

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15192

研究課題名(和文)空間波長分布により利得狭窄を抑制した高出力超短パルスレーザーの開発

研究課題名(英文)Development of high-power ultrashort pulsed laser with gain narrowing suppression by spatial wavelength distribution

研究代表者

北島 将太郎(Shotaro, Kitajima)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80850544

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):本研究は利得狭窄を抑制し産業的に有用な高出力超短パルスレーザー光源を可能とする新規手法を提案するものである。数値解析の結果によって設計変更を余儀なくされ、研究期間中には実際の超短パルスレーザー増幅には至らなかった。しかしCW発振にてYb:KREW結晶を用いたレーザーとして最高の出力強度(138 W)を達成したうえ、7 kW/cm²の高い励起強度でも耐性を持つディスクモジュールを開発できたことは、高出力な超短パルスレーザー発振器及び増幅器の開発において大きな価値を持つと考える。今後は得られたディスクモジュールをもとに本来の目的である超短パルスレーザーの増幅とコンセプトの実証を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた高出力動作が可能なYb:KLuW薄ディスクレーザーモジュールを用いれば、これまで得られていなかったような広帯域な超短パルスレーザーの発振、増幅が高い出力レベルで達成できる。これらのレーザーは特殊な機械加工など産業用途において有用であるうえ、高いエネルギーを生かして高次高調波発生や非線形分光などの分野においても応用の幅を広げることができる。

研究成果の概要(英文):This study proposes a novel method to suppress gain narrowing and enable an industrially useful high-power ultrashort pulse laser source. The design had to be changed according to the results of numerical analysis, and actual amplification of ultrashort laser pulses could not be achieved during the research period. However, we achieved the highest output power (138 W) for a laser using Yb:KREW crystals in CW oscillation and developed a disk module that is capable of withstanding high pumping intensities of 7 kW/cm². The disk module is expected to be of great value in the development of high-power ultrashort laser oscillators and amplifiers. We will use the obtained disk module for the amplification of ultrashort pulsed lasers, which is the original purpose of the project, as well as for proof of concept.

研究分野：レーザー工学

キーワード：レーザー フェムト秒レーザー 薄ディスクレーザー 高出力レーザー 半導体直接励起固体レーザー

1. 研究開始当初の背景

超短パルスレーザーは産業と理学応用の幅広い分野で利用されており、中でも Yb 添加利得媒質をベースとしたレーザーはその高い出力と安定性により、近年特殊な機械加工用途での需要が高まっている。超短パルスレーザーを用いると、ガラスなどの透明材料の加工、3次元微細加工、表面改質など、これまで難しいとされてきた数多くの加工が実現できる。これらの応用に用いるためにはより短いパルス幅・より高い出力のレーザーが安価で実現されることが、加工品質の向上とコストの削減に大きく寄与する。中でもパルス幅は加工用レーザーのパラメータとして特に重要なものであり、例えば有機 EL ディスプレイ用の薄膜や、熱の影響を受けやすいポリマーの加工などはピコ秒(10-12 秒)のパルス幅では不可能で、フェムト秒のレーザーが必要である。よってフェムト秒のパルス幅と高い出力を兼ね備えた超短パルスレーザーの開発は産業界に大きな波及効果がある。

高出力なフェムト秒レーザーを発生させる際の最も大きな阻害要因として、利得狭窄と呼ばれる現象がある。これはレーザー媒質の利得スペクトルが有限の幅と平坦ではない形状を持つことにより、レーザーを増幅すればするほどパルスのスペクトルが徐々に狭まってしまいう現象である。レーザーのスペクトル幅とパルス幅は反比例の対応関係があるため、より高いパルスエネルギーを得ようとするほどパルス幅が広がってしまうというトレードオフの関係が生じてしまう。実際に最先端の超短パルス Yb レーザーの例をとっても、パルスエネルギー100 mJ 以上のレーザーではパルス幅は短くても 1 ps 程度に制限されている。利得狭窄はレーザー研究の初期段階から今日まで研究者が継続して挑戦してきた究極のパルス幅制限要因であり、影響を抑える手法もこれまでも数多く提案されてきた。代表的なものとして薄膜スペクトルフィルタによる損失変調や、種光源のスペクトル形状を予め変調することによる補償などがあるが、これらの方法はいずれも全体のエネルギー効率が低くなる傾向があり、出力のスケーリングに限界を抱えていた。

