



Title	精密X線波面制御に基づくX線自由電子レーザー集光光学系の開発
Author(s)	井上, 陽登
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/88081
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (井 上 陽 登)

論文題名

精密X線波面制御に基づくX線自由電子レーザー集光光学系の開発

論文内容の要旨

X線自由電子レーザー (XFEL: X-ray free-electron laser) は、従来X線光源よりピーク輝度が10億倍高く、空間的にほぼコヒーレントなフェムト秒パルスレーザーである。極短パルスX線であることから、試料が放射線損傷を受ける前に分析を完了する“Diffraction before destruction”戦略に基づく実験が広く行われ、蛋白質分子の真の構造が明らかになりつつある。また超高ピーク強度を利用することで、X線非線形光学分野の開拓が進みつつある。これらの実現のためにはXFELを小さく、高密度に集光する光学素子の作製が必要不可欠である。これまでに、独自の精密加工・計測法を開発することで超精密X線ミラーの作製に成功し、サイズ50 nm集光を回折限界条件のもとに達成した。これによりX線領域における内殻準位レーザーなどの非線形光学現象の観察に世界に先駆けて成功している。

本論文は更なる高密度X線場を形成することを目的として、XFELをスポットサイズ10 nm以下に集光するX線ミラー光学系を構築するにあたり開発した、X線波面制御技術などの研究成果についてまとめたものである。

第2章では、X線ミラーを用いたXFEL用sub-10 nm集光光学系を紹介した。まずX線ミラーの基礎概念について述べた。次に、開発を進めるXFELsub-10nm集光光学系の構成と各種パラメータを詳述し、理想的な集光に必要な形状、アライメント精度について検討した。そして、sub-10nm集光を実現するための戦略を導入した。

第3章では、ミラー形状の評価を目的として導入した波面計測手法について述べた。まずX線グレーチング干渉計の原理、解析手順、及び実験セットアップを述べ、測定精度、及びシステムエラーを検証した。そして、システムエラー除去手順を提案し、計算機シミュレーション及びXFELにおける実証実験を元に有用性を検討した。

第4章では、ミラーの形状修正手法として導入する差分成膜法と、多層膜成膜について述べた。まず、これらの成膜過程で用いる装置を紹介した後に形状修正を行う手順を述べ、その精度を検証した。次に、多層膜成膜手順と成膜精度についてまとめた。そして、形状修正したミラーを用いて再びXFELにて波面計測を行った結果を詳述した。

第5章では、XFELのシングルショットでナノビームの診断を完了するスペックル干渉計を開発した。まず、光のコヒーレント散乱により生じるスペックルを用いた本手法の原理を述べた。次に、ビーム形状とスペックル形状の関係を、計算機シミュレーション結果を元に検討した。また、実験を行うにあたり重要である、装置構成、データ補正方法、及び試料準備について検証した。そして、計算機シミュレーション結果を元に、XFELにてミラーアライメントの実証実験を行い、ベストアライメント時のスペックルにおいて達成されたビームサイズを評価した。

第6章では、Advanced KBミラーに基づく新規sub-10 nm集光光学系を開発した。まず、X線ミラー光学系において広い視野を実現した、Wolterミラー、及びAdvanced KBミラーについて述べた。次に新たに設計された新規sub-10 nm集光光学系の各種パラメータを詳述し、計算機シミュレーションにより光学系の特性を評価した。そして、X線を用いた実証実験において、計測された波面収差を2次元多項式フィットすることで、各軸アライメント調整を試みた。最後に形状修正を行い、XFELにて計測された波面収差、及び光学系の特性評価結果についてまとめた。

第7章では、形状可変ミラーを用いたsub-5 nm集光光学系を開発した。まず、新しくミラー形状修正機構として導入する、圧電素子駆動型形状可変ミラーについて述べた。次に、新たに設計したsub-5 nm集光光学系の各種パラメータを詳述し、光学特性や形状修正性能を、計算機シミュレーション、及びX線を用いた実証実験に基づき検討した。そして、多層膜周期長の物性限界による集光サイズの制限を打破するため、多層膜の高次光反射を利用したX線ミラーを開発し、実験室、及びX線を用いて初期検討した結果についてまとめた。

第8章では、ハイブリッド型形状可変ミラーを用いたアダプティブ集光光学系について述べた。まず、形状可変ミラーの長尺化のメリット・デメリットを紹介し、機械曲げ機構の必要性を詳述した。次に、計算機シミュレーションに基づき、目標変形状形に対して各曲げ機構が担うべき最適変形量を考察した。そしてX線を用いた実証実験結果をまとめた。第9章では本論文を総括した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (井 上 陽 登)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	山内 和人
	副 査	教授	桑原 裕司
	副 査	准教授	佐野 泰久
	副 査	准教授	松山 智至 (名古屋大学工学研究科)
	副 査	教授	山村 和也
	副 査	教授	荻 博次
	副 査	教授	森川 良忠
	副 査	教授	渡部 平司
	副 査	教授	遠藤 勝義

論文審査の結果の要旨

本論文は高密度 X 線場を形成することを目的として、X 線自由電子レーザー (XFEL : X-ray free-electron laser) をサイズ 10 nm 以下に集光する X 線ミラー光学系を構築することを目的に開発した、X 線波面制御の研究成果についてまとめたものである。主な成果を要約すると以下の通りである。

1. XFEL をサイズ 10 nm 以下に集光するためには、急峻な曲面を有する X 線ミラーを 1 nm PV の精度で作製しなければならず、既存の形状計測技術では評価をすることが不可能である。この問題を解決するために、その場波長である X 線の集光波面を直接計測することで、ミラーの形状誤差を必要精度で決定する提案を行い、X 線領域のグレーチング干渉計を開発している。高い絶対計測精度を得るために、当該干渉計のシステムエラーの徹底的な除去に取り組み、波長の 1/10 を上回る絶対精度を確立している。そして、本手法で計測された波面を元に形状修正を行うことによって、所期の回折限界条件を満たす X 線ミラーを実現している。
2. X 線を 10 nm 以下に集光するためには、集光ビームの形状を診断し、ミラー姿勢を精密に調整することが必要である。この課題に対し、XFEL の高い空間コヒーレンスを利用したスペックル干渉法を提案し、これを実現している。集光点内に置いたナノ粒子によって、ファーフィールドに生じるスペックルは、その形がミラーの姿勢誤差の原因に応じて特徴的に変化することをシミュレーションによって確認し、これを適用することによって、ミラー姿勢の最適化方法を確率し、XFEL のサイズ 10 nm 集光を実現している。
3. 集光サイズの更なる微小化を目指す、ミラーにはより高い形状精度が求められる。特に集光サイズ 5 nm 以下の場合、必要精度は 0.5 nm PV 以下と計算され、上記の形状修正法であってもその適用は難しい。この問題に対して、X 線集光の際にミラー形状をその場補正する補償光学の導入を提案し、圧電素子駆動によってミラーの形状をサブ nm レベルで調整可能な形状可変ミラーを開発している。有限要素法に基づく計算機シミュレーションによって、形状調整の際の最適化手法を確立し、開発したグレーチング干渉計を組み込んだ補償光学システムを完成させ、回折限界条件において sub-5 nm 集光を達成している。

以上のように、本論文では X 線波面の精密計測法と誤差の補正法を確立し、X 線ナノビーム形成のための補償光学システムを実現したものであり、X 線顕微鏡科学を大きく発展させ、放射光科学の発展に広く貢献するものである。以上の成果は、学術面と産業面の双方の視点から、精密工学への貢献度が極めて大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。