

「発展的研究計画スタート支援」(2021年度分) 報告書

- 氏名、所属ユニット : 上原日和、可知化センシングユニット
研究テーマ : フェムト秒レーザーを用いた光デバイス開発に基づく萌芽的研究課題の創出

1. 研究の目的・意義

本研究では、再生増幅フェムト秒レーザーやナノ秒 Nd:YAG レーザー、連続波・ナノ秒中赤外レーザーなどの複数の異なるレーザー加工実験系を NIFS 内に整備する。これによって、新規レーザー加工技術の確立、核融合材料の表面改質、新規光デバイスの作製とといった複数の萌芽的な研究を新たに立上げ、世界に先駆けた高インパクトな学術成果を創出することを目的とする。

NIFS におけるレーザー関連研究は、これまで光源開発やプラズマ計測にとどまっていたが、本事業を足掛かりとしてレーザー加工関連の強力な研究拠点を構築し、関連分野における競争力を高める狙いもある。

2. これまでの研究成果および進捗状況、今後の研究の展望

本支援制度により創出された、レーザー加工・プラズマ加工に関する以下の複数テーマを多角的に進めており、それぞれのテーマにおいて原著論文掲載や外部資金獲得などの結果が出ている。

- A) 赤外レーザー加工技術の開発
- B) タングステン材料のレーザー加工に関する研究
- C) 赤外式光ファイバーガスセンサーの開発
- D) プラズマ照射による化合物半導体の表面改質とその光デバイス応用

全てのテーマが軌道に乗りつつあるため、研究を継続して、よりインパクトの高い成果の創出を目指す。さらに、フェムト秒レーザーによる微細加工を駆使した新規研究に取り組む予定である。

3. 支援を受けた金額及び主な用途

総額 6,000 千円

主な用途: レーザー加工システム構築用の光学部品類、ナノメートル精度自動ステージなど

4. 客観的成果

- 4.1 共著を含む投稿論文、著書

(著者名、論文名、出版社、accepted date)

- [1] Weichao Yao, Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara, “Efficient diode-pumped Er:YAP master-oscillator power-amplifier system for laser power improvement at 2920 nm,” *Optics Express* 29(16), 24606–24613 (2021). 加工用赤外レーザーの高出力化
- [2] Kenji Goya, Yuya Koyama, Yoshiaki Nishijima, Shigeki Tokita, Ryo Yasuhara, and Hiyori Uehara, “A fluoride fiber optics in-line sensor for mid-IR spectroscopy based on a side-polished structure,” *Sensors and Actuators: B. Chemical* 351, 130904 (2022). フッ化物赤外光ファイバーセンサーの実証
- [3] Enhao Li, Hiyori Uehara, Weichao Yao, Shigeki Tokita, Fedor Potemkin, and Ryo Yasuhara, “High-efficiency, continuous-wave Fe:ZnSe mid-IR laser end pumped by an Er:YAP laser,” *Optics Express* 29(26), 44118–44128 (2021). 加工用赤外レーザーの開発
- [4] Weichao Yao, Hiyori Uehara, Enhao Li, and Ryo Yasuhara, “Power-scalable two-wavelength pumped Er:YAP laser at 2.9 μm ,” *Optics and Laser Technology* 152, 108073 (2022).
- [5] Enhao Li, Weichao Yao, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara, “Cryogenically cooled 2.8 μm Er:YAP laser with watt-level output power,” *Applied Physics Express* 15, 092003 (2022).
- [6] Enhao Li, Hiyori Uehara, Shigeki Tokita, Weichao Yao, and Ryo Yasuhara, “A hybrid quantum cascade laser/Fe:ZnSe amplifier system for power scaling of CW lasers at 4.0–4.6 μm ,” *Optics and Laser Technology* 157, 108783 (2022).
- [7] Haotian Yang, Ryo Yasuhara, Hiroyuki Noto, Chihiro Suzuki, Reina Miyagawa, and Hiyori Uehara, “Crack-free Nanosecond Laser Processing of Mechanically Enhanced Tungsten-rhenium Alloys,” *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 17(3), 162–167 (2022).
- [8] Quan Shi, Hideki Fujiwara, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Hirohiko Tanaka, Noriyasu Ohno, and Hiyori Uehara, “Structural Correlation of Random Lasing Performance in Plasma-Induced Surface-Modified Gallium Nitride,” *ACS Applied Optical Materials* 1, 412–420 (2023).
- [9] Haotian Yang, Ryo Yasuhara, Hiroyuki Noto, Chihiro Suzuki, Reina Miyagawa, and Hiyori Uehara, “A Study on Laser Processing of Tungsten-Rhenium Alloys for Divertor Development,” *Plasma and Fusion Research: Rapid Communications* 18, 1205017 (2023).

