

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390120

研究課題名(和文) 省エネ型高出力超短パルスレーザの開発とスーパーコンティニウムの発生

研究課題名(英文) Development of high efficiency high-power ultrashort pulse laser and super continuum generation

研究代表者

中村 真毅 (NAKAMURA, SHINKI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90323211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高出力半導体レーザ励起受動モード同期Yb:YAGセラミックレーザを開発した。2%の結合ミラーを用いて波長1050 nm, パルス幅433 fs, 繰り返し90.9 MHzで平均パワー3.64 Wを得た。このレーザ光を低分散高非線形ファイバに入射したが、ビーム質が悪かったためファイバ透過率が悪くスーパーコンティニウムは発生しなかった。次に、我々はエルビウム添加ファイバレーザを製作した。モード同期エルビウム添加ファイバは6.6mWの種光を生成した。そしてその種光は33.9mWまで増幅された。増幅されたパルスを高非線形分散シフトファイバに入射したが、スーパーコンティニウムは発生しなかった。

研究成果の概要(英文)：A high-power diode-pumped passively mode-locked Yb:YAG ceramic laser was demonstrated. An average output power of 3.64 W with a pulse duration of 433 fs at a repetition rate of 90.9MHz was obtained at a wavelength of 1050 nm using a 2% output coupler. The laser pulse was injected into a low dispersion high nonlinear fiber. Any super continuum light could not be observed because of degraded laser beam quality. Next, we developed an erbium doped fiber amplifier. A mode-locked erbium doped fiber laser generated seed laser pulses at 6.7 mW and the seed pulses were amplified up to 33.9 mW. The amplified pulses are injected into highly nonlinear dispersion shifted fiber. However no super continuum were observed.

研究分野：レーザ

キーワード：レーザ Yb:YAG イッテルビウム エルビウム EDFA 光ファイバ

1. 研究開始当初の背景

(1) 研究の学術的背景

我々は時間領域差分(FDTD)法を用いた超短パルス非線形光ファイバ伝播解析における緩包絡波近似の破綻に関する研究を科研費若手研究Bの支援を受けて行った。そして2種の計算手法の比較により数フェムト秒の光パルスのファイバ伝搬において緩包絡波近似の破綻を観測した。今後は実験との比較のためにフェムト秒レーザを開発する。

そこで我々は低コスト省エネ型超短パルスレーザシステムの開発を科研費基盤Cの支援を受けて行った。1mm厚のセラミックとプリズム対とSESAMを用いて初めてフェムト秒Yb:YAGセラミックレーザを開発した。[H. Yoshioka, S. Nakamura *et al.*, Opt. Express, Vol. 17, No. 11, pp. 8919-8925 (2009).]しかし、出力パワーは20 mWと低かった。そこで、共振器内損失の見直しと、励起光集光系の改良によって、高出力化することが望まれる。

(2) 研究の学術的特色と独創的な点

本研究では、3mm厚という比較的厚い板状のYb:YAGセラミックを強励起し、かつ負分散ミラーを用いて、高出力のモード同期レーザを実現する。励起光用ファイバ付きLDはファイバコア径100 μmのものに置き換える。また、海外の例ではプリズムを2個用いているが、本研究では負分散ミラーを用いて、モード同期セラミックレーザを高出力動作することが初めてであり独創性があり特色となっている。

このため既にワットクラスの高出力フェムト秒レーザ開発を将来的目標とし、初めてモード同期Yb:YAGセラミックレーザを開発した。[H. Yoshioka, S. Nakamura *et al.*, Opt. Express, Vol. 17, No. 17, pp. 8919-8925 (2009).]

カーレンズ効果を用いない受動モード同期では他の母結晶が違うセラミックレーザ全ての中で最も短いパルス幅233 fsを得た。この時の平均出力パワーは20 mWと低かった。これは分散補償系にプリズム対を用いてい

た為、共振器内損失が大きかったためと思われる。また、励起用半導体レーザ(LD)のファイバコア径は200 μmであったのでファイバコア径100 μmのLDに取り替えて励起密度を増加させれば、強励起によってレーザ下準位密度を低くする事ができ、レーザ光の再吸収が抑制され、平均出力パワー 数ワット(励起光パワー数十ワット)得られることが予想される。

