

微細加工のための高出力・高繰り返し超短パルス光源開発

名古屋大学大学院 工学研究科電子工学専攻

助教 北島 将太郎

(2021 年度 奨励研究助成 (若手研究者枠) AF-2021232-C2)

キーワード：超短パルスレーザー，高出力レーザー，薄ディスクレーザー

1. 研究の目的と背景

現代の小型電子機器、医療機器、モビリティなどの分野では、製品の高性能化・軽量化といった需要に加え、持続可能性を見据えた機器の高効率化や高度化が求められている。そのためにはこれまで量産工程では行われてこなかった高付加価値な加工の需要が高まっている。具体的には金属やセラミックなどに対する微細な穿孔や溶接、超撥水や低摩擦などの特殊な表面加工、樹脂やガラスなどの透明媒質の内部加工、3D プリンターによる微細積層加工などである。これらの加工を産業的に可能とするツールが高出力な超短パルスレーザーであり、現在幅広い分野での導入が進んでいる。中でも Yb 添加薄ディスクレーザーをベースとしたモード同期発振器は現代において最も高い平均出力を得られる超短パルスレーザーの生成法である。薄ディスクレーザーとはその名の通り厚みを数百 μm 程度に薄くした媒質をヒートシンクに接合し、背面冷却構造を用いるレーザーであり、媒質の熱的影響と非線形光学効果を抑えられることから現在の高出力超短パルスレーザーの主流形式である。これまで Yb:YAG や Yb:Lu₂O₃ などの材料を用いた薄ディスクモード同期レーザーにて ~ 100 fs 程度までの短パルス化が報告されているが [1-3]、材料固有の利得帯域幅 (Yb:YAG で 9nm, Yb:Lu₂O₃ で 13nm) により、短パルス化の流れは世界的に数年ほど足踏みが続いている。上記のような理由から本研究では、薄ディスク超短パルスレーザーの更なる短パルス化を目指し、広帯域な利得媒質である Yb 添加タングステン酸塩系利得媒質 (Yb:KREW, Yb:KRE(WO₄)₂) を用いた薄ディスクモード同期レーザーの開発を目指す。

表 1 代表的な Yb 添加媒質の物性値

利得媒質	Yb:YAG	Yb:Lu ₂ O ₃	Yb:KGW
蛍光帯域 FWHM(nm)	9	13	20
誘導放出断面積 (10 ⁻²⁰ cm ²)	2.0	1.2	3.0
熱伝導率(W/mK) (添加濃度)	5.5 (10%)	12.5 (3%)	3.3 (5%)

表 1 に代表的な Yb 添加利得媒質の物性値の比較を示す。Yb:KGW はタングステン酸化物系の透明結晶であり、高

い誘導放出断面積と広い利得帯域幅 (20 nm) を併せ持つことから、高出力な超短パルスレーザーが得られると期待される媒質である。しかし本材料を用いた薄ディスクレーザーは 2000 年代に少数の報告があつて以来殆ど研究がなされていない [4,5]。これは Yb:KREW が比較的低い熱伝導率を持つことと、大きな熱膨張係数の異方性を持つことが原因であると考えられる。低い熱伝導率はレーザー媒質の温度上昇を促し、異方性のある熱膨張係数は温度の上昇に伴い結晶を非対称に歪めてしまうため、高出力なレーザーを目指すうえではこれらは大きな障害となりうる。本研究では新たな薄ディスクのヒートシンクへの接合法と、共振器による熱的波面歪みの補償を用いることで、これらの課題を解決し、高付加価値な機械加工に資する高出力超短パルスレーザーの開発を進めることを目的とする。

2. 研究方法

具体的な研究方法として、①薄ディスク利得媒質モジュールの開発、②CW レーザー発振実験、③モード同期超短パルスレーザー発振実験、という 3 ステップで研究を進めた。以下に詳細を記述する。

2.1. 薄ディスク利得媒質モジュールの開発

薄ディスク利得媒質モジュールは、結晶利得媒質を数 100 μm の厚さに研磨し、両面をコーティングし、ヒートシンクに接合を行うことで作製される。私はこれまでの研究で UV 硬化樹脂を用いたヒートシンクへの独自の接合法を確立し、複数の材料にて励起密度 6 kW/cm²、出力 200W 以上の連続波発振を達成している [6,7]。薄ディスクの熱抵抗においてもっとも大きな要素となるのが利得媒質とヒートシンクの接合である。利得媒質やヒートシンクの熱抵抗には絶対に低減できない限界があるのに対し、接合の熱抵抗は原理的には限りなく小さくすることで可能である。このため接合方法の改善は最も重要な開発要素である。

