

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14618

研究課題名（和文）極小の熱抵抗で実現する高密度励起薄ディスクレーザー

研究課題名（英文）High-density pumped thin disk lasers achieved with ultra-low thermal resistance

研究代表者

北島 将太郎 (Kitajima, Shotaro)

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では高い出力を実現できる薄ディスクレーザー媒質の作製プロセスに焦点を当て、これまでを凌駕する極小の熱抵抗を実現することで、更なる励起密度向上とパワースケーリングを目指した。接合装置の開発、熱抵抗測定系の構築、そして接合条件の最適化を行うことで、模擬利得媒質を用いた実験で全体の熱抵抗0.163 Kcm²/W、接合層の熱抵抗0.009 Kcm²/Wという値を得た。また実際の利得媒質を用いて実際に高出力レーザー発振実験を行い、連続波発振実験にて最大平均出力138 W、スロープ効率 62%、実効的熱抵抗0.198 K/cm²Wを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄ディスクレーザーは理論的にはビーム径を拡大することで無限のパワースケーリングが可能である。しかし実際には熱に起因する波面歪みによってビーム径の拡大は制限されてしまう。熱歪みを抑えるためにはより低い熱抵抗での利得媒質の接合が必要である。本研究は薄ディスクレーザーの更なる高出力化を目指し、低熱抵抗の接合法を接合装置の開発から行った。その結果接合層の熱抵抗はほぼ無視できる程度にまで減少できることを実証し、更に実際にレーザー発振実験を行いその有効性を検証した。この技術を適用することで、超短パルスレーザーの更なる高出力化を実現でき、広く社会に貢献することができると期待される。

研究成果の概要（英文）：This research focused on the fabrication process of a thin-disk laser medium capable of achieving high output power, and aimed at further pumping density improvement and power scaling by achieving an extremely low thermal resistance surpassing the previous one. By developing a bonding equipment, constructing a thermal resistance measurement system and optimising the bonding conditions, we obtained an overall thermal resistance of 0.163 Kcm²/W and a bonding layer thermal resistance of 0.009 Kcm²/W in experiments using a mock-up gain medium. In actual high-power laser oscillation experiments using the actual gain medium, a maximum average output power of 138 W, a slope efficiency of 62% and an effective thermal resistance of 0.198 K/cm²W were obtained in continuous-wave oscillation experiments. These values are of the same or higher quality than discs manufactured by overseas companies, and higher output power is expected in the future.

研究分野：レーザー工学

キーワード：高出力レーザー 超短パルスレーザー 薄ディスクレーザー

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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(Thin-disk laser)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。これらの特性により薄ディスクレーザーは高いパルスエネルギー($<100 \text{ mJ}$)と高い平均出力($<1 \text{ kW}$)を両立できる現在唯一の光源である。レーザーの出力増大(パワースケーリング)の方法はいくつかあるが、薄ディスクレーザーの場合は主にディスク上でのビーム径の拡大と、ディスク数を増やすことが行われてきた。これは単位面積当たりの入熱を小さくすることで最高到達温度を下げ、ディスクの破損を防ぐためであるが、ビーム径の拡大は共振器の不安定を、ディスク数の増大はシステムの複雑性を増すため、スケールには限界があった。単位面積当たりの入熱を減らさずに出力を増大するためには、ディスクモジュール全体の熱抵抗を低減し、高密度励起に対する耐力を向上する必要がある。もちろんこれまでも低熱抵抗化の研究は行われてきたが、近年は薄ディスクモジュールを企業から買っている研究者が大半となり、要素技術の研究は下火となっている。このような状況の中で、どれだけ低熱抵抗な薄ディスクモジュールを作れるか、それによりどれだけレーザーの出力を向上できるかは興味深い研究課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は伝熱工学的アプローチにて薄ディスクレーザーの励起密度耐性向上を図り、大幅なパワースケーリングを実現することである。熱抵抗が低いディスクほど強い励起をしても表面の温度が上がらず、結果として高い出力を得ることができる。そこで本研究は薄ディスクレーザーの伝熱工学的側面に焦点を当て、各要素を分解してそれぞれの要素にて熱抵抗減少の努力をすることで、全体の熱抵抗を $0.1 \text{ K/cm}^2\text{W}$ まで減らし、これまでを大幅に上回る、励起密度 15 kW/cm^2 を目指す。申請者はこれまでに $0.2 \text{ Kcm}^2/\text{W}$ 程度の熱抵抗を実現している。これは理論的な最大励起密度(レーザー発振効率が理想値の時に結晶表面が 100°C に到達する励起密度) 7.3 kW/cm^2 に相当し、実際に 5.9 kW/cm^2 での動作を確認している。本研究では(a) 高熱伝導・極薄型利得媒質の作製、(b) 接合装置の作製と新しい接合法の開発、(c) 合成ダイヤモンド製ヒートシンクの開発の3点を行い、それにより作製したディスクのレーザー発振・試験までを行う。