さらに、この優れた高出力フェムト秒Yb:YAGセラミックレーザ光を低分散ファイバに通し、パルス圧縮した後、もう一度ファイバに通して、緩包絡波近似の破綻する領域でのファイバ伝播実験を行って、これまで築き上げてきたFDTD法による理論解析の研究成果との比較を行う。この分野で実験と理論の両側面から研究を行っているグループが無いので、その点でも本研究は独創的である。我々が、高パワーの12 fsのパルスをファイバ伝搬させたのが、現在最も短いパルスをファイバ伝搬させた実験であり[S. Nakamura *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **41**, 1369 (2002).]、これに関するFDTD法による解析も我々のもの[S. Nakamura *et al.*, IEEE J. Lightwave Technol. **23**, 855 (2005).]しかない。我々は更に低パワーにおいて、正常分散域では4 fs, 異常分散領域では7 fsで緩包絡波近似が破綻する事をFDTD法とビーム伝搬法の計算結果の違いから確かめた。これを実験的に確かめる事はまだ誰も行っておらず、独創性があり特色となっている。

2. 研究の目的

(1) 高出力の低コスト省エネ型LD励起フェムト秒Yb:YAGセラミックレーザを開発し、スーパーコンティニウム発生用フォトニック結晶ファイバと空間位相変調器を用いた分散補償系で圧縮した後に更にファイバ伝播を行い、これまで提唱して来た新しいビーム伝播解析手法と実験結果との比較を行うことを目的とする。

(2) 研究期間内に明らかにしようとしている点

低コスト省エネ型モード同期Yb:YAGセラミックレーザをベースとして改造を行い、チャープミラーを用いた高出力化を実現出来るか。平均パワーをワットレベルにする事は可能か。

フェムト秒レーザのファイバ伝搬解析と実験結果を比較した時、良い一致を得るのか。

(3) 予想される結果と意義

低コスト省エネ型フェムト秒レーザの平均出力パワーをワットレベルまで高出力化できる。レーザ加工に用いるなどワットレベルでは応用が実現される。また省エネ型レーザなので、低炭素社会への寄与が期待できる。

我々のファイバ伝搬解析手法による数値計算結果と実験結果を比較すると、良い一致を得る。

3. 研究の方法

(1) 励起光の高密度化

励起用半導体レーザ(LD)のファイバコア径は200 μm であったのでファイバコア径100 μm のLDに取り替えて励起密度を増加させれば、強励起によってレーザ下準位密度を低くする事ができ、レーザ光の再吸収が抑制され、平均出力パワー 数ワット(励起光パワー数十ワット)得られることが予想される。励起光は単レンズ2枚でYb:YAGセラミックに集光していたが、収差を減らすため、アクロマティックレンズ2枚に取り替える。

(2) 負分散素子の低損失化

図1に示すとおり、共振器内にレーザ媒質として比較的厚い3mm Yb:YAGセラミックを置き、左右を集光鏡で挟み、SF10プリズムを2つ組合せたプリズム対の代わりにチャープミラーを2枚、GTIミラーを2枚配置し負分散を与える。そして光ディテクタとデジタルオシロスコープで時間波形を計測し、モード同期パルス列が生成される事を確認する。

(3) モード同期フェムト秒レーザのパルス幅

の測定

パルス幅を正確に測定するために自己相関器を用いる。カーレンズモード同期Yb:YAGレーザのパルス幅を自己相関器で測定する。次に分光器でスペクトル幅を確認し、パルス幅とスペクトル幅の積を計算してフーリエ限界パルスとなっているか確認する。

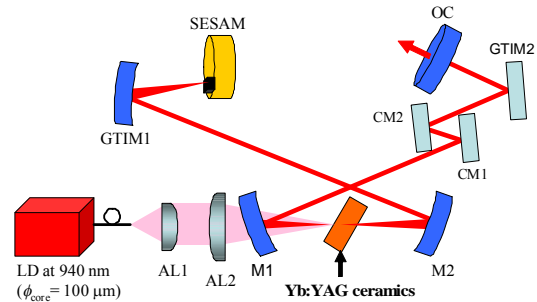


図1 プリズム無しのモード同期実験構成図

(4) 異常分散領域におけるSMファイバ伝播実験

既に開発済みの偏波回転型モード同期エルビウムファイバレーザ光を図2に示す通り、エルビウム添加ファイバ増幅器で増幅し、SCFを通した後、フェムト秒パルスに圧縮してから異常分散領域におけるファイバ伝播実験を行う。