本研究では更なる低熱抵抗を目指すために、まず温度と圧力を精密に制御できる接合装置の開発を行った。図 1 に作成した接合装置の写真を示す。装置は温度制御可能なヒーターと圧力制御可能なプレス機、そして UV 照射用 LED で構成され、接合部を温めつつ圧力をかけた上で接着剤を硬化させることができる。硬化前の接着剤は温めることで粘度が下がり、更に適切な圧力をかけることで均一かつ極小な接合層の厚みを実現できる。



図1 薄ディスク利得媒質モジュール接合装置

また、これまで銅を用いていたヒートシンクを、CVD合成ダイヤモンド製へと置き換える。ダイヤモンドは銅と比べても3倍以上熱伝導率が高いため、これも温度上昇の抑制に寄与すると考えられる。

実際に接合を行い、その品質を評価するためには、熱抵抗を高精度に測定する実験系の開発も重要な要素となる。図2(a)に本研究で開発した薄ディスクモジュールの熱抵抗測定系を示す。測定原理は定常熱流法であり、薄ディスクモジュールの背面を実際のレーザーと同じように水噴流冷却することで一定温度に保ち、媒質表面に半導体レーザーを照射することで熱を加え、表面温度を計測することにより系全体の実効熱抵抗を計測する。レーザー光の吸収は、実際の利得媒質の場合はその吸収、模擬利得媒質の場合は表面に黒インク塗布することで生じさせた。温度計測はサーモカメラ (FLIR社 A 320) にて行い、予め励起レーザーのビーム径およびパワーを計測することにより入熱密度を算出した。図2(b)にサーモカメラでの表面温度の測定の例を示す。直径6mmの円形に均一に加熱されていることがわかる。

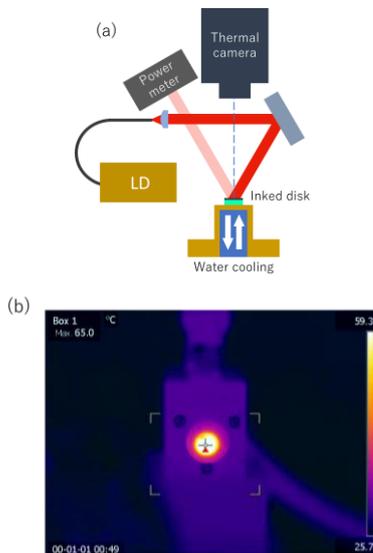


図2 (a)熱抵抗測定装置概略図 (b) 温度測定例

2.2. CWレーザー発振実験

試料が完成したら、ディスクの波面をマイケルソン干渉計とフーリエ変換法にて評価する。問題がなければ(十分に大きな曲率半径を持ち、非点収差が小さい)、CW(連続波)レーザー発振実験を行う。CWレーザー発振実験では開発済みの24パス多重励起光学系と、980nm帯半導体レーザーを用いて励起し、I字型の単純な共振器にてレーザー発振を行う(図3)。CWレーザー発振実験の評価項目として最大出力、スロープ効率、そして最大励起密度が挙げられる。

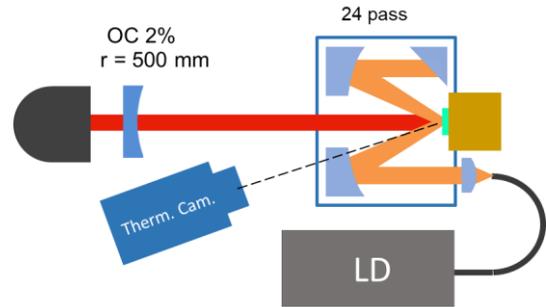


図3 CWレーザー発振実験光学系

2.3. モード同期超短パルスレーザー発振実験

モード同期超短パルスレーザーの開発は、シミュレーションと実際の共振器構築の2段階で行う。図4に共振器の概略図を示す。超短パルス発生の手段には短パルス化に最適なKerrレンズモード同期(KLM)を採用し、その実現のために共振器中にKerr媒質とスリットを挿入する。共振器設計のシミュレーションは光線行列を用いた自己無撞着法で行い、光カー効果、熱レンズ効果による屈折率分布の変化も考慮に入れる。また、Split step Fourier法による共振器内のパルスの成長過程の解析も併せて行う。

