

## SICORP 日本-ドイツ

### 「オプティクス・フォトンクス」領域 第2期 事後評価報告書

#### 1 共同研究課題名

「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 日本ー相手国研究代表者名（研究機関名・職名は研究期間終了時点）：

日本側研究代表者

山内 薫(東京大学 アト秒レーザー科学研究機構・特任教授)

ドイツ側研究代表者

ハンス リンパート(フラウンホーファー研究機構応用光学・精密機械工学研究所・教授)

#### 3 研究概要及び達成目標

本研究は、極端紫外領域波(13-2 nm)の高次高調波を高輝度で発生するために必要となる中赤外および近赤外波長領域の光学素子の開発、中赤外レーザー発振・増幅・波長変換などの技術開発、そして、高次高調波発生装置の開発を目的とした。

日本側では、Yb (イッテルビウム)、Er (エルビウム)、Tm (ツリウム) 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、高出力フェムト秒 Tm ファイバーチャープパルス増幅(CPA)システムの出力を、日本側が設計・製作した中赤外領域の多層膜ミラーが組み込まれた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 線領域の高次高調波を高輝度で発生させることが可能であることを示した。

#### 4 事後評価結果

##### 4.1 研究成果の評価について

##### 4.1.1 研究成果と達成状況

アト秒科学分野で重要な役割を示すと期待されている軟 X 線領域のアト秒パルスの発生に必須の中赤外波長領域の超短パルスレーザー光源の開発と、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。

具体的には、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を進め、高出力フェムト秒 Tm 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、本プロジェクトで開発した中赤外領域の多層膜ミラーが組み込まれ、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。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 線領域の高次高調波を高輝度で発生させることが可能であることを示した。

波長 13 nm および水の窓領域の高次高調波を高い輝度で発生するために必要な、中赤外波長領域の光学素子、中赤外レーザー発振・増幅、波長変換、高次高調波発生についての技術を開発することによって、高輝度高次高調波パルス、およびアト秒パルスを発生させるための要素技術を開発する必要がある。日本側チームは主として波長 1.6  $\mu\text{m}$  帯、2.4  $\mu\text{m}$  帯の中赤外領域で直接フェムト秒発振・増幅、もしくは波長変換によって近赤外パルスの中赤外パルスに波長変換する技術、および、これらの波長帯における様々な光学素子の開発を行った。ドイツ側チームは、主として高次高調波発生用ガスセルとファイバーレーザーによるフェムト秒レーザーパルス発生技術について開発を行った。そして、高輝度高調波発生のための発生装置を製作し、高輝度高次高調波を用いた光計測とセンシング、光による加工・造形への応用と、独自技術を用いた光学部品とそのシステム化の実現を図った。

以上のことから、当初目的とした、高エネルギーアト秒パルス発生のための長波長ファイバーレーザーおよびその要素技術であるミラー開発に成功したといえる。レーザー技術全般から見て、目的とした装置を完成させ、その周辺技術にも大きな進展が得られたことから、高い水準の研究であったといえる。

#### 4.1.2 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むこととなった。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。

国際共同研究の相乗効果としては、中赤外域のファイバーレーザー光源開発、および、中赤外域の光学素子開発に顕著な形で現れた。ドイツ側ではファイバーレーザー開発に以前より実績があり、相互交流にともなう情報交換によって、日本側の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むこととなった。特に、ドイツ側が開発を進めた Tm ファイバーレーザー-CPA-MPC 圧縮システムは完成度が高く、日本側のレーザー光源開発において良い参考となった。

また、ドイツ側の Tm ファイバーレーザー-CPA-MPC 圧縮システムの構築に当たっては、日本側の東海光学の持つ多層膜生成技術が大きく貢献した。ドイツ側の光源システムに必要な中赤外領域における正分散、負分散、高反射ミラーの性能を踏まえ、東海光学が独自の技術で多層膜ミラーを設計・製作し、それが Tm ファイバーレーザー-CPA-MPC 圧縮システムに組み込まれることとなった。この共同研究によって、日本側の中赤外域の高性能ミラーの設計・製作におい

て高い技術力を持つことが国内外に示されることとなった。

このように、技術開発の分担、および、日本開発のミラーの提供など、役割分担は明確に計画されたプロジェクトであった。特に、日本側が開発した誘電体多層膜ミラーが、日独のレーザーシステムで使われたこと、そして、レーザー装置関連技術で進歩している欧州との国際共同により、我が国の当該分野は活性化したことは特筆に値する。

#### **4.1.3 研究成果が与える社会へのインパクト、我が国の科学技術協力強化への貢献**

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。

アト秒サイエンスは各国が支援すべき重要な課題である。その中核となる組織づくりに貢献した。アト秒サイエンスは、多くの科学分野の基礎的な技術として極めて重要である。また、生命科学、医療などは貢献も期待される。超微細加工にも重要な技術であり、電子産業へのインパクトも大きい。

このように、本研究は、アト秒サイエンスの着実な進展に貢献し、我が国の科学技術にも大いなるインパクトを与えた。

#### **4.2 相手国研究機関との協力状況について**

リモートによる 13 回の国際合同ミーティング、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、コロナ下でも緊密な連携体制を構築した。相互の役割分担が明確であったこともあり、中赤外領域の多層膜ミラーの開発をはじめとして、光源開発、パルス圧縮技術開発に多くの進展が得られた。

#### **4.3 その他**

我が国のレーザー技術開発力と人材不足が危惧されているが、本プロジェクトでは、新技術開発をベースに装置を完成形まで導きその過程で若手の実力を付けているという良い成果を上げている。