2. 研究の目的

本研究はこのような背景から、利得狭窄を抑制し、産業的に有用な高出力・フェムト秒超短パルスレーザー光源を可能とする新規手法を提案するものである。本研究では超短パルスレーザーの増幅においてパルス幅劣化の主要因である利得狭窄の克服を目的とし、空間波長分布を利用した新コンセプトの増幅器を開発し、その原理実証を行う。基本的な原理は、レーザー光を波長ごとに空間的に分解し、それぞれに均一な利得を与えることで、スペクトルの狭窄を抑制することである。波長ごとの分解は回折格子によって行われ、均一な利得は励起レーザーの空間強度分布を適切に変調することにより達成される。これにより提案手法は増幅器の利得スペクトルを必要な波長幅において平坦にすることができ、増幅後パルスのスペクトルは増幅器の帯域幅による影響を受けずにスペクトル幅を保つことができる。

3. 研究の方法

研究の実施に先立ち数値解析を行ったところ、当初の設計では結晶が厚すぎて熱的影響が避けられないことが判明した。そこで①結晶を薄ディスクレーザーのように数百 μm 程度まで薄くする、②それに伴い吸収長を稼ぐためのマルチパス光学系を使用する、③より広帯域な増幅を行えるよう、タングステン酸塩系母材を用いた利得媒質を使用する、といった設計の変更を行った。結果として、実験の方法には多重パス励起モジュールの構築や利得媒質の基礎的な計測といった項目が追加された。具体的な研究ステップは以下のとおりである。

- ・利得媒質モジュールの作製・試験
- ・励起光学系の作製
- ・高密度励起耐力試験のための CW レーザー発振実験
- ・利得変調励起光学系の構築
- ・増幅器の構築及び超短パルス増幅実験

4. 研究成果

以下に具体的な研究成果を示す.

・300W 級薄ディスクレーザー励起光学系の構築

薄ディスクレーザーの励起のための多重パス励起光学系を構築した. 図 1 に CAD での設計 (上から見た図) と, 実際に構築した光学系を示す. 励起光源には 980nm 帯ファイバー結合型 LD を用いた. 光学系は主にファイバーコリメーター, ディスク冷却保持部, 多重パス光学系からなり, ファイバーからの出射光をレンズにてコリメートしたのち, 放物面鏡によりディスク上にファイバーの端面を像転送する形で集光され, 反射された光がプリズムミラーにて再び放物面鏡に直入射されることで多重にディスクを反射する構成となっている. 本モジュールでのパス数は往復で 12 反射, 24 パスとなっている.

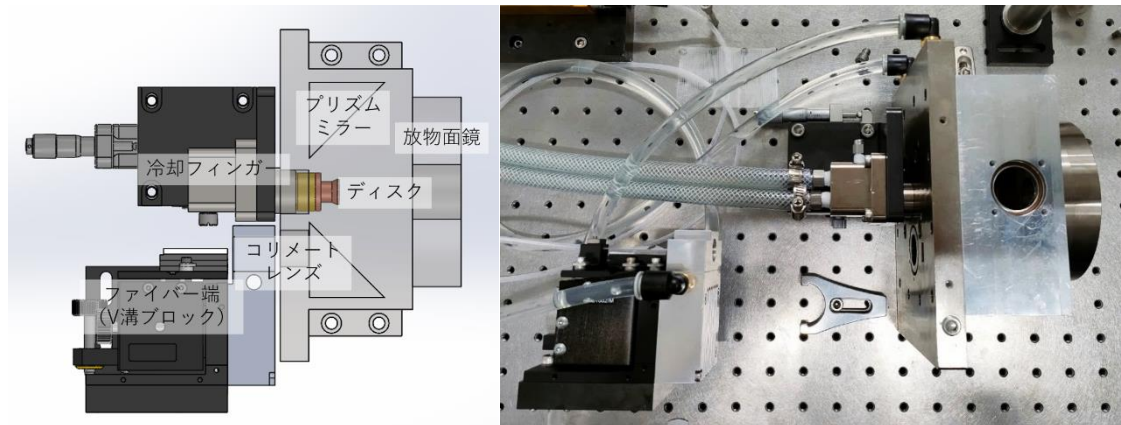


図 1. 作製した 300W 級薄ディスクレーザー励起用多重パス光学系.

図 2 に励起スポットの様子を示す. きれいな円形のスポットに励起されていることがわかる. 励起径はファイバーのコア径, コリメーターレンズの焦点距離, 放物面鏡の焦点距離により決定される. 今回作製した光学系においてはコリメーターレンズの選択により 4mm から 1.6mm までの調整が可能である.

