

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本-ドイツ共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「高輝度 EUV 放射のための中赤外および近赤外レーザーオプティクス」
2. 研究期間：令和 2 年 10 月～令和 6 年 3 月
3. 主な参加研究者名：
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	山内 薫	特任教授	東京大学アト秒レーザー科学研究機構	プロジェクトの統括と中赤外レーザー光源の研究開発
主たる共同研究者	鷲尾 方一	教授	早稲田大学理工学術院先進理工学研究科	中赤外レーザー光源の研究開発
主たる共同研究者	杉浦 宗男	副主幹	東海光学株式会社光機能事業部	光学素子の研究開発
主たる共同研究者	岩崎 純史	教授	東京大学大学院理学系研究科化学専攻	中赤外レーザー光源の研究開発
研究参加者	アマニ レザ	特任准教授	東京大学大学院理学系研究科化学専攻	中赤外レーザー光源の研究開発
研究参加者	田村 耕一	課長	東海光学株式会社光機能事業部	光学素子の研究開発
研究参加者	加藤 祐史	課長	東海光学ホールディングス株式会社	光学素子の研究開発
研究期間中の全参加研究者数			23名	

相手側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	イエンス・リンパート	教授	フリードリッヒシラー大学イエナ、アッペ光科学センター応用物理研究所	プロジェクトの統括と研究開発
主たる共同研究者	ピーター・ルスブエルト	上級研究員	フラウンホーファーILTアーヘン	多重反射セルとポスト光圧縮の研究開発
主たる共同研究者	ヴィンセンツ・ヒルベルト	上級研究員	アクティブファイバーシステムズ	高次高調波発生の研究開発
研究参加者	トビアス・ホイエルマン	研究員	フラウンホーファーIOF イエナ	ツリウムレーザーの研究開発
研究参加者	ルーカス・アイゼンバッハ	研究員	フラウンホーファーILT アーヘン	多重反射セルとポスト光圧縮の研究開発
研究参加者	フィリップ・ギエルシケ	研究員	フラウンホーファーIOF イエナ	高次高調波発生の研究開発
研究期間中の全参加研究者数			16名	

4. 国際共同研究の概要

日本側の3つチームとドイツ側の3つのチームが連携し、「中赤外波長領域の超短パルスレーザー光源」の開発とともに、その開発の基盤となる「中赤外領域の光学素子」の開発に取り組んだ。プロジェクト期間中に国際合同ミーティングを13回開催し、相互訪問(2回)、対面でのセミナー(1回)、ハイブリッド型シンポジウム(1回)を実現させ、緊密な連携体制を構築した。相互交流にともなう情報交換によって、日本側東京大学、早稲田大学において、Yb、Er、Tm ドープファイバーレーザーの発振器および増幅技術の開発が着実に前進した。ドイツ側では、高輝度フェムト秒 Tm(ツリウム)ファイバーチャープパルス増幅(CPA)システムの出力を、多重反射セル(MPC)を使って圧縮し、パルス幅 20 fs、繰り返し周波数 100 kHz、出力 144 W を達成した。この「Tm ファイバーレーザーCPA-MPC 圧縮システム」には、日本側の東海光学が設計・製作した中赤外領域の多層膜ミラーが組み込まれ、本国際共同研究の成果として高輝度超短パルス中赤外域ファイバーレーザーが実現した。さらに、高輝度高調波発生装置を製作し、軟 X 線領域の高次高調波を高輝度で発生が可能であることを示した。本国際共同研究によって開発された高繰り返し高出力超短パルス中赤外域レーザーは、その高次高調波が軟 X 線領域のアト秒パルスとなることから、アト秒科学分野の研究のために必要となる光源開発への指針を与えるものとなった。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

日本側の3つチームとドイツ側の3つのチームが連携し、「中赤外波長領域の超短パルスレーザー光源」の開発とともに、その開発の基盤となる「中赤外領域の光学素子」の開発に取り組んだ。高輝度フェムト秒 Tm ファイバーチャープパルス増幅システムの出力を、多重反射セルを使って圧縮し、パルス幅 20 fs、繰り返し周波数 100 kHz、出力 144 W を達成し、その成果を、*Journal of Physics: Photonics* 誌に報告した。さらに、軟 X 線領域の高輝度高調波発生装置を製作し、軟 X 線領域の高輝度高次高調波を発生することが可能であることを示した。