3. 研究の方法

具体的な研究の進め方として、①接合装置の作製と接合方法の試験を完了させて薄ディスク利得媒質モジュールを完成させ、2年目に②CW レーザー発振実験、③超短パルスレーザー発振実験を行い実用的な評価を行う。以下に各項目の詳細を記述する。

① 接合装置の作製と接合方法の試験

当初、本研究では利得媒質として Yb:Lu₂O₃ を用いる予定であったが、調達先の都合により困難になってしまったため、Yb:KLuW という材料を用いた。この材料は熱伝導率では Yb:Lu₂O₃ に大きく劣る(3.3 W/mK)ものの、広帯域な利得を持ち、超短パルスレーザーの生成に向く。そこで本研究ではモジュール全体での極限の熱抵抗低減というより、熱伝導率で劣るが有望な材料を、熱的影響を起こさずに使用するという若干の目標修正を行った。本研究では添加濃度 5%、厚さ $130 \mu\text{m}$ の Yb:KLuW を用意した。薄ディスク利得媒質モジュールは、結晶利得媒質を数 $100 \mu\text{m}$ 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。

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。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 1 接合装置

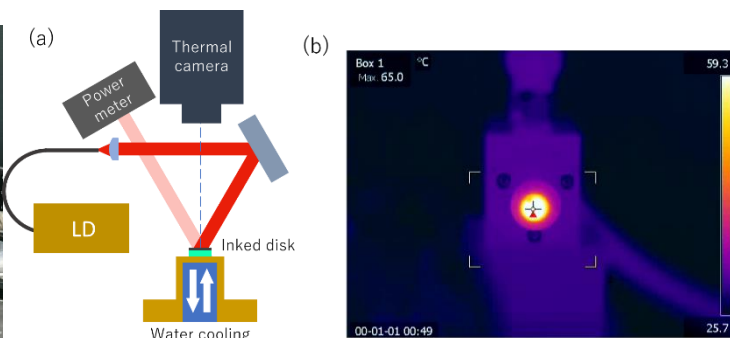


図 2 (a)熱抵抗測定装置概略図 (b) 温度測定例

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 半導体レーザーを用いて励起し、直線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。

③ 超短パルスレーザー発振実験

本研究の主目的である極小熱抵抗薄ディスクレーザーの開発は、高い励起密度に対する耐性が確認されたことで達成となるが、より発展的な計画として開発したディスクを光源に組み込み、更なる応用に利用可能な高出力な超短パルスレーザー発振器の開発に取り組む。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。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。