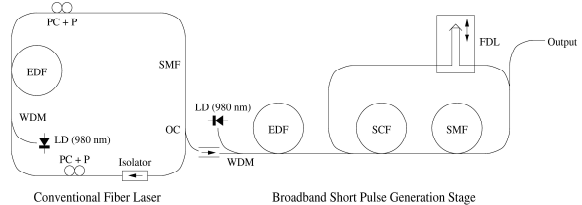


図2 ファイバレーザと広帯域超短パルス発生装置

4. 研究成果

超短パルス高出力モード同期 Yb:YAG レーザの改良を行った。

励起パワー25 W のとき、中心波長 1050 nm、平均出力パワー3.80 W、パルス幅 433 fs、ス

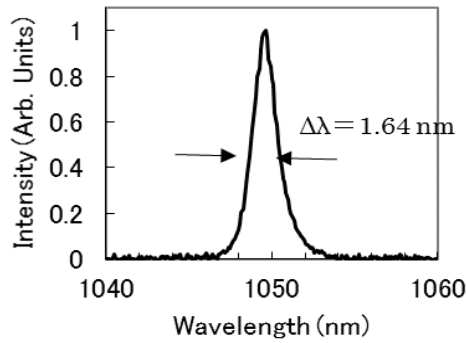


図3 平均出力パワー3.64 W 時のスペクトル

スペクトル幅 2.79 nm、時間帯域幅積は 0.329 であった。その後、高主力動作実験をするうちに 3 mm 厚の結晶が破損し、以後 2mm 厚の結晶を使用した。結晶の厚みを変えた後のモード同期発振時の発振スペクトルを図 3 に、図 4 にパルス列を示す。スペクトル幅は 1.64 nm に減少した。図 4 より peak to peak の時間間隔が 11 ns であることからパルスの繰り返し周波数は 90.9 MHz と計算できる。図 5 にモード同期発振時のレーザーの入出力特性を示す。LD からの励起パワーが 2 W のとき

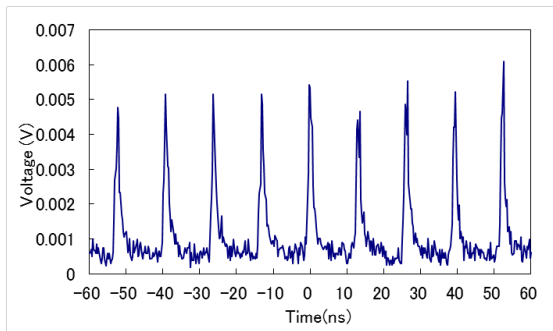


図4 平均出力パワー3.64 W 時のパルス列

CW 発振 (平均出力パワー: 10 mW) が起こり、励起パワーが 3.66W のときモード同期発振 (平均出力パワー: 173 mW) が確認された。その後も励起パワーを 3 W 刻みで上昇させるに従って、モード同期発振が途切れることなく平均出力パワーは増加し、最終的には励起パワー23.24 W時に最高出力 3.64 W を記録した。この時のスロープ効率は 18.1%であった。

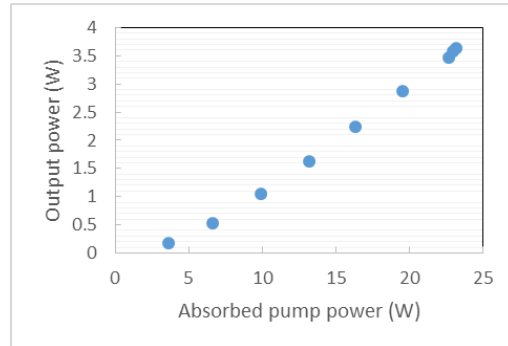


図5 モード同期発振時のレーザーの入出力特性

次にスーパーコンティニウム発生のために低分散ファイバにこのレーザー光を入射したのだが、ビーム品質が悪くファイバ透過率が数%程度であったため、スーパーコンティニウムの観測は出来なかった。図 6 は低分散ファイバに入射したレーザーのスペクトルを、図 7 は低分散ファイバ出射後のスペクトルをそれぞれ示している。図 7 を見る限り、400 nm ~ 1000 nm にスペクトル成分は無く、入射したレーザーのスペクトル成分以外のスペクトルが見つからない。よってスーパーコンティニウムの観測は出来なかった。