5-2 国際共同研究による相乗効果

プロジェクト期間中に国際合同ミーティングを13回開催し、相互訪問(2回)、対面でのセミナー(1回)、ハイブリッド型シンポジウム(1回)を実現させ、緊密な連携体制を構築した。相互交流にともなう情報交換によって、日本側の東京大学、早稲田大学において、Yb、Er、Tm ドープファイバーレーザーの発振器および増幅技術の開発が着実に進んだ。ドイツ側の「Tm ファイバーレーザーCPA-MPC 圧縮システム」には、日本側の東海光学が設計・製作した中赤外領域の多層膜ミラーが組み込まれ本国際共同研究の成果として高出力超短パルス中赤外域ファイバーレーザーが実現した。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本国際共同研究によって開発された高繰り返し高出力超短パルス中赤外域レーザーは、その高次高調波が軟 X 線領域のアト秒パルスとなることから、アト秒科学分野の研究に必須となる光源開発への指針を与えるものである。今後は、その高次高調波は、時間領域における計測だけでなく、サブミクロンサイズのレーザー微細加工のための光源としても活用されるものと予想される。また、本国際共同研究は国際的な環境の下での若手研究者の育成に資するものとなった。

SICORP-MIRROR で構築された協力関係を基に、次の段階へと国際共同研究を発展させていくことを日独双方において合意した。すでに、ILT と東海光学の間では具体的な研究プロジェクトの議論が進められている。また、日本側では、ドイツ側 IOF、ILT、AFS との研究交流を継続し、Q-Leap ATTO 部門およびアト秒レーザー科学研究施設(ALFA)におけるアト秒レーザー光源開発との連携を検討する。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
 Japan – Germany Joint Research Program
 Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Mid-IR and near-IR laser source and optics for high-brightness EUV radiation」
2. Research period : October 2020 – March 2024
3. Main participants :
 Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Kaoru Yamanouchi	Project Professor	Institute for Attosecond Facility, The University of Tokyo	Project management and R&D of Mid-IR lasers
Co-PI	Masakazu Washio	Professor	Faculty of Science and Engineering, Waseda University	R&D of Mid-IR lasers
Co-PI	Muneo Sugiura	Vice-Executive Engineer	Optical Products Division, TOKAI OPTICAL CO., LTD.	R&D of optics
Co-PI	Atsushi Iwasaki	Professor	School of Science, The University of Tokyo	R&D of Mid-IR lasers
Collaborator	Reza Amani	Project Associate Professor	School of Science, The University of Tokyo	R&D of Mid-IR lasers
Collaborator	Koichi Tamura	Manager	Optical Products Division, TOKAI OPTICAL CO., LTD.	R&D of optics
Collaborator	Yuji Kato	Manager	R&D Department, TOKAI OPTICAL HOLDINGS CO., LTD.	R&D of optics
Total number of participants throughout the research period:				23

Partner-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Jens Limpert	Project Professor	Fraunhofer IOF Jena	Project management and R&D
Co-PI	Peter Russbueldt	Senior Scientist	Fraunhofer ILT Aachen	R&D Multipass Cell and Post Compression
Co-PI	Vinzenz Hilbert	Senior Scientist	Active Fiber Systems	R&D High Harmonic Generation
Collaborator	Tobias Heuermann	Scientist	Fraunhofer IOF Jena	R&D of Tm-Lasers
Collaborator	Lucas Eisenbach	Scientist	Fraunhofer ILT Aachen	R&D Multipass Cell and Post Compression
Collaborator	Philipp Gierschke	Scientist	Fraunhofer IOF Jena	R&D High Harmonic Generation
Total number of participants throughout the research period:				16

4. Summary of the international joint research

The three teams in Japan and the three teams in Germany worked together to develop "ultrashort pulse laser sources in the mid-infrared wavelength region" as well as "mid-infrared optical elements." During the project period, we held 13 international joint meetings and realized mutual visits twice, a joint seminar in person, and a hybrid-type symposium, establishing scientific cooperation between the Japanese and German teams. Through information exchanges and scientific discussions, Yb-, Er-, and Tm-doped fiber laser systems were developed at the University of Tokyo and Waseda University. On the German side, the output of a high-power femtosecond Tm (thulium) fiber chirped-pulse amplification (CPA) system was compressed using a multi-pass cell (MPC), achieving a pulse width of 20 fs, a repetition rate of 100 kHz, and an output of 144 W. This Tm fiber-laser based CPA system with the MPC compression incorporates mid-infrared multilayer mirrors designed and manufactured by TOKAI OPTICAL of Japan. Thanks to the international collaborative research, a high-power ultrashort-pulsed mid-infrared fiber laser was realized. In addition, high-order harmonics in the soft X-ray region was generated using an apparatus developed in the present project. The high-repetition-rate, high-power ultrashort-pulse mid-infrared laser systems developed through this international collaborative research project provided a guideline for the development of light sources necessary in the field of attosecond science.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