LD の出力は温度制御により中心波長をコントロールしている. しかし実際には図 3 に示すように, 出力の強度に応じて中心波長は 970 nm から 981 nm にシフトした. 使用する利得媒質である Yb:KREW の吸収ピークは 981nm であり, 低パワー領域では残留励起光がファイバー側に戻ってしまう. 実際にこの光学系で励起を試みたところ, ファイバー端面やコリメーターレンズの破損が発生した. そこで①コリメーターレンズのホルダーを水冷化する, ②ファイバー端面をコネクタではなく V 溝で固定し, 空間的に隔離する, の 2 点の対策を実施したところ, 最大励起強度まで戻り光による破損は生じなくなった. なおこの時のコリメーターレンズの温度を計測したところ 80℃程度までの上昇がみられた. これは熱膨張による破壊閾値よりは十分低いが, 熱による焦点距離の微小な変動を引き起こすため, ファイバー端面とレンズの間の距離を微調整することでスポットの形状を保つ必要がある. なおこの励起光学系には空間的に利得の変調を生み出す構造は含まれていない.

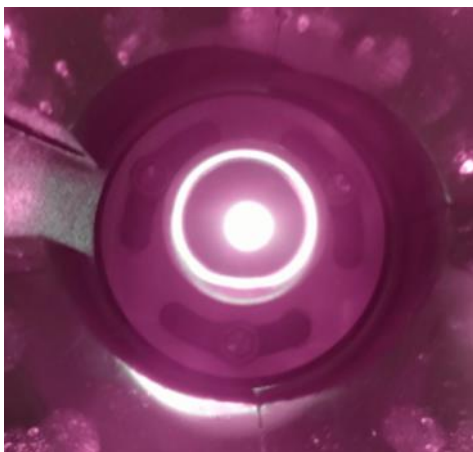


図 2. ディスク上での励起スポット

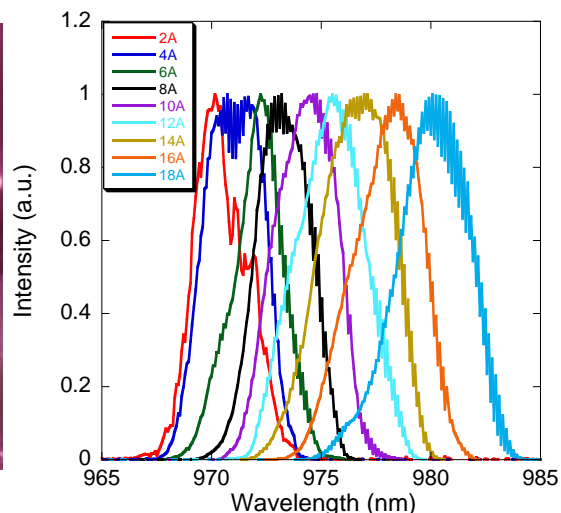


図 3. LD の印可電流による出力波長の変化

・Yb:KLuW 薄ディスクレーザー媒質の作製

本研究では、利得帯域幅が Yb:YAG などと比べて広く (20 nm), かつ高い誘導放出断面積を併せ持つ Yb 添加タンクステン酸塩系利得媒質を採用した. タングステン酸塩は $AB(WO_4)_2$ という化学式で表され, 中でもレーザー媒質としてはカリウムと希土類元素を元とした, $KRE(WO_4)_2$ (KREW) が用いられる. 希土類元素 (RE) には Y, Gd, Lu などが用いられるが, 特性上の違いは少ない. 本研究では入手性の点より Yb:KLuW を選択した. 結晶構造は単斜晶系であり, 光学的には二軸性結晶である. 前述の通り分光学的には優れた特性を示すが, その一方で熱的・機械的に強い異方性を持つことが, 高出力レーザー用の媒質としては欠点となる. 実際に現代において Yb:YAG や Yb:Lu₂O₃ といった等方性の媒質においては kW 級の出力が実現されているものの, Yb:KREW レーザーにおいては 2001 年の 73W という出力が未だに最高記録である.

本研究ではまず Yb:KREW を用いた薄ディスクレーザーを作製するにあたり, 熱機械的異方性がどのように波面に影響するかを, 有限要素法を用いた計算により評価した. その結果, 変更の方向を適切に選択すれば, 熱レンズ効果と熱膨張効果は打ち消しあい, 共振器の設計によって十分補償可能な波面歪みの範囲に収まることが分かった (図 4).

