号: 40204804

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし