

審査の結果の要旨

論文題目： 回転楕円ミラーによる軟 X 線レーザー集光システムの開発

氏名 本山央人

本論文は、回転楕円ミラーによる軟 X 線レーザーの集光に関連して行った一連の研究をまとめたものである。

第 1 章では、軟 X 線領域における集光の重要性の観点からの本研究の背景と軟 X 線集光素子としての回転楕円ミラーの位置づけを述べ、研究目標を設定している。近年、軟 X 線光源の性能が飛躍的に進歩しており、光源性能を活用できるナノ集光、ハイスループット、波長依存なしの集光素子が求められてきた。こうした背景の下、高次高調波、自由電子レーザーの両軟 X 線レーザー光源の性能と近年開発された回転楕円ミラーの作製精度を鑑み、回転楕円ミラーによる軟 X 線レーザー集光システムの実現を研究目標としている。

第 2 章では、フレネルキルヒホッフ回折積分に基づく波動光学シミュレータを開発し、回転楕円ミラーの形状誤差とアライメント誤差が集光性能に与える影響を調査している。波長 10nm の軟 X 線を長さ 40mm の回転楕円ミラーにより回折限界集光を実現するためには、ミラー形状の許容寸法誤差は $1 \mu\text{m}$ 、楕円プロファイルからの許容編差量は PV (Peak-to-Valley) 20 nm 程度であることを明らかにした。また、ミラーのアライメントには全面照明条件で $0.5 \mu\text{rad}$ 、部分照明条件で $10 \mu\text{rad}$ レベルの角度制御が必要であることを明らかにした。解析結果と現状の回転楕円ミラーの精度を鑑み、部分照明条件であれば回転楕円ミラーにより波動光学的に理想的な回折限界集光が可能であると結論づけている。

第 3 章では、回転楕円ミラーの集光性能評価を目的として、高次高調波発生を利用した軟 X 線レーザービームラインを構築している。フェムト秒レーザーをヘリウム媒質中に集光することで、波長 10 nm までの高次高調波を発生可能とした。また、温度環境と振動環境の安定化を行ない、軟 X 線レーザーのナノ集光実験が可能で高次高調波発生システムを完成させた。次に、第 2 章での解析結果に基づき高精度アライメント機構を有する集光装置を開発し、軟 X 線レーザー集光システムを構築した。軟 X 線集光実験を行った結果、波長 10 ~ 20 nm のブロードバンド軟 X 線ビームを $420 \times 400 \text{ nm}^2$ の領域に集光することに成功している。

第 4 章では、日本の X 線自由電子レーザー施設である SACLA において、回転楕円ミラーによる軟 X 線集光システムを開発している。長焦点 KB ミラーと

回転楕円ミラーを組み合わせることで、コンパクトかつ高スループットの光学系を設計した。本施設においても、回転楕円ミラーを高精度にアライメント可能な集光装置を設計、開発した。集光実験を実施し、光子エネルギー100 eVの軟 X 線を $500 \times 540 \text{ nm}^2$ の領域に集光可能であることを確認した。さらに、形成した集光ビームを利用し、Si の軟 X 線可飽和吸収を観測することに成功した。これらの結果から、軟 X 線の集光ビームにおいて、従来報告されていない 10^{16} W/cm^2 以上の集光強度密度の達成を確認している。

第 5 章では、回転体ミラーの全面を照明することで、軟 X 線の波長レベル集光が可能な極限軟 X 線集光システムを提案、設計している。準回転楕円ミラーとリング集光ミラーの 2 枚のミラーで構成されるコンセプトを示し、それぞれのミラーの設計手法を示した。また、SACLA のビームラインを想定した光学設計例を示し、波動光学、光線追跡シミュレーションにより、集光サイズ 20 nm、集光強度密度 10^{20} W/cm^2 を理論的に達成可能であることを示している。

第 6 章では、第 2 章で示した回転楕円ミラー全面を利用するために必要な形状精度 PV 20 nm をクリアするために、イオンビームスパッタ成膜をベースとした形状修正法を開発している。基礎実験装置により、成膜にピンホールを用いることで高分解能、高精度な形状修正が可能であることを確認した。その結果に基づき、回転楕円ミラーの内面の形状を修正可能な装置を開発した。ミラー内側に挿入したロッド状金属ターゲットをイオンビームでスパッタすることで、ミラー内面の局所領域にのみ選択的な成膜を可能にした。φ5mm~10mm の円錐形状のミラー内面の円周方向において形状修正を行った結果、形状誤差を PV 160 nm から PV 80 nm まで低減することに成功している。

以上のように、本研究では、理論的な集光性能が優れた軟 X 線集光素子である回転楕円ミラーに関して、形状精度とアライメント精度に関する解析に基づき、高次高調波軟 X 線と軟 X 線自由電子レーザー施設において、集光システムを構築した。さらに、回転楕円ミラーを用いた新規光学系の提案とミラー内面の直接的な形状修正法の開発を行い、軟 X 線集光における回転楕円ミラーの新たな可能性を見出した。

これらの一連の成果は、今後、X 線光学分野の発展に大きく貢献するものである。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。