シミュレーションにて設計した共振器を元に超短パルスレーザーの構築を行い、レーザー出力の特性評価(入出力特性、パルス幅、スペクトル等)を行う。必要に応じて分散値や共振器長などの設計を見直し、レーザーの最適な動作点を実験的に探す。このようなピークパワーの高い共振器において短いパルス幅を実現するためには、共振器内の群遅延分散は勿論、カー媒質による自己位相変調、高次分散等の要素を深く吟味する必要がある。

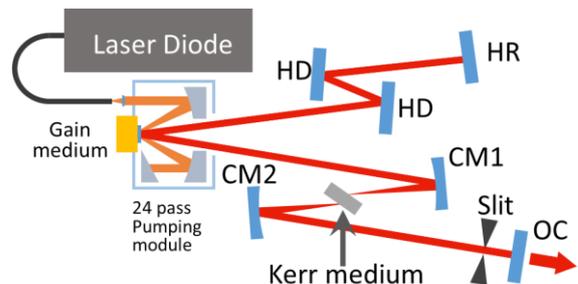


図4 Kerrレンズモード同期超短パルスレーザー発振実験光学系

3. 研究成果

3.1. 低熱抵抗接合法の確立

開発した装置を用いて接合を行い、熱抵抗の測定を行った。これまでにヒートシンクをアルミニウム合金と多結晶ダイヤモンドの二種、接合方法を UV 硬化樹脂及びナノダイヤモンド分散ペーストの二種を試し、その熱抵抗を計測した。表 2 に本研究にて測定したサンプルの条件を示す。模擬利得媒質として厚さ 0.3 mm のサファイア基板を用いた。模擬利得媒質の熱抵抗が低いほど接合層の熱抵抗の算出が精度良く行えるため、熱伝導率の高いサファイア基板を選択した。

表 2 接合実験条件

	ヒートシンク	接合方法	圧力
#2	A5025	UV硬化接着剤	50kg
#3	A5025	ダイヤモンドペースト	載せただけ
#4	A5025	UV硬化接着剤	0kg
#5	ダイヤモンド	ダイヤモンドペースト	載せただけ

図 5 は熱抵抗測定装置にて測定された各サンプルモジュールの表面最大温度の変化である。全てのサンプルにおいて熱負荷の増加に対して表面温度が線形に上昇していることが分かる。グラフの傾きは熱抵抗となるため、線形な増加は測定が正確に行えていることを示している。グラフの傾きより算出された単位面積当たりの熱抵抗を表 3、「全体」列に示した。圧力以外同条件の#2 と#4 を比較すると、圧力の印可によって熱抵抗が大幅に減っていることが分かる。これは接合層が薄いほど熱抵抗が低下することに起因している。

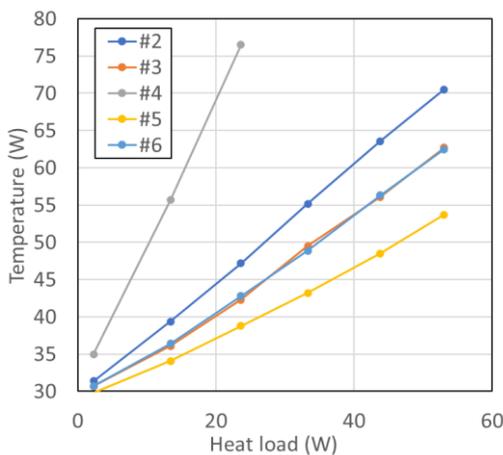


図 5 熱抵抗測定結果

表 3 に測定結果及び文献値より算出した各部分の熱抵抗を示す。全体の熱抵抗としてはダイヤモンドヒートシンクとダイヤモンドペーストを組み合わせさせたサンプル#5 が