The three teams in Japan and the three teams in Germany worked together to develop "ultrashort pulse laser sources in the mid-infrared wavelength region" as well as "mid-infrared optical elements." The output of a high-brightness femtosecond Tm-doped fiber chirped-pulse-amplification system was compressed using a multi-pass cell, achieving a pulse width of 20 fs, a repetition rate of 100 kHz, and an output of 144 W. The results were reported in *Journal of Physics: Photonics*. In addition, high-order harmonics in the soft X-ray region was generated using an apparatus developed in the present project, demonstrating the possibility of generating high-order harmonics in the soft X-ray region at high brightness.

5-2 Synergistic effects of the joint research

During the project period, 13 international joint meetings were held, with two mutual visits, one face-to-face seminar, and one hybrid symposium, establishing close scientific cooperation. Through information exchanges and scientific discussions, Yb-, Er-, and Tm-doped fiber laser systems were developed at the University of Tokyo and Waseda University. The Tm fiber-laser based CPA system with the MPC compression developed by the German teams incorporates a mid-infrared multilayer mirror designed and manufactured by TOKAI OPTICAL, showing that a high-power ultrashort-pulse mid-infrared fiber laser source was realized thanks to this international collaborative research.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

The high-repetition-rate, high-power, ultrashort-pulse laser in the mid-infrared region developed through this international joint research project provides a guide to the development of light sources essential for research in the field of attosecond science. In the future, it is expected that the high-order harmonics will be used not only for measurements in the time domain, but also as a light source for submicron-sized laser microfabrication. This international research project also contributed to fostering young researchers under an international research environment.

Based on the cooperative framework established by the SICORP-MIRROR project, both Japan and Germany sides have agreed to develop the international joint research project to the next stage. Discussions on specific research projects are already underway between ILT and TOKAI OPTICAL. In addition, the Japanese side will continue research exchanges with IOF, ILT, and AFS, and will consider collaboration with the attosecond laser light source developments in the Q-Leap ATTO division and the Attosecond Laser Facility (ALFA).

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

*原著論文 (相手側研究チームとの共著論文) 発表件数: 計 1 件

・査読有り: 発表件数: 計 1 件

1. Lucas Eisenbach, Ziyao Wang, Jan Schulte, Tobias Heuermann, Peter Russbüldt, Rudolf Meyer, Philipp Gierschke, Mathias Lenski, Muneo Sugiura, Koichi Tamura, Jens Limpert, Constantin Häfner, "Highly efficient nonlinear compression of mJ pulses at 2 μm wavelength to 20 fs in a gas-filled multi-pass cell," *Journal of Physics: Photonics*, in press.

・査読無し: 発表件数: 計 0 件

*原著論文 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文): 発表件数: 計 0 件

・査読有り: 発表件数: 計 0 件

・査読無し: 発表件数: 計 0 件

*その他の著作物 (相手側研究チームとの共著総説、書籍など): 発表件数: 計 0 件

*その他の著作物 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など):
発表件数: 計 0 件

2. 学会発表

*口頭発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数: 計 1 件 (うち招待講演: 0 件)

1. Lucas Eisenbach, Tobias Heuermann, Ziyao Wang, Jan Schulte, Rudolf Meyer, Mathias Lenski, Philipp Gierschke, Muneo Sugiura, Koichi Tamura, Peter Rußbüldt, Jens Limpert, and Constantin Häfner, "High average power nonlinear post-compression at 1.9 μm wavelength employing a gas-filled multi-pass cell," *CLEO/Europe-EQEC 2023*, Munich, June 29 (2023).

*口頭発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数: 計 5 件 (うち招待講演: 4 件)

1. 安岡篤史, 「ツリウム添加ファイバーを用いたモード同期レーザーの開発」、ビーム物理研究会・若手の会、Web、December 3 (2021).

2. A. A. Eilanlou, Y. Yoshino, A. Iwasaki, K. Yamanouchi [Invited], "Development of a bidirectional Yb:KGW ring laser oscillator for application in dual-frequency-comb spectroscopy," *International Symposium on Atomic, Molecular, and Optical Science 2022*, Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, March 28 (2022).

3. A. Iwasaki [Invited], "Development of lasers for the next 5 years," *International Symposium on Atomic, Molecular, and Optical Science 2022*, Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan, March 28 (2022).

