

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32503

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13700

研究課題名(和文) 回折格子やエタロンを使用しない新規構造の波長可変レーザー開発

研究課題名(英文) Development on a unique structure of tunable fiber laser without a grating or an etalon

研究代表者

藤本 靖 (FUJIMOTO, Yasushi)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70343241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究提案は、光学レンズの色収差と光ファイバのスリット様効果を巧みに利用した新しい波長可変レーザー構成に関するものであり、超短尺光ファイバとの組み合わせにより超小型波長可変レーザーモジュールを目指した開発が目的である。レーザー光発生に利用する光学素子及びファイバを様々工夫し波長選択性を改善することで、一定の波長可変特性は得られたが必ずしも予想したものでは無かった。しかしながら、同一の実験系において可視光帯域で可飽和吸収体 (SESAM) を用いたパルスファイバレーザーを実現し、可視光光源の新たな可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This project was for establishing a new scheme of tunable fiber laser. I propose a very simple way to achieve a tunable laser skillfully using the chromatic aberration of a lens relay and a slit-like effect of the optical fiber core. The final results were not exactly the initial estimation of the project, but the tunable properties of fiber laser were partially achieved with installing a single-mode gain fiber and new optics and a new visible Q-switched fiber laser was developed with a saturable absorbed mirror in visible region in the same configuration of the tunable fiber laser. This means an emergency of new possibility of visible coherence light source.

研究分野：レーザー材料物理

キーワード：レーザー 光 波長可変 ファイバ 可視光

## 1. 研究開始当初の背景

光源波長の自由度を提供し得る波長可変レーザーの重要性に関し疑問を挟む余地は無いが、より広範囲の応用を期待するには、より小型で簡素化されたメンテナンスが容易な光学構成が必要である。

我々は、これまで困難であったシリカガラスへの希土類元素の高濃度ドーピングを実現する Zeolite 法[1]の開発を行い、シリカガラスをベースとした機能性蛍光材料の研究を進めてきた。また、シリカガラスは光ファイバ用素材として非常に優秀な素材であり、研究室に導入された生産設備相当の光ファイバの線引き装置を用い、4mm 長の超短尺 Nd ファイバレーザー[2]を始めとする様々な特殊光ファイバによるファイバレーザーを実現してきた。また、GaN 半導体レーザーを用いた Pr ドープ耐候性フッ化物ファイバ (Pr:WPFGE) レーザーでは、可視光の RGB (3原色) 全てにおいて 1W を超えるレーザー光出力 (世界最高値) を得ている。また、Graphene による Q-スイッチング動作を用いた 40mm 長の耐候性フッ化物ファイバによる可視光ファイバレーザーナノ秒パルス生成[3]に世界で初めて成功した。その可視光パルス光発生実験系と同様の構成において、ガラス中における利得スペクトルの不均一広がりを利用し、ミラーをレーザー光軸方向に移動調整するのみで波長可変特性が得られることを実験的に示した[4]。得られた波長可変特性は、ミラーの光軸方向移動量 120 $\mu$ m に対し、波長可変領域 20nm 以上 (604-625nm) であった。これはレンズ系の持つ色収差による焦点距離の波長依存性の影響によるものであり、希土類ドーピングガラスの広帯域な蛍光スペクトルとの組み合わせにより、小波長可変レーザーを提案できることが分かる。

## 2. 研究の目的

物質と光の相互作用は光の色 (波長) と密接な関係があり、適切な波長を選択しうる波長可変レーザーは、医療・創薬、光計測などの様々な分野で広く用いられてきた。一般に多くのレーザーは単一の固定波長で発振するが、広帯域の発光特性を持つレーザー媒質 (色素、蛍光ガラス等) と回折格子やプリズムによる分光器のシステムを組み合わせることで波長可変レーザーを達成している。

本研究提案は、光学レンズの色収差と光ファイバのスリット様効果を巧みに利用した新しい波長可変レーザー構成に関するものであり、超短尺ファイバによる光ファイバと組み合わせることにより 10-20mm 程度の超小型波長可変レーザーモジュールも期待できる。以上のアイデアの実現のための物理要因、並びにその仕様を明らかにすることが目的である。