最も低い熱抵抗 0.163 Kcm²/W を示した。表 3 の媒質、ヒートシンクの熱抵抗は物性値より計算された理論値である。また「余分熱抵抗」は接合を行っていないヒートシンクのみを熱抵抗を測定することによって得た実験的補正值であり、インク層の熱抵抗や水冷界面が完全に定温でないことに起因すると考えられる。これらを全体熱抵抗から差し引くことで接合層の熱抵抗を算出した(表 3「接合層」列)。その結果ダイヤモンドペーストにて熱抵抗 0.01 Kcm²/W 以下、UV 硬化樹脂にて 0.058 Kcm²/W の結果を得た。熱抵抗から逆算された接着剤層の厚みは 1.2 μm 程度であり、十分な低熱抵抗を実現できている。しかし本研究にて初めて導入されたダイヤモンドペースト接合は従来の UV 硬化樹脂と比べて圧倒的な低熱抵抗を実現可能だということが判明した。接合層の熱抵抗を 0.01 Kcm²/W と仮定し、厚さ 130 μm の Yb:Lu₂O₃、ダイヤモンドヒートシンクを用いたと仮定すると、全体の熱抵抗は 0.074 Kcm²/W と計算される。これは利得媒質の温度が 100 °C に上がるのに 21 kW/cm² の励起強度が必要となる極低熱抵抗である。

表 3 熱抵抗測定結果

サンプル	単位面積熱抵抗 (Kcm ² /W)				
	全体	媒質	ヒートシンク	余分熱抵抗	接合層
#2	0.268	0.091	0.071	0.047	0.058
#3	0.216	0.091	0.071	0.047	0.007
#4	0.750	0.091	0.071	0.047	0.541
#5	0.163	0.091	0.010	0.053	0.009
#6	0.225	0.091	0.071	0.047	0.016

3.2. CW レーザー発振実験

最適化された接合条件を用いて、厚さ 130 μm の Yb:KLuW ディスクを用いたモジュールを作製した。それを用いて図 3 の光学系を構築することで CW レーザー発振実験を行った。図 6 に CW レーザー発振実験の入出力特性及び温度分布計測の結果を示す。実験の結果、最大出力 138 W、光-光変換効率 47.3%を得た。上述の通り励起光源の中心波長が強度に依存して変動するため、吸収効率は計算値で 57.7%から 96.8%の間で変動した。図 6 (a) の青線はこの吸収率の変動を補正した値であり、補正なしの場合と比べてレーザーの出力がより直線的に増加していることがわかる。このときのスロープ効率は 60%であった。ディスク表面の最高到達温度は 303 W 励起時で 79.0 °C であった(図 6 (b), (c))。このときの励起密度は 4.98 kW/cm² であり、そこから計算される実効熱抵抗は 0.187 Kcm²/W であった。このように高い励起密度においてもディスクの破壊や変形は生じず、高い耐力が実証された。以上の結果より、本研究で開発したタングステン酸塩系薄デ