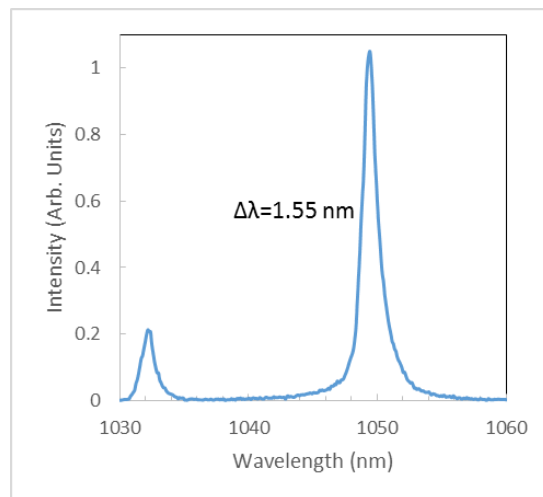


図6 低分散ファイバへ入射したレーザーのスペクトル

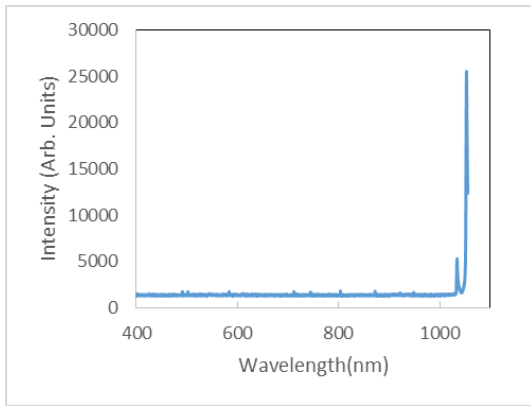


図 7 低分散ファイバから出射された光のスペクトル

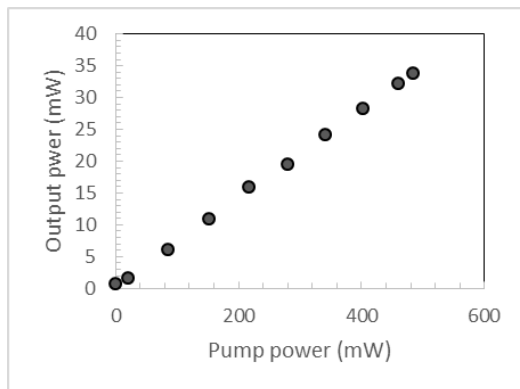


図 8 EDFA の増幅特性

そこで、フェムト秒 Er 添加ファイバレーザを増幅して高非線形分散シフトファイバを通しスーパーコンティニウムを得る実験を行った。まず高濃度 Er 添加ファイバを 500 mW 出力の半導体レーザで励起する増幅器 (EDFA) を製作した。図 8 は 6.5 mW のシード光を増幅したときの増幅特性である。励起パワー 484 mW のとき、33.9 mW の出力が得られた。この増幅されたレーザ光を高非線形分散シフトファイバに入射した。図 9 は増幅後パルスのスペクトルである。高非線形分散シフトファイバは住友電工製で、パルス幅 300 fs、平均パワー 60 mW、繰り返し 20MHz のパルスを入れるとスーパーコンティニウムが発生する設計である。仕様は、長さが 50 m で、波長 1.55 μm で、有効コア面積 A_{eff} が 9.4 μm^2 、伝送損失 1.3 dB/km、波長分散 +0.37 ps/nm/km、分散スロープ +0.03 ps/nm²/km、PMD < 0.1 ps、非線形係数 25 /W-km である。

増幅したレーザパルスがこの高非線形分散シフトファイバに入射したが、スーパーコンティニウムは発生しなかった。図 10 は増幅後パルスを高非線形分散シフトファイバに通過させた後のスペクトルである。増幅後スペクトルの特徴である二つのピーク以外スペクトル成分は観測されなかった。

増幅器の正の分散により、パルスが数 10 ピコ秒に伸びているためと考えられる。現在 1550 nm 用の自己相関器を保有していないためパルス圧縮の実験は行えなかった。1550 nm の単一モードファイバは負の分散をもつので、自己相関器があれば、適切な長さファイバを切って現在のシステムに繋がれば増幅後の伸びたパルスを元の 300 fs に圧縮することができる。