## 3. 研究の方法

本研究提案は、光学レンズの色収差と光ファイバのスリット様効果を巧みに利用した全く新しいタイプの波長可変レーザーである。その基本構造を Fig.1 に示す。波長可変レーザーを構成する必要要素には次の3つがある。(1)広帯域な発光波長特性を持つレーザー媒質、(2)広帯域の光源を空間的に、波長毎に分散しうる素子 (回折格子、プリズム、エタロン、複屈折板等)、(3)空間的に分散した光を選択する構成 (スリット、角度調整機構) である。この(2)、(3)の素子・構成により波長可変特性を得ることは、光を空間に大きく広げる必要があるため、レーザーの小型化の最大のネックになっている。

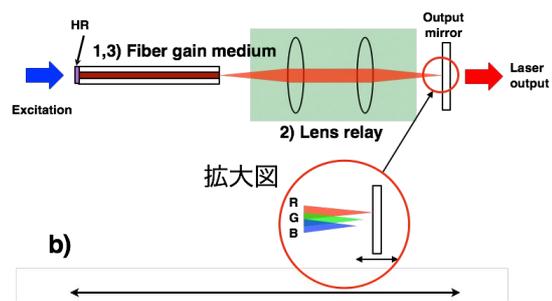


Fig.1 本提案の波長可変レーザー構成

これに対し、本研究提案の手法においては波長分散の決定は焦点距離のみにより決定され、具体的には 100 $\mu$ m 程度のミラーの進行方向への移動のみで済み、空間的な広がりほとんど生じない。また、出力ミラーの調整は燻り依存性があるものの、集光レンズの発散角内に反射光を閉じ込めるのみで良く、高い精度を必要とせず安定する。従って、部品点数の削減やメンテナンスフリーなど、小型堅牢、低コストの波長可変レーザーの構成が可能となる。また、出力ミラーを SESAM にする、もしくはカーボンナノチューブやグラフェンなどの可飽和吸収特性を持つ素子を出力ミラー上に設置することにより、容易に Q スイッチもしくは、モードロックレーザーを構成することが出来る。これにより、これまでに無い小型堅牢で低コストの波長可変パルスレーザーを構成出来る。また、ミラー自動駆動機構を付加することで波長自動掃引も可能となり医療、計測技術など様々な応用が期待できる。本研究においては、Fig.1 をベースとしたレーザーモジュールを構成し、望むような波長可変特性が得られるかを検証した。

## 4. 研究成果

我々は、次の2つのレンズ (GRIN レンズ、及びアクロマティックレンズ) を用いた実験系において波長可変特性の実験を試みた。

## (1) GRIN レンズを用いた実験系

Fig. 2 に GRIN レンズを用いた波長可変レーザーの実験系を示す。ファイバはコア径が  $8\mu\text{m}$  の Pr ドープ耐候性フッ化物ファイバを用いた。このファイバは可視光レーザー光を効率よく発生させることが出来る。

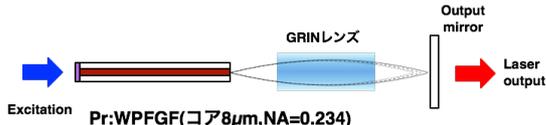


Fig.2 GRIN レンズ波長可変レーザー

GRIN レンズ (Edmund 64538:NA=0.55) をファイバ端面から数ミリの位置に設置し、出力鏡を焦点の位置に設置した。励起は青色半導体レーザーを用い、その励起入力  $510\text{ mW}$  一定とした。607nm (オレンジ色) でのレーザー発振を確認後、アウトプットミラーの位置をレーザー出射側方向へ  $10\mu\text{m}$  ずつ変化させることにより、波長可変特性を検証した。その結果を Fig.3 に示す。ミラーの移動距離  $0$  から  $110\mu\text{m}$  においては、オレンジ波長域にてレーザー発振が得られ、およそ  $5\text{ nm}$  の波長幅の範囲でスペクトル変化が得られたもののマイクロメータの読みピーク波長とミラー位置には 1 対 1 の関係性は得られなかった。ミラー移動距離  $120\mu\text{m}$  を越えると赤色レーザーの発振が始まり、 $3\text{ nm}$  程度のスペクトル変化を確認したが、波長対応はオレンジ色と同様であった。