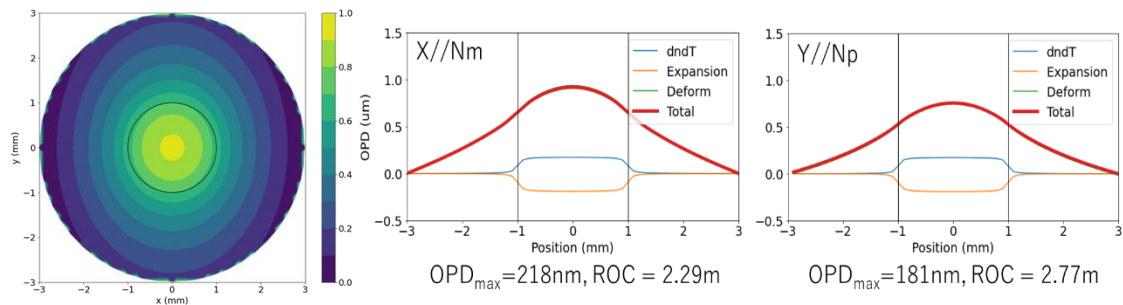


図 4. 異方性を考慮した熱的波面変化の計算結果

上記の計算結果を踏まえ, 厚さ 130 μm の 5at.% 添加 Yb:KLuW 薄ディスクを作製した. ディスクは銅製ヒートシンク上に銀ナノ粒子接着剤を用いて固定した.

・高出力高効率 Yb:KLuW 薄ディスクレーザー

作製した Yb:KLuW 薄ディスクを用いて CW レーザー発振実験を行った. 共振器構成はディスクと凹面出力結合鏡(OC)のみで構成されたシンプルな直線共振器とした. OC には曲率半径 500 mm, 透過率 2% のものを用いた. この構成ではディスク上での基本モード径が励起径よりも十分に小さいため, マルチモードでの発振となる. レーザー発振中のディスク表面の温度をサーマルカメラを用いて計測した.

図 5 に励起強度に対するレーザーの出力強度と効率を示す. 今回は 2 つの励起径, 2.73 mm と, 2.24 mm にて実験を行った. 一般に励起径が小さいほど励起密度が上がるため閾値が下がり効率が上昇するが, その分温度上昇も早くなり熱的波面擾乱や媒質破壊が生じやすくなる. 上述の通り励起 LD の中心波長が印可電流によって大きくシフトしてしまうため, 図 3 に示した LD の発振スペクトルと, Yb:KLuW の吸収スペクトルより求めた多重パスを考慮した吸収率を掛けることで吸収励起光強度で規格化する補正を行った. 図 5 を見ると, 吸収率の補正を行った方がより直線的に出力が上昇しており, 理論に沿ったふるまいであると確認できる. なおこの補正は吸収量の比に応じて規格化を行っているのみであり, 実際の吸収励起光強度は光学系の損失などによりこれより低下すると考えられる.

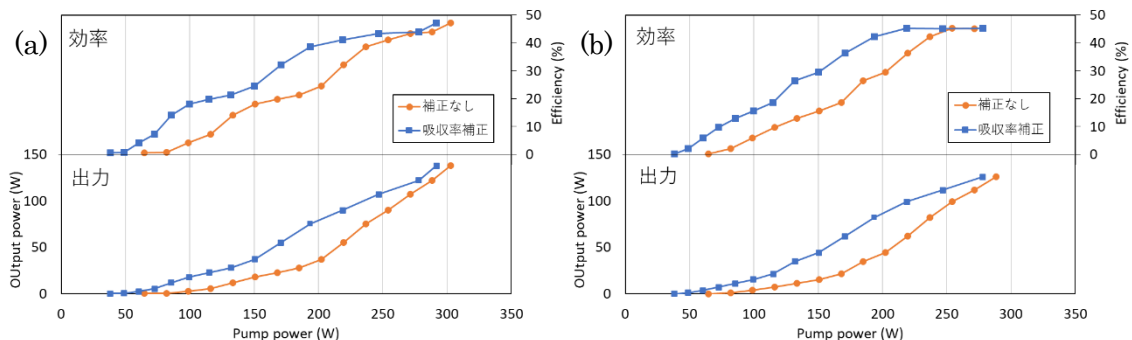


図 5. CW レーザー発振実験の結果. (a) 励起径 2.73 mm, (b) 励起径 2.24 mm

励起直径 2.73 mm のとき、最大出力 138 W, 光-光変換効率 47.3%を得た。スロープ効率は 62%であった。スロープ効率において先行研究の最高記録に劣るものの、最大出力は 2 倍程度を達成しており、Yb:KREW 利得媒質を用いた更なるパワースケーリング可能性が実証された。励起直径 2.24 mm の実験では最大出力 126W, 光-光変換効率 45.3%を得た。本来ならば励起直径が小さい実験のほうが効率は高くなるはずだが今回は 2.24 mm 励起のほうが効率が低下した。これは 2.73 mm の実験と 2.24 mm の実験の間にプリズムミラーの光学薄膜が劣化したことが原因である。これはプリズムミラーの基部の材料である鋼の熱膨張によって光学薄膜が剥がれ落ちてしまったことが原因であり、今後はプリズムミラーを研磨・コーティングしなおすとともに、励起チャンバー全体の水冷化を検討している。