4. 2 国際・国内学会等での発表

(発表者、タイトル、会議名、招待講演・口頭・ポスターの区分)

- [1] 合谷賢治、小山勇也、西島喜明、時田茂樹、安原亮、上原日和、「側面研磨フッ化物ファイバーによる中赤外センサーデバイスの開発」、第 82 回応用物理学会秋季学術講演会
- [2] 合谷賢治、上原日和、西島喜明、時田茂樹、「フッ化物ファイバを導波路とした中赤外光ファイバセンシングシステム」、光ファイバ応用技術研究会 (OFT)
- [3] Enhao Li, Hiyori Uehara, Weichao Yao, and Ryo Yasuhara, “A watt-level mid-IR Fe:ZnSe laser pumped by a 3 μ m Er:YAP laser”、第 6 回フォトニクスワークショップ
- [4] Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara, “A high optical efficiency, CW mid IR Fe:ZnSe laser pumped by an Er:YAP laser”、2021 年度レーザー学会中部支部若手研究発表会
- [5] 上原日和、ヤオ・ウェイチャオ、安原亮、「3 μ m 帯固体レーザーの高出力化のための増幅特性ならびに二波長励起法の検証」、2021 年度レーザー学会中部支部若手研究発表会
- [6] Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara, “Highly-efficient CW 4 μ m Fe:ZnSe laser pumped by an Er:YAP laser”、レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会
- [7] 合谷賢治、西島喜明、時田茂樹、安原亮、上原日和、「フッ化物ファイバーを導波路とした中赤外光ファイバセンシングシステムによる赤外分光計測」、レーザー学会学術講演会第 42 回年次大会
- [8] Quan Shi, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, and Hiyori Uehara, “Surface modification of GaN/GaAs/Si by Ar plasma irradiation with radio frequency biasing for optical applications”、第 69 回応用物理学会春季学術講演会
- [9] Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara, “Study of the CW laser amplification properties of the Fe:ZnSe crystal at mid-IR band”、第 69 回応用物理学会春季学術講演会
- [10] Haotian Yang, Hiyori Uehara, Chihiro Suzuki, and Ryo Yasuhara, “Processing properties of tungsten and tungsten alloys using nanosecond Nd:YAG laser”、第 69 回応用物理学会春季学術講演会
- [11] 上原日和、ヤオ・ウェイチャオ、安原亮、「3 μ m 帯固体レーザーの高出力化のための増幅特性の評価」、第 69 回応用物理学会春季学術講演会
- [12] 上原日和、松尾保孝、合谷賢治、西島喜明、安原亮、村上政直、小西大介、「フッ化物光ファイバーデバイスの需要拡大のための耐候性・親水性ナノ薄膜の形成」、第 69 回応用物理学会春季学術講演会
- [13] 上原日和、「呼気診断や環境モニタリングに応用可能な光ファイバーガスセンサー」、JST 新技術説明会

