



Title	多層膜集光ミラーによる硬X線sub-10nmビーム形成に関する研究
Author(s)	半田, 宗一郎
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/57559">https://hdl.handle.net/11094/57559</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

氏 名	半 田 宗一郎
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学 位 記 番 号	第 23788 号
学 位 授 与 年 月 日	平成22年3月23日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当 工学研究科精密科学・応用物理学専攻
学 位 論 文 名	多層膜集光ミラーによる硬X線sub-10nmビーム形成に関する研究
論 文 審 査 委 員	(主査) 教授 山内 和人 (副査) 教授 安武 潔 教授 森田 瑞穂 教授 桑原 裕司 教授 森川 良忠 教授 遠藤 勝義

### 論文内容の要旨

本研究ではミラーによる硬X線sub-10 nmビームの実現を目的として、Pt/C多層膜集光ミラーの作製技術、集光ビームの波面収差やミラー上の微小な形状誤差の計測・修正技術、集光ビームプロファイルの高精度計測技術等の開発を行った。本論文はこれらの技術開発の詳細と、作製した多層膜集光ミラーによるsub-10 nm集光実験の結果についてまとめたものである。以下に各章の内容についてまとめる。

第1章では、X線ナノ集光光学素子開発の現状と、関連するいくつかの理論的な背景についてまとめた。また、有望な集光素子形態である多層膜集光ミラーの原理と、これを用いたsub-10 nm集光実験のための計画の概要について述べた。

第2章では、sub-10 nm集光ミラーのための反射多層膜に用いられる膜材料及び成膜法について述べた。また、集光ミラーに求められるグレーデッド多層膜形成のためのスパッタリング成膜装置を開発し、膜材料として選択したPt及びCに関する基本的な成膜特性の確認を行った結果について述べた。

第3章では、開発した成膜装置により作製した多層膜試料に関する各種分析・評価結果について述べた。様々なPt/C多層膜試料を作製し、AFM (atomic force microscopy) 及びX線反射率法等により評価・比較した結果について述べた。本研究で集光ミラー基板として用いているガラス系材料のEEM (elastic emission machining) 加工表面を基板として用いた多層膜試料は良好な特性を有していることが確認された。さらに、実用的なX線反射率の得られる多層膜周期長の下限が約2.0 nmであることなどが明らかとなった。

第4章では、ミラー作製過程で基板上に残存する形状誤差等により発生する波面収差をコヒーレントX線により精密に計測し、さらに、ミラー面形状誤差をsub-1 nm精度で修正することによりビーム特性の改善を試みた結果について述べた。実験の成功により、集光強度プロファイルからの位相回復による波面収差特定の正確さが実証された。

第5章では、ナイフエッジを用いたビームプロファイル計測に内在する問題点をシミュレーションにより明らかにした。また本計測法の重要な特徴として、集光プロファイルにおけるメインピーク半値幅の計測の影響による変化は通常数%程度と比較的小さいこと、取得された強度分布からの直接的な位相回復による波面収差の特定が実質的に可能であることなどを示した。さらに、取得された強度分布を元に現実の波動場を復元するための数値的手法についても述べた。

第6章では、sub-10 nm集光のために設計した多層膜ミラーを作製し、ビームラインにおいて集光実験を行った

結果について述べた。将来的にKB光学系により2次元集光が可能な設計の2枚のミラーを作製し、集光実験を行った。集光実験の結果、単独のミラーによる集光ピーク半幅8 nmの1次元sub-10 nm集光を達成した。また、形状可変ミラーを用いた1次元sub-10 nmビームの波面補正実験にも成功した。

### 論文審査の結果の要旨

SPring-8に代表される第3世代放射光源が实用に供されて以来、X線を利用した各種分析技術は飛躍的な進歩を遂げており、今日では材料科学や生命科学をはじめ広範な研究領域において欠くことのできない存在となっている。特に近年、X線による試料のナノスケール分析を可能とするX線ナノ集光プローブの開発が世界的に活発に進められている。本論文は、高精度ミラー型光学素子による硬X線sub-10 nmプローブの実現を目指した各種の研究成果についてまとめたものである。

全反射型の集光ミラーをはじめ従来の多くのX線集光光学素子に存在する原理的な集光サイズの限界を突破し、10 nm未満の集光スポットサイズを実現するため、本研究では高精度なグレーデッド多層膜型の集光ミラーの開発を行っている。高精度グレーデッド多層膜形成のためのスパッタ成膜装置を開発し、硬X線反射多層膜として良好な特性を有するPt/C多層膜を作製することに成功している。また、ミラーの作製精度の向上努力だけでは除去しきれないミラー基板形状及び多層膜厚分布の誤差、あるいはミラーアライメントの誤差に起因する集光X線ビーム波面収差のその場補正のため、位相回復法に基づく波面収差のその場計測法と、形状可変ミラーによるその場波面補正法を提案している。集光ビーム強度プロファイルの精密計測結果を利用して位相回復法による波面収差計測を実験により実証し、その高い計測精度を証明している。さらに、ナイフエッジからの散乱X線測定を利用したsub-10 nmビームのビームプロファイル計測についてシミュレーションにより詳細な検討を行い、本計測法により集光スポットサイズの評価が可能であること、得られた強度分布を元に波面収差の算出が可能であること、また、原理的に不完全なものとなる取得強度分布を基に、波動光学に基づいた数値計算により正しい波動場を再構築することが可能であることなどを示すことに成功している。最後に、KB(Kirkpatrick-Baez)光学系としての使用を想定した2枚の楕円形Pt/C多層膜ミラー作製し、集光実験を行っている。高精度加工法であるEEM(elastic emission machining)による基板加工、及びナノ集光ミラーの形状計測に特化した干渉計システムである顕微干涉計型RADSI(relative angle determinable stitching interferometry)による高精度基板形状計測を用いることで形状誤差PV(peak to valley)2 nm程度の超高精度楕円形ミラー基板を作製し、さらに、開発したスパッタ成膜装置によるPt/Cグレーデッド多層膜の成膜を行うことで、極めて高精度な多層膜集光ミラーを作製している。SPring-8における単独のミラーを用いた集光実験の結果、ナイフエッジを用いた精密ビームプロファイル計測により、ピーク半幅8 nmの集光強度プロファイルを得ることに成功している。さらに、形状可変ミラーを用いたsub-10 nmビームの波面補正実験を行い、ビーム特性の改善を実証することにも成功している。

以上のように、本論文はミラーによる硬X線sub-10 nm集光の実現を目指として行われた各種要素技術開発、集光ミラーの作製、及び集光実験の結果についてまとめている。高精度なミラー基板作製技術とグレーデッド多層膜形成技術からなる極めて高水準の多層膜集光ミラー作製技術を確立し、世界初の硬X線sub-10 nmビーム形成に成功している。また、X線集光技術のさらなる進展にとって重要なことが予想される波面収差計測・補正技術、高精度ビームプロファイル計測法といった革新的な関連技術の開発にも成功している。これらの成果はX線による様々な試料のナノ分解能分析の実現へと展開し、幅広い科学技術分野の発展に貢献するものと期待できる。よって、本論文は博士論文として価値あるものと認める。