図 6 にレーザー発振中の励起強度に応じたディスク表面の最大温度の推移を示す。最高到達温度はそれぞれ 79.0 °C, 86.9 °Cであった。2.24 mm において高い励起強度にて温度上昇の傾きが緩やかになっているのは、LD の発振波長が最適値を超えて上昇し、吸収効率が下がっているためだと考えられる。この時の最大励起強度は 2 つの条件でそれぞれ 4.98 kW/cm², 7.05 kW/cm²であった。これにより高い励起密度に対しても十分な耐力を持つディスクの品質が実証された。また計算されたディスク全体の実効熱抵抗はそれぞれ 0.187 Kcm²/W, 0.176 Kcm²/Wであった。本来同じ値になるはずの熱抵抗が実験条件により異なったのは、これもまた上述のプリズムミラーの劣化による実際の吸収量の低下が原因だと考えられる。これらの値は最先端の Yb:YAG を用いた薄ディスクレーザーと比べても同等であり、薄い利得媒質と低熱抵抗接合技術が寄与していると考えられる。

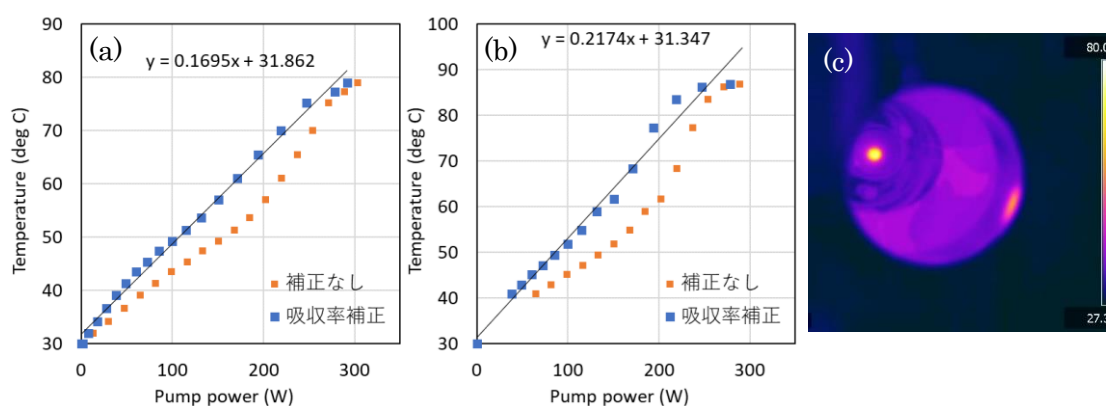


図 6. ディスク表面の温度変化 (a) 励起径 2.73 mm, (b) 励起径 2.24 mm, (c)サーマルカメラにて記録されたディスクの温度分布. 励起径 2.73 mm, 励起強度 300 W 時

本来であれば高出力なレーザー発振に耐える品質が確認されたのち、超短パルスレーザーの増幅に移る予定であったが、研究代表者が所属機関を移った影響もあり予算の用途の変更を余儀なくされ、利得変調のための励起モジュールの製造は行えなかった。よって今後はディスク上での空間的利得変調励起光学系の構築と、それを用いた利得狭窄保証型増幅器の実証を行う予定である。

しかしこれまでに得られた研究成果だけでも Yb:KREW 結晶を用いたレーザーとして最高の出力強度を達成したうえ、7 kW/cm²の高い励起強度でも耐性を持つディスクモジュールを開発できたことは、高出力な超短パルスレーザー発振器及び増幅器の開発において大きな価値を持つと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shotaro Kitajima, Akira Shirakawa, Hideki Yagi, and Takagimi Yanagitani	4. 巻 46
2. 論文標題 Kerr-lens mode-locked Yb:LuAG ceramic thin-disk laser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 2312-2315
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.423865	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 北島 将太郎、時田 茂樹、河仲 準二
2. 発表標題 タンクステン酸塩利得媒質を用いた Thin-disk レーザー
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------