- [14] Quan Shi, Hideki Fujiwara, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, and Hiyori Uehara, “Surface modification of GaN/GaAs/Si by Ar plasma irradiation with radio frequency biasing for optical applications”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022 年 3 月)、相模原
- [15] Enhao Li, Hiyori Uehara, and Ryo Yasuhara, “Study of the CW laser amplification properties of the Fe:ZnSe crystal at mid-IR band”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022 年 3 月)、相模原
- [16] Haotian Yang, Hiyori Uehara, Chihiro Suzuki, and Ryo Yasuhara, “Processing properties of tungsten and tungsten alloys using nanosecond Nd:YAG laser”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022 年 3 月)、相模原
- [17] 上原日和、ヤオ・ウェイチャオ、安原亮、「3 μm 帯固体レーザーの高出力化のための増幅特性の評価」、第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022 年 3 月)、相模原
- [18] 森朗、杉本尚哉、上原日和、安原亮、西島喜明、時田茂樹、合谷賢治、「赤外フッ化物ファイバセンサにおけるエバネッセント波の染み出し長と研磨深さの最適化」、第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022 年 3 月)、相模原
- [19] 上原日和、松尾保孝、合谷賢治、西島喜明、安原亮、村上政直、小西大介、「フッ化物光ファイバデバイスの需要拡大のための耐候性・親水性ナノ薄膜の形成」、第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (2022 年 3 月)、相模原
- [20] Enhao Li, Hiyori Uehara, Weichao Yao, Bingyu Han, Shigeki Tokita, Fedor Potemkin, and Ryo Yasuhara, “Study of the CW laser properties of Fe:ZnSe single crystals at $\sim 4 \mu\text{m}$,” The 11th Advanced Lasers and Photon Sources 2022 (April 2022), Yokohama, Japan.
- [21] Quan Shi, Hideki Fujiwara, Ryusei Osaka, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, and Hiyori Uehara, “Plasma induced surface nanostructure on compound-semiconductors and its application of random laser,” The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (July 2022), Sapporo, Japan.
- [22] Hiyori Uehara, Akira Mori, Shuya Noda, Yoshiaki Nishijima, Yasutaka Matsuo, Shigeki Tokita, Ryo Yasuhara, Kenji Goya, “Evanescent wave infrared sensing using a fluoride fiber,” The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (July 2022), Sapporo, Japan.
- [23] Enhao Li, Hiyori Uehara, Shigeki Tokita, Fedor Potemkin, and Ryo Yasuhara, “Highly-efficient CW Fe:ZnSe Laser Amplifier at $\sim 4 \mu\text{m}$,” CLEO Pacific Rim 2022 (August 2022), Sapporo, Japan.
- [24] Quan Shi, Hideki Fujiwara, Ryusei Osaka, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Noriyasu Ohno, and Hiyori Uehara, “Plasma Induced Surface Nanostructure on