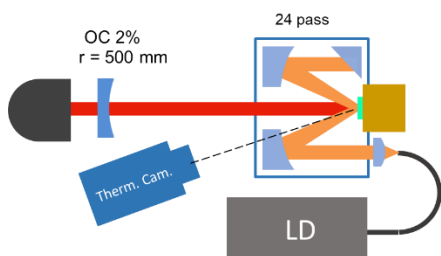


図 3 CW 発振実験系

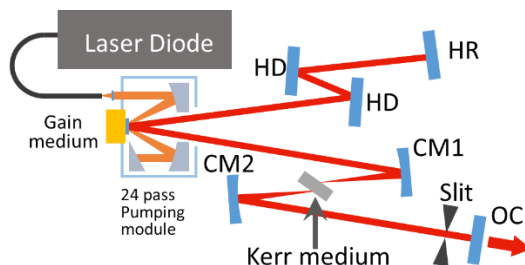


図 4 超短パルスレーザー発振実験系

4. 研究成果

4.1. 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 1 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。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。表 2 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。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「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。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たサンプル#5 が最も低い熱抵抗 0.163 Kcm²/W を示した。

表 1 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

表 2 熱抵抗測定結果

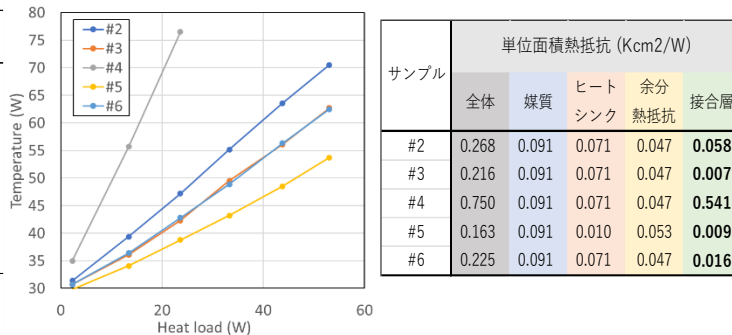


図 5 熱抵抗測定結果

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 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。

4.2. 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構築した。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。

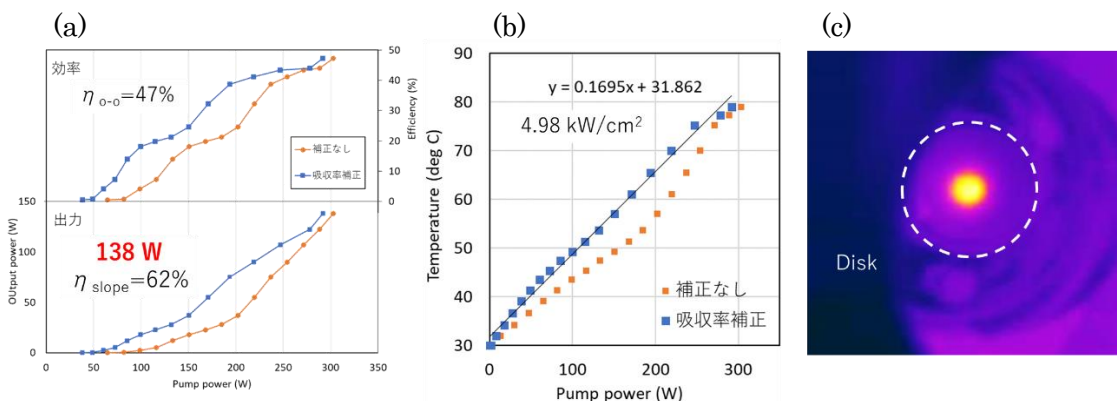


図 6 CW レーザー発振実験結果 (a) 入出力特性, (b) 発振中のディスク表面温度 (c) ディスク温度分布

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。

4.3. 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ップラー (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 fs²/roundtrip (RT)

から-1000 fs²/RT まで段階的に調整し、-1400 fs²/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 fs²/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系を用意し、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(c), (d) 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。