4. A. Amani Eilanlou, G. Ren, Q. Zheng, Y. Ito, N. Sugita, and A. Iwasaki [Invited], "Development of a high-average-power Erbium-Ytterbium-doped fiber laser system," *International Symposium on Quantum Frontiers*, Tokyo, Japan, April (2023).

5. 岩崎純史, 「アト秒時間分解能での時間分解計測法」(招待講演)、第 38 回放射線検出器とその応用研究会、2024 年 1 月 22 日(月)、23 日(火) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 研究本館 小林ホール、オンライン、January 22, 23 (2024).

*ポスター発表 (相手側研究チームとの連名発表)

発表件数 : 計 0 件

*ポスター発表 (相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表)

発表件数 : 計 2 件

1. 金子悠隆, 「Tm ファイバーを用いた 2 μ m 帯モードロックレーザーシステムの開発」、2022 年度第 29 回レーザー夏の学校、ポスター発表、2022/10/2
2. A. Amani Eilanlou, Y. Mizutani, A. Iwasaki, M. Washio, and K. Yamanouchi, "Development of a combiner-free high-average-power erbium-ytterbium-doped fiber laser for pumping Mid-IR lasers," Asia-Pacific Laser Symposium, Hakodate Japan, September 2023 (Poster).

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

1. SICORP-MIRROR Symposium, "Mid-IR and near-IR laser sources and optics for high brightness EUV radiation," Kaoru Yamanouchi (Project Professor, Institute for Attosecond Laser Science, The University of Tokyo) and Jens Limpert (Professor, Institute of Applied Physics, Friedrich Schiller University Jena), 5th Floor Auditorium, Chemistry Main Building, Hongo Campus, The University of Tokyo (Tokyo, Japan), March 19 (2024) [about 15 attendees].
2. The 1926th Zasshikai Seminar (Department Seminar of Department of Chemistry, School of Science, The University of Tokyo), "High performance coherently combined ultrafast fiber laser systems" by Jens Limpert (Professor, Institute of Applied Physics, Friedrich Schiller University Jena), organized by Kaoru Yamanouchi (Project Professor, Institute for Attosecond Laser Science, The University of Tokyo), 5th Floor Auditorium, Chemistry Main Building, Hongo Campus, The University of Tokyo (Tokyo, Japan), March 19 (2024) [about 30 attendees].

4. 研究交流の実績 (主要な実績)

【合同ミーティング】 コロナウイルスの感染の拡大のため、第 13 回を除きオンラインにて実施した。日本側とドイツ側の参加研究者が出席し、相互のプロジェクトの進捗を確認するとともに、学術交流を推進した。開催日は以下の通り。

- 第 1 回 2020 年 11 月 6 日 (キックオフミーティング)
- 第 2 回 2021 年 2 月 12 日
- 第 3 回 2021 年 4 月 23 日
- 第 4 回 2021 年 6 月 25 日
- 第 5 回 2021 年 9 月 2 日
- 第 6 回 2021 年 11 月 5 日
- 第 7 回 2022 年 3 月 4 日
- 第 8 回 2022 年 5 月 13 日
- 第 9 回 2022 年 8 月 12 日
- 第 10 回 2023 年 1 月 13 日
- 第 11 回 2023 年 9 月 1 日
- 第 12 回 2023 年 11 月 24 日
- 第 13 回 2024 年 3 月 19 日 (SICORP-MIRROR Symposium)

【研究参加者の相互訪問】プロジェクト実施期間の大半がコロナウイルス感染の拡大時期と重なってしまったため、当初予定していた研究者および学生の相互交流を進めることができなかったが、以下の2件の相互訪問を実現することができた。

1. 東海光学の田村 耕一氏、杉浦宗男氏が2023年7月3日に、ドイツ側の Fraunhofer IOF を訪問し、Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller-University Jena にて、ドイツ側の Prof. Jens Limpert, Mr. Tobias Heuermann, Ms. Ziyao Wang, Mr. Maximilian Karst と中赤外域のミラーの開発に関する打ち合わせを行った。
2. ドイツ側の研究代表者である Prof. Jens Limpert が、2024年3月19日に東京大学本郷キャンパスを訪問し、東京大学理学部化学教室において雑誌会セミナーにて講演を行うとともに、SICORP-MIRROR シンポジウムに参加し、日本側メンバーと研究交流を行った。

5. 特許出願

研究期間累積出願件数：0 件

6. 受賞・新聞報道等

該当なし

7. その他

該当なし