- Semiconductors for The Application of Random Laser,” CLEO Pacific Rim 2022 (August 2022), Sapporo, Japan.
- [25] Kenji Goya, Yoshiaki Nishijima, Shigeki Tokita, Ryo Yasuhara, and Hiyori Uehara, “Mid-IR Fiber Optic Sensing System Based on Fluoride Fiber Waveguide,” CLEO Pacific Rim 2022 (August 2022), Sapporo, Japan.
- [26] Quan Shi, Hideki Fujiwara, Shin Kajita, Ryo Yasuhara, Hirohiko Tanaka, Noriyasu Ohno, and Hiyori Uehara, “Plasma and impurity induced surface-modified GaN and its random lasing performance”、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (2022 年 9 月)、仙台
- [27] Enhao Li, Hiyori Uehara, Shigeki Tokita, and Ryo Yasuhara, “High-power, single-longitudinal-mode Fe:ZnSe laser amplifier injection-seeded by a DFB-QCL at 4.3 μm ”、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (2022 年 9 月)、仙台
- [28] 上原日和、安原亮、合谷賢治、村上政直、小西大介、大友康平、渡我部ゆき、シーチュエン、石井宏和、堤元佐、根本 知己、「中赤外 Er:YAP レーザーを用いた樹脂フィルムおよび生体試料の切断加工」、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (2022 年 9 月)、仙台
- [29] Haotian Yang, Hiyori Uehara, Hiroyuki Noto, Chihiro Suzuki, and Ryo Yasuhara, “Nanosecond laser processing of tungsten-rhenium alloys without cracking”、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (2022 年 9 月)、仙台
- [30] Haotian Yang, Hiyori Uehara, Hiroyuki Noto, Chihiro Suzuki, and Ryo Yasuhara, “Laser Processing of Advanced Materials for Fusion Science,” The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (November 2022), Online.
- [31] 上原日和、「細胞イメージングの高度化のための赤外レーザー頭蓋骨除去技術の確立」、ExCELLS シンポジウム (2022 年 12 月)、岡崎
- [32] Enhao Li, Hiyori Uehara, Shigeki Tokita, and Ryo Yasuhara, “Power Scaling of Widely Tunable, Narrow-linewidth ($<0.3\text{ nm}$) Mid-infrared Lasers Based on a Hybrid QCL/Fe:ZnSe Amplifier,” Advanced Solid-State Lasers 2023 (December 2022), Barcelona, Spain.
- [33] Haotian Yang, Hiyori Uehara, Hiroyuki Noto, Chihiro Suzuki, and Ryo Yasuhara, “Nanosecond Laser Processing with Tungsten and Tungsten Alloys in Fusion Science Applications,” Laser Applications Conference 2023 (December 2022), Barcelona, Spain.
- [34] 上原日和、安原亮、合谷賢治、大友康平、渡我部ゆき、石井宏和、シーチュエン、堤元佐、根本知己、「中赤外 Er:YAP レーザーの開発とその樹脂・生体加工応用」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会 (2023 年 1 月)、名古屋

- [35] Enhao Li, Weichao Yao, Hiyori Uehara, Ryo Yasuhara, “Cryogenically cooled Er:YAP laser operating at $\sim 3 \mu\text{m}$ ”, レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [36] 上原日和、シーチュエン、藤原英樹、梶田信、安原亮、田中宏彦、大野哲靖、「先進的プラズマ加工技術を利用した大面積ランダムレーザー素子の開発」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [37] 合谷賢治、笹沼裕希、上原日和、時田茂樹、「 $2.8\mu\text{m}$ ファイバーレーザーによるプラスチックファイバーの融着加工」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [38] 野田柊弥、森朗、杉本尚哉、上原日和、安原亮、西島喜明、時田茂樹、合谷賢治、「エバネッセント波を検出原理としたフッ化物ファイバーセンサーの研磨深さ最適化」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [39] 笹沼裕希、合谷賢治、上原日和、時田茂樹、「中赤外レーザーによるプラスチックファイバーの融着とその機械的特性」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [40] 森朗、野田柊弥、杉本尚哉、上原日和、安原亮、西島喜明、時田茂樹、合谷賢治、「エバネッセント波を計測原理とした赤外ファイバーセンサーのための精密研磨技術の開発」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [41] 安原亮、舟場久芳、上原日和、Den Hartog Daniel、「高時間分解プラズマ電子温度・密度計測に向けた 1.6J、20kHz ナノ秒パルスバーストレザーの開発」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [42] 楊浩天、上原日和、能登裕之、鈴木千尋、安原亮、「A study on laser processing of tungsten and tungsten alloys in nuclear fusion science」、レーザー学会学術講演会第 43 回年次大会(2023 年 1 月)、名古屋
- [43] 上原日和、「プラズマ照射による表面ナノ構造体の形成とその光デバイス応用」、川崎市主催・ナノ茶論(2023 年 1 月)、オンライン

4. 3 科研費や他の外部資金への応募・獲得結果(直接経費の配分額) 及び今後の応募予定

(科研費は年度、種目、不採択の場合は評価値)