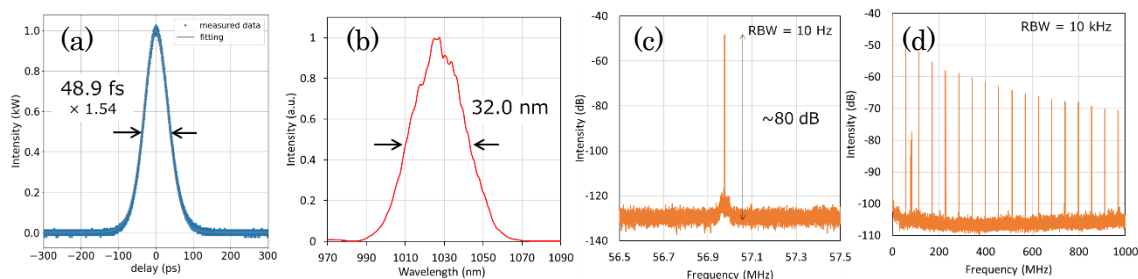


図 7 Kerr レンズモード同期超短パルスレーザー出力特性 (a) 自己相関波形, (b) 光スペクトル, (c), (d) RF スペクトル

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。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 8(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 8(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 M2 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、M2 も 1 に近い値になっていると推測される。

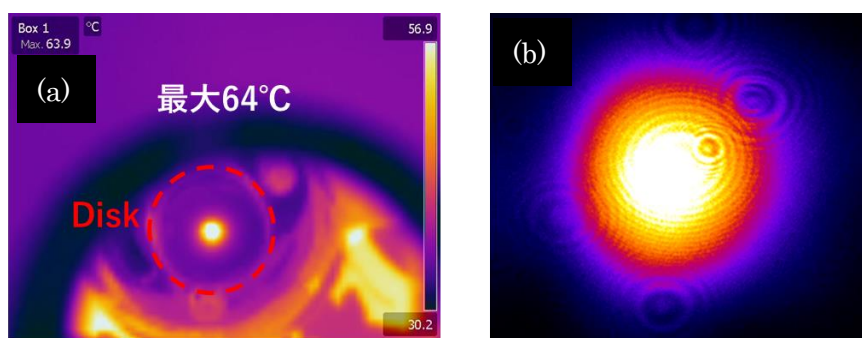


図 8 (a) 温度分布, (b) ビームプロファイル

本研究により極限の低熱抵抗な薄ディスク利得媒質の接合法が確立され、また実際に接合されたレーザー媒質による高出力 CW レーザー発振及び超短パルスレーザー発振が実証された。当初の目的のようなモジュール全体での低熱抵抗化は叶わなかったが、Yb:KLuW のような低熱伝導率かつ熱歪みの生じやすい材料でも本研究の手法を用いることで十分な特性が得られることは証明された。今後は開発した接合法を用いることで、これまで薄ディスクレーザー用利得媒質としては適さないとされてきた、低熱伝導率や、高熱負荷な利得媒質の薄ディスクレーザーとしての評価を展開していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 北島将太郎
2. 発表標題 超短パルスレーザー研究に魅せられて
3. 学会等名 次世代FL研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shotaro Kitajima, Norihiko Nishizawa
2. 発表標題 Investigation on power scalability of Yb:KREW thin-disk lasers by anisotropic thermo-mechanical analysis
3. 学会等名 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR 2022)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北島 将太郎, 西澤 典彦
2. 発表標題 Kerrレンズモード同期Yb:KLuW薄ディスクレーザー
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第44回年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shotaro Kitajima, Norihiko Nishizawa
2. 発表標題 Sub-50 fs Kerr-Lens Mode-Locked Yb:KLuW Thin-Disk Laser
3. 学会等名 ASSL 2024, AM1A.5, Osaka（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shotaro Kitajima, Norihiko Nishizawa
2. 発表標題 Sub-100 fs Kerr-lens mode-locked thin-disk lasers with novel Yb-doped gain media
3. 学会等名 SPIE/COS Photonics Asia 2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------