ィスク利得媒質は、励起径を拡大することで数百 W 級の超短パルスレーザー発振器及び増幅器に用いることが可能であると考えられる。

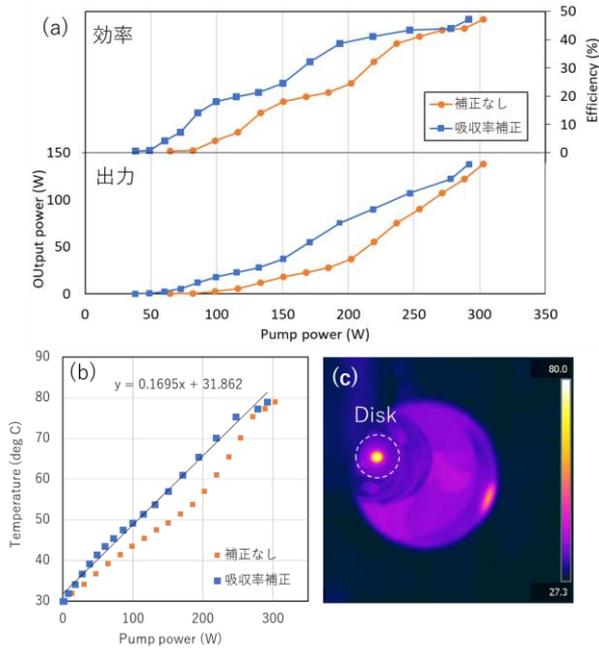


図6 CWレーザー発振実験結果 (a) 入出力特性, (b) 発振中のディスク表面温度(c) ディスク温度分布

3.3. モード同期超短パルスレーザー発振実験

CW 発振実験にてディスクモジュールの耐力が実証されたため、次にモード同期超短パルス発振実験を行った。共振器のセットアップは図4に示したとおりであり、Z型共振器を基本とし、曲率半径 500 mm の凹面鏡二枚 (CM1、2) にて集光された点に Kerr 媒質として厚さ 2 mm の YAG を挿入した。ハードアパーチャーとしてアウトプットカプラー (OC) 付近にスリットを挿入した。共振器内の群遅延分散 (GDD) は高分散鏡 (HD) を用いることで調整した。モード同期は凹面鏡 CM2 を前後に動かすことで開始した。実験では GDD の量を $-4000 \text{ fs}^2/\text{roundtrip}$ (RT) から $-1000 \text{ fs}^2/\text{RT}$ まで段階的に調整し、 $-1400 \text{ fs}^2/\text{RT}$ まででクリーンなシングルパルスモード同期を得ることができた。図7に最も短いパルス幅を得られた条件、OC 透過率 0.6%、GDD $-1400 \text{ fs}^2/\text{RT}$ 、励起強度 300 W での出力パルスの自己相関波形、発振スペクトル及び RF スペクトルを示す。sech2 型を仮定したときのパルス幅は 48.9 fs であった。これはこれまでに報告されている Yb 添加タングステン酸塩系利得媒質を用いた超短パルスレーザーとして最小の幅である。スペクトル幅は 32.0 nm で、そこから計算される時間帯域幅積は 0.444 であった。一般に Kerr レンズモード同期の出力パルスはチャープの無いフーリエ限界に近いパルス幅を持つため、時間帯域幅積は 0.315 となるはずであるが、今回そこから離れた値となったことは、パルス幅が適切に計測できていないことを示唆している。今回計測に用いた自己相関計は結晶厚 1mm の比較的長いパルス用

の装置であったので、今後より短いパルスを測れる自己相関計を用意し、再度測定を行う予定である。スペクトル幅から計算されるフーリエ限界パルス幅は 35 fs である。

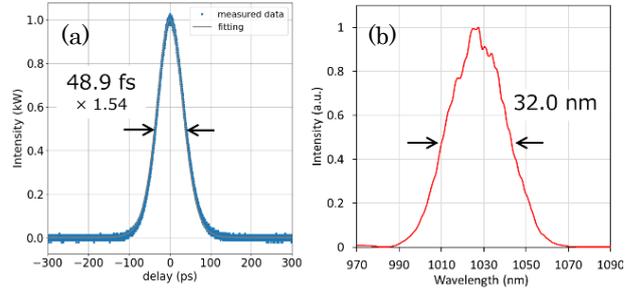


図7 Kerr レンズモード同期超短パルスレーザー出力特性 (a) 自己相関波形, (b) 光スペクトル

図8は出力光をフォトディテクターにて受光し、それを RF スペクトルアナライザにて測定した結果である。共振器長によって定まる繰り返し周波数は 57 MHz であった。狭線幅かつ 70dB の高い SNR、等間隔な高次ビートなどよりシングルパルスモード同期が確認された。

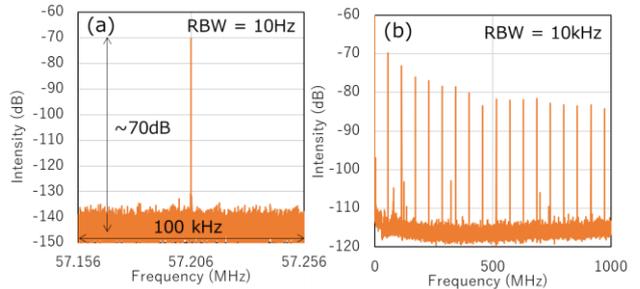


図8 KLM 発振器の RF スペクトル測定結果 (a) 基本ビート (b) 高次ビート

平均出力は 425 mW であった。これは低い OC の透過率によって制限されている。OC の透過率を 2% に上げると、平均出力 3.2 W、パルス幅 59.8 fs を得ることが出来た。OC の透過率を上げると共振器内パワーが減少し非線形性の低下を招くため、これ以上の高出力化は OC の透過率上昇だけでなく、共振器内平均出力の増加が必要となる。具体的には励起プロファイルの改善による利得の上昇、スリット幅の最適化による損失の減少が必要である。図9 (a) はモード同期発振時のディスク表面の温度分布を示している。このときディスクの最大温度は 64°C であった。CW 実験の際よりも温度の上昇が抑制されているのは、実効的な吸収パワーの減少が原因と思われる。励起光学系及び励起レーザーの最適化によって、より吸収パワーを増やすことができるが、現状はパワーの損失が大きい。図9 (b) はレーザー出力のモードプロファイルである。綺麗な円形のモードが確認された。ビーム品質を示す M^2 の測定は行っていないが、KLM は原理的にシングルモード発振をす