- [1] 科研費 基盤 C、「半導体レーザー励起ジスプロシウム中赤外レーザーの開発」、代表、令和 2~4 年度、429 万円
- [2] JST A-STEP 産学共同(育成型)、「呼気成分リアルタイムモニタリングのための中赤外プラズモン光ファイバーセンサーの開発」、代表、令和 3 年度、750 万円
- [3] NEDO 官民による若手研究者発掘支援事業(共同研究フェーズ)、「次世代加

- 工レーザーのための異種・異相・異形光学接合体の開発」、代表、令和 4～5 年度、250 万円
- [4] NEDO 官民による若手研究者発掘支援事業(マッチングサポートフェーズ)、「積層樹脂フィルムの高スループットなレーザー切断加工システムの開発」、代表、令和 4～5 年度、2000 万円
 - [5] 池谷科学技術振興財団 研究助成、「原子層堆積法を用いた赤外光ファイバーセンサーへのナノ耐水膜形成」、代表、令和 3 年度、100 万円
 - [6] 光科学技術振興財団 研究助成、「生体計測用・中赤外ランダムレーザーの開発」、代表、令和 3～令和 4 年度、180 万円
 - [7] 田中貴金属財団 研究助成、「金ナノ微粒子とフッ化物光ファイバーを融合した呼吸診断用センサーデバイスの開発」、代表、令和 4 年度、30 万円
 - [8] ガラス研究振興プログラム、「ガラス組成探索の高度化に向けたマイクロガラス溶解システムの開発」、分担、令和 4～6 年度、分担金 90 万円
 - [9] 産学共同研究:A 社、代表、令和 3～4 年度
 - [10] 産学共同研究:B 社、代表、令和 3 年度
 - [11] 産学受託研究:C 社、令和 4～5 年度
 - [12] 産学受託研究:D 社、令和 4 年度
 - [13] 産学受託研究:E 社、令和 4～5 年度
 - [14] プロジェクト型寄附、「「めざせ、地上の太陽」プロジェクト」、代表、クラウドファンディング
 - [15] プロジェクト型寄附、「「国産モバイルレーザーで世界をもっと快適に！プロジェクト」、代表、クラウドファンディング

4.4 特許等

- [1] 合谷賢治、上原日和、「光ファイバーおよびファイバーセンサ」、特願 2021-069885(出願日 2021 年 4 月 16 日)
- [2] 上原日和、安原亮、合谷賢治、松尾保孝、村上政直、小西大介、「光ファイバーおよび光ファイバーの製造方法」、特願 2022-019461(出願日 2022 年 2 月 10 日)
- [3] 合谷賢治、加藤翔、上原日和、「ガス分析装置およびガス分析方法」、特願 2023-055198(出願日 2023 年 3 月 30 日)
- [4] 合谷賢治、笹沼裕希、上原日和、「光ファイバの融着装置および光ファイバの融着方法」、特願 2023-055199(出願日 2023 年 3 月 30 日)

4.5 その他、成果として報告すべきもの(あれば)

- [1] 上原日和、合谷賢治、「環境モニタリングや医療など幅広い応用が期待される赤外光源・ファイバセンサ」、光アライアンス 2021 年 9 月号(2021 年 9 月)

- [2] 上原日和、合谷賢治、「幅広い応用が期待される赤外光ファイバーセンサーを目指して」、月刊オプトロニクス 2022 年 9 月号(2022 年 9 月)
- [3] 合谷賢治、上原日和、「Society5.0 を支える光ファイバー型赤外分光計測システム」、バイオインダストリー2022 年 11 月号(2022 年 11 月)

5. 達成度に対する自己評価及びその理由、研究支援に対する要望等

(自由記述)

多大なるご支援のおかげで、全てのテーマが軌道に乗りつつあるため、研究を継続して、よりインパクトの高い成果の創出を目指す。さらに、フェムト秒レーザーによる微細加工を駆使した新規研究に取り組む予定である。今後、フェムト秒レーザー加工と組み合わせた研究展開を模索する(新任助教の川口さんと協働して、フェムト秒のベクトルビームを使った加工や計測応用の研究を計画中)。

以上。

以上