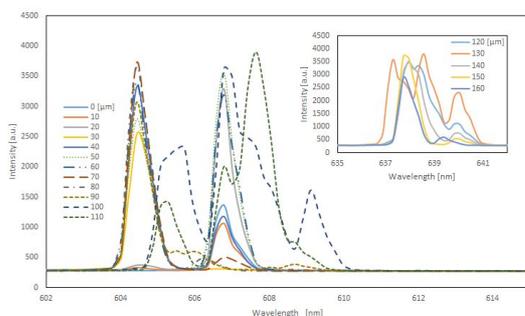


Fig.3 GRIN レンズ波長可変レーザーの波長可変特性の測定

## (2) アクロマティックレンズを用いた実験系

GRIN レンズを用いた系においては思ったような波長可変特性が得られなかった。そのため、レンズの色収差が波長可変特性にどのように影響するかを、アクロマティックレンズを用いて検証した。アクロマティックレンズは色収差を取り除く事の出来るレンズで有り、レンズの焦点位置が色により変化がない事から、ミラー位置を移動しても波長可変特性が得られないことが予想される。実験系は Fig.2 における GRIN レンズをアクロマティッ

クレンズ(Edmund 84125)に交換設置する事で行った。励起は青色半導体レーザーを用い、その励起入力  $510\text{ mW}$  一定とした。607nm (オレンジ色) でのレーザー発振を確認後、アウトプットミラーの位置をレーザー出射側方向へ  $10\mu\text{m}$  ずつ変化させることにより、波長可変特性を検証した。その結果を Fig.4 に示す。

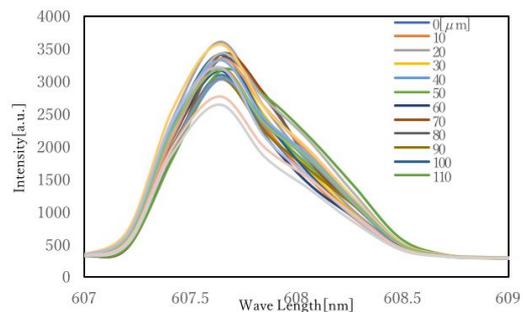


Fig.4 アクロマティックレンズを用いた実験系における波長可変特性の測定

Fig. 4 より、ミラー位置を  $0$  から  $110\mu\text{m}$  まで移動させスペクトルを確認したが、波長可変特性は全く示さなかった。従って、アクロマティックレンズを用いることで、Fig.2 の構造のファイバレーザーにおいて、レンズの持つ色収差が波長可変性を与えるに有効に働いている事が解る。

またこの時の実験系におけるレーザー入出力特性を Fig.5 に示す。この時の最大出力は  $1.05\text{ mW}$ 、スロープ効率  $0.23\%$ 、発振閾値は  $247\text{ mW}$  であった。

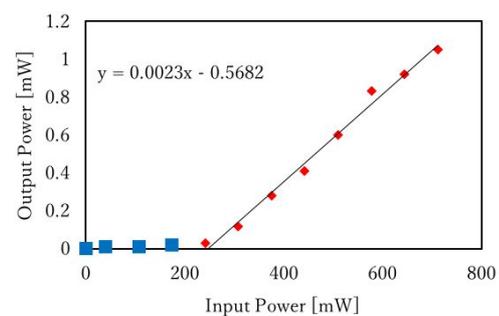


Fig.5 アクロマティックレンズを用いた可視光ファイバレーザーのレーザー入出力特性

波長可変レーザーとしては、小型にするために NA の大きなレンズ (GRIN レンズ等) を用いるよりも実験当初のレンズリレー系での結果が最も良い事が解った。また、研究の進展において、シングルモードの Pr 耐候性フッ化物ダブルクラッドファイバが我々のグループによって開発された[5]。そのシングルモード用いた波長可変レーザー特性も GRIN レンズを用いた系とほぼ同じ特性であった。しかしながら、そのゲインファイバと可視域 SESAM を用い、可視域 Q-スイッチパ

ルスレーザー発振を行ったところ、可視域のパルスを非常に効率よく動作させる方法を発見した[6]。その時の入出力特性を Fig.6 に示す。最大出力は 140mW、スロープ効率は 36.3%、発振閾値は 223mW と計算された。また、この時の発振ピーク波長は 638.6nm であった。また、この時の繰り返し周波数は 107 kHz、パルス時間幅は 270 ns であった。