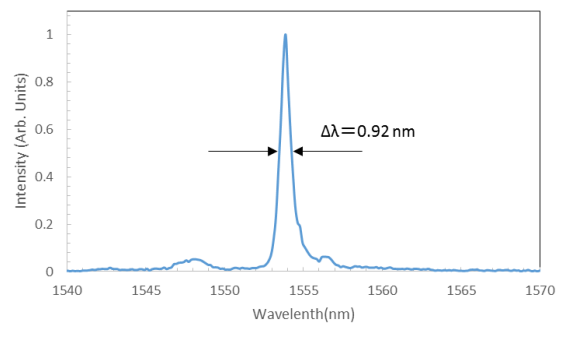


図 9 増幅後パルスのスペクトル

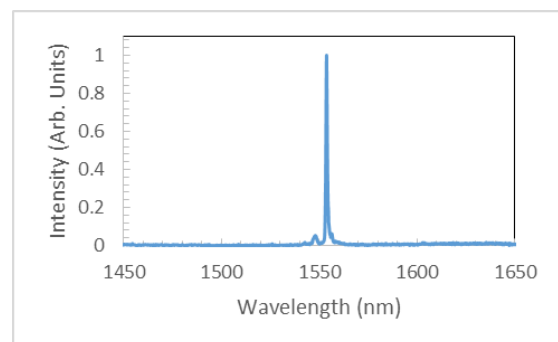


図 10 増幅後パルスを高非線形分散シフトファイバに通過させた後のスペクトル

最後に増幅しないでファイバ伝搬する実験を行った。図 11 はファイバレーザ発振器のスペクトルで、図 12 は増幅しないで高非線形分散シフトファイバに入射したときの

スペクトルである。図 12 を見ると 1586 nm に小さなピークが出来ただけだった。これはパルス幅が延びていないので多少の非線形効果が起こり、小さなピークが現れたが、スーパーコンティニウムを発生するには強度が十分でなかったためと考えられる。

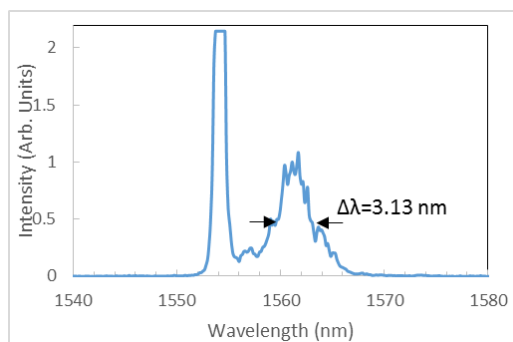


図 11 ファイバレーザ発振器のスペクトル

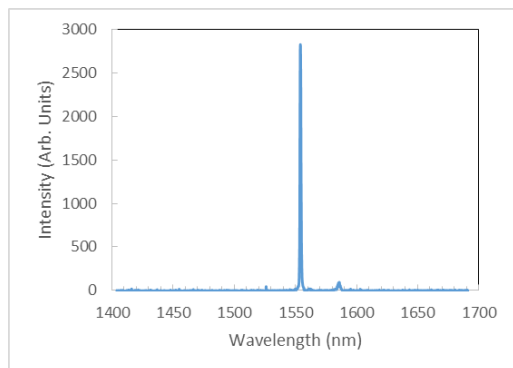


図 12 高非線形分散シフトファイバ通過後のスペクトル

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)

Shinki Nakamura, Yuto Hikita, Hiroyasu Sone, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, "High-Power Diode-Pumped Mode-Locked Yb:YAG Ceramic Laser," *Optical Review*, Vol. 21, No. 3, pp. 401-403, June (2014). 査読有

〔学会発表〕(計 4 件)

葛 帥, 曾根宏靖, 古瀬裕章, 中村真毅, 「ピスマス系高濃度 Yb 添加ファイバによる 1.3 μm 帯の蛍光特性」, 平成 27 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2015 年 11 月 7 日, 北見.

Shinki Nakamura, Taishi Agata, Takayo Ogawa, Mikio Higuchi, Satoshi Wada, "Laser Performance of Yb-doped Vanadates Grown by Floating Zone Method," in *Advanced Solid-State*

Laser Congress (ASSL2013), Oct. 27-Nov. 1, 2013, Paris, France.

Shinki Nakamura, Yuto Hikita, Hiroyasu Sone, Takayo Ogawa, Satoshi Wada, "High-power diode-pumped mode-locked Yb:YAG ceramic laser," in the 10th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'13), Sept. 2-5, 2013, Utsunomiya, Japan.

櫻原翔太, 中村真毅, 鶴野克宏, 小川貴代, 和田智之, 「モード同期 Yb 添加 YAG セラミックレーザの高出力化」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 2013 年 9 月 18 日, 京田辺.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 真毅 (NAKAMURA SHINKI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90323211

(2) 研究分担者

曾根 宏靖 (SONE HIROYASU)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00333667