るため、 M^2 も 1 に近い値になっていると推測される。

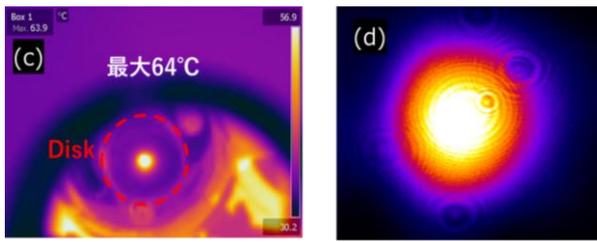


図 9 (a)温度分布, (b) ビームプロファイル

4. まとめ

本研究では微細加工用途に有用である高出力な超短パルスレーザーの開発を目的とし、Yb 添加タングステン酸塩利得媒質を用いた CW レーザー及び Kerr レンズモード同期超短パルスレーザー発振器の構築を行った。CW での最大出力 138 W は同材料グループを用いた中で世界最高出力である。更に Yb タングステン酸塩系利得媒質を用いた薄ディスク KLM の実証も世界初であり、また 48.9 fs は同材料での最短パルス幅である。本研究により同材料が高出力な超短パルスレーザー用の利得媒質として有用であることが示された。今後は共振器の更なる最適化によって実用性の高い高出力超短パルスレーザーの構築を目指す。

参考文献

- 1) J. Brons, V. Pervak, D. Bauer, D. Sutter, O. Pronin, and F. Krausz, "Powerful 100-fs-scale Kerr-lens mode-locked thin-disk oscillator," *Opt. Lett.* 41(15), 3567–3570 (2016).
- 2) Julian Fischer, Jakub Drs, Norbert Modsching, François Labaye, Valentin J. Wittwer, and Thomas Südmeyer,

"Efficient 100-MW, 100-W, 50-fs-class Yb:YAG thin-disk laser oscillator," *Opt. Express* 29, 42075-42081 (2021).

- 3) Norbert Modsching, Jakub Drs, Julian Fischer, Clément Paradis, François Labaye, Maxim Gaponenko, Christian Kränkel, Valentin J. Wittwer, and Thomas Südmeyer, "Sub-100-fs Kerr lens mode-locked Yb:Lu2O3 thin-disk laser oscillator operating at 21 W average power," *Opt. Express* 27, 16111-16120 (2019).
- 4) S. Erhard, J. Gao, A. Giesen, K. Contag, A. A. Lagatsky, A. Abdolvand, N. V. Kuleshov, J. A. d. Au, G. J. Spühler, F. Brunner, R. Paschotta, and U. Keller, "High power Yb:KGW and Yb:KYW thin disk laser operation," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, J. Kafka, K. Vahala, R. Williamson, and A. Willner, eds., OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2001), paper CWF2.
- 5) F. Brunner, T. Südmeyer, E. Innerhofer, F. Morier-Genoud, R. Paschotta, V. E. Kisel, V. G. Shcherbitsky, N. V. Kuleshov, J. Gao, K. Contag, A. Giesen, and U. Keller, "240-fs pulses with 22-W average power from a mode-locked thin-disk Yb:KY(WO4)2 laser," *Opt. Lett.* 27, 1162-1164 (2002).
- 6) Shotaro Kitajima, Akira Shirakawa, Hideki Yagi, and Takagimi Yanagitani, "Sub-100 fs pulse generation from a Kerr-lens mode-locked Yb:Lu2O3 ceramic thin-disk laser," *Opt. Lett.* 43, 5451-5454 (2018).
- 7) Shotaro Kitajima, Akira Shirakawa, Hideki Yagi, and Takagimi Yanagitani, "Kerr-lens mode-locked Yb:LuAG ceramic thin-disk laser," *Opt. Lett.* 46, 2312-2315 (2021).