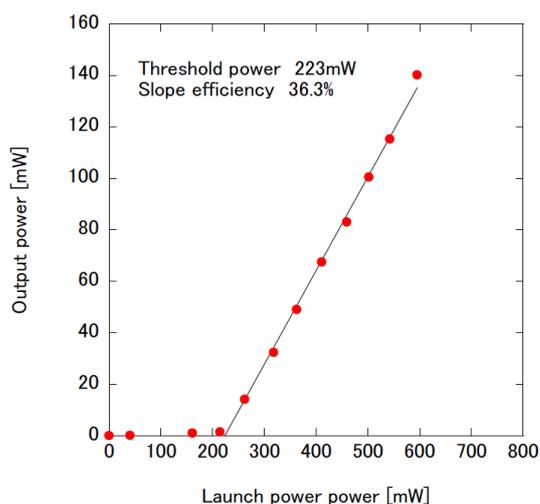


Fig.6 可視光 SESAM を用いた Q スイッチパルスレーザー入出力特性

以上の様に、本研究目的における波長可変特性は思った通り得られなかったが、研究の進展において、新たな成果として安定した可視光 Q スイッチパルスレーザーがシングルモードにて得られる事が分かった。

#### < 引用文献 >

- [1] Y. Fujimoto, M. Nakatsuka, A novel method for uniform dispersion of the rare earth ions in SiO<sub>2</sub> glass using zeolite X, Journal of Non-Crystalline Solids, **215** (1997) 182-191.
- [2] M. Murakami, Y. Fujimoto, S. Motokoshi, T. Sato, H. Shiraga, Short-length fiber laser oscillation in 4-mm Nd-doped silica fiber fabricated by zeolite method, Optics Communications, **328** (2014) 121-123.
- [3] Y. Fujimoto, T. Suzuki, R.A.M. Ochante, T. Hirayama, M. Murakami, H. Shiraga, M. Yoshida, O. Ishii, M. Yamazaki, Generation of orange pulse laser in waterproof fluoride glass fibre with graphene thin film, Electronics Letters, **50** (2014) 1470-1471.
- [4] Y. Fujimoto, O. Ishii, M. Yamazaki, Design of simple and compact tunable fibre laser, Electronics Letters, **51** (2015) 925-926.
- [5] S. Kajikawa, T. Terao, M. Yoshida, S. Motokoshi, O. Ishii, M. Yamazaki, Y. Fujimoto, Single-mode visible laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fibre, Electronics Letters, **52** (2016) 861-862.

- [6] S. Kajikawa, M. Yoshida, S. Motokoshi, O. Ishii, M. Yamazaki, Y. Fujimoto, Visible ns-pulse laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoride glass fiber with SESAM, J Eng-Joe, (2017).

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- 1) S. Kajikawa, M. Yoshida, O. Ishii, M. Yamazaki, Y. Fujimoto “Visible Q-switched pulse laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoride glass fiber with graphene”, Optics Communications, **vol. 424** (2018) pp.13-16. (有査読) <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.04.024>
- 2) S. Kajikawa, M. Yoshida, S. Motokoshi, O. Ishii, M. Yamazaki, and Y. Fujimoto “Visible ns-pulse laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoride glass fiber with SESAM”, The Journal of Engineering, **vol.2107**, (2017) pp.407-409. (有査読) [10.1049/joe.2017.0258](https://doi.org/10.1049/joe.2017.0258)

〔学会発表〕(計 4 件)

- 1) S. Kajikawa, M. Yoshida, O. Ishii, M. Yamazaki, and Y. Fujimoto “Development of direct visible pulse fiber laser - (*invited*)”, OPIC 2018, ALPS in OPTICS & PHOTONICS International Congress 2018, **ALPS13-D2-1**, the Conference Center, Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan, 26<sup>th</sup> April 2018.
- 2) Y. Fujimoto “New Specialty Fiber and New Wavelength Fiber Lasers - (*invited*)”, Collaborative Conference on Laser Sources 2018 (OAHOST), *Session:Lasers I A10*, Coast Victoria Harbourside Hotel & Marina Victoria, Canada, April 8th - 12th, 2018.
- 3) Y. Fujimoto “New Specialty Fiber and New Wavelength Fiber Lasers - (*invited*)”, CLEO-PR, OECC and PGC 2017, **Oral 3-3 G-4**, Sands Expo and Convention Centre, Singapore, 31th July - 4th August, 2017.
- 4) S. Kajikawa, T. Murakami, M. Yoshida, O. Ishii, M. Yamazaki, and Y. Fujimoto “Visible Q-switched pulse generation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro-aluminate glass fiber”, CLEO®Europe-EQEC 2017, **CJ.P.19**, ICM - International Congress Centre, Munich, Germany, 25-29<sup>th</sup> June 2017.

〔その他〕

ホームページアドレス

<http://www.eee.it-chiba.ac.jp/staff/fujimoto.html>

6．研究組織

(1)研究代表者

藤本 靖 (FUJIMOTO, Yasushi)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：70343241