



| | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Title | Nanofocusing of X-ray Free-Electron Lasers Using Multilayer Kirkpatrick-Baez Mirrors |
| Author(s) | 金, 章雨 |
| Citation | 大阪大学, 2016, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/55976 |
| 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 (Jangwoo Kim (金 章雨)) | |
| 論文題名 | Nanofocusing of X-ray Free-Electron Lasers Using Multilayer Kirkpatrick-Baez Mirrors (多層膜Kirkpatrick-Baezミラーを用いたX線自由電子レーザーのナノ集光) |
| 論文内容の要旨 | |
| <p>The principle aim of this study is to generate an extremely intense X-ray field for exploring nonlinear phenomena in the hard X-ray regime. To meet this requirement, the usage of an X-ray free-electron laser (XFEL) and its focusing are critically important. To achieve power densities of around 10^{22} W/cm^2, sub-10-nm XFEL focusing has been developed using a two-stage reflective focusing optical system. This has required investigations of the fabrication and measurement of mirror substrates with steeply curved surfaces, deposition of multilayers with high reflectivity and sufficient X-ray irradiation tolerance, and technique for single-shot measurement of the focused wavefront.</p> | |
| <p>In Chapter 1, the research background and the purpose of this study are introduced.</p> <p>In Chapter 2, fundamentals for reflective X-ray focusing optics are described. Achievable focal spot sizes by reflective optics, the limitations of total reflection, and the need for multilayer films to overcome their limitations are described. Then, the existing reflective XFEL focusing optics at SPring-8 Angstrom Compact free-electron LASer is introduced.</p> <p>In Chapter 3, in order to fabricate the sub-10-nm focusing mirrors needed for this study, fabrication and measurement methods of mirror substrates are described. The XFEL sub-10-nm focusing mirrors had steeply curved surfaces that were difficult to measure using conventional shape-testing methods. The minimum radius of curvature was a few meters, and the slope range was several dozen milliradians. Furthermore, the required accuracy, or Rayleigh criterion, of the mirror surface was 1 nm peak-to-valley. A laser autofocus microscope system was developed to carry out measurements at this level of accuracy, featuring a position correction mechanism utilizing three heterodyne interferometers. This apparatus successfully measured the surface shape of sub-10-nm focusing mirrors satisfying the Rayleigh criterion.</p> <p>In Chapter 4, the developed thin film deposition system to fabricate a Pt/C multilayer and its tolerance to XFEL irradiation are described. In the XFEL sub-10-nm focusing optical design, the utilization of multilayer mirrors was considered since the grazing incidence angle was much greater than the critical angle of total reflection. However, one of the critical requirements of optical elements for XFELs was sufficient tolerance to intense X-ray irradiation. In order to investigate the feasibility of the Pt/C multilayers, a focused XFEL was used to provide a sufficiently high intensity. The breakdown threshold value of the Pt/C multilayer was confirmed to be $0.051 \mu \text{J}/\mu \text{m}^2$, which is sufficiently higher than that under practical conditions.</p> <p>In Chapter 5, various approaches to the improvement of reflectivity of Pt/C multilayers are described. Thinning and C-doping of the Pt layer were tested and confirmed to increase the X-ray reflectivity of the Pt/C multilayer by approximately 10%.</p> <p>In Chapter 6, XFEL sub-10-nm focusing optics and focusing strategies are described. To diagnose the focused state of the XFEL nanobeam, a wavefront measurement method was developed. Using this method, it was confirmed that phase errors of several radians were caused by the shape error of the multilayer mirror, and the focused beam size was approximately 10 nm, which is the smallest reported beam size to date in XFEL focusing.</p> <p>In Chapter 7, the conclusions of this study are summarized.</p> | |

論文審査の結果の要旨及び担当者

| 氏 名 (Jangwoo Kim (金 章雨)) | |
|------------------------------|--------------|
| | (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 教授 安武 潔 |
| | 副査 教授 森田 瑞穂 |
| | 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

X線自由電子レーザー (XFEL) は高いピーク輝度, 完全な空間コヒーレンス, 超短パルス等の特徴を有する光源であり, 材料科学に於ける時間分解計測や極限的強光子場下での X 線物理学が展開されるものと期待されている. 本論文は, 未踏領域である硬 X 線非線形光学の開拓を目的に, 多層膜 Kirkpatrick-Baez ミラーを用いた XFEL の sub-10nm 集光の実現を目指したものであり, 光学系設計と光学素子開発に関する一連の研究成果をまとめたものである.

ミラー光学素子はフレネルゾーンプレートやレンズと比べ, 大開口, 高集光効率, 長焦点距離等の特徴を有し, XFEL のナノ集光に利用可能な唯一の光学素子と言える. しかし, ミラー光学素子においては, 原子的に平滑かつ急峻な非球面を PV 1 nm を上回る形状精度で作製する必要がある. 必要な精度を実現可能な加工法はすでに確立しているが, 求められる急峻形状に対応可能な形状測定法は確立されていない. このため, 曲面測定に強いレーザー顕微鏡をメインプローブに採用し, そのプローブの姿勢をヘテロダイイン干渉計によってサブナノメートル精度でモニターできる形状計測システムを構築し, ミラー基板のオフラインでの形状評価を可能にしている. そして, この計測結果をもとに, 所定精度の基板をディタミニステックに加工することを可能にしている.

本ミラー光学素子では, 素子への X 線の斜入射角度が全反射の臨界条件を越えており, このような条件で十分な反射率を得るためにには, ミラー基板に多層膜コーティングを施す必要がある. しかし, SPring-8 等の従来光源よりピーク強度が 10 億倍以上も高い XFEL を扱う場合, その放射線損傷耐性が明らかにされていない. そこで, 硬 X 線領域で実績のある白金/カーボン (Pt/C) 多層膜に注目し, その XFEL 損傷耐性を詳細に評価している. 反射率の劣化曲線や断面 TEM を用いた損傷形態を詳細に評価し, 目的の集光において利用可能な条件が存在することを明らかにしている. さらに, 集光効率に直接影響する反射率の劣化が, 成膜時の Pt 層の結晶化によって起こることを見出し, その解決法として Pt 層に C を添加することを提案し, 光学系全体のスループットを約 10% 向上することに成功している.

集光ビームの最終的な波面精度は, XFEL ビームラインにミラー光学素子をセットした状態で at-wavelength 評価する必要があるが, ここでは Talbot 効果を用いたシングルグレーティング X 線干渉計を構築し, この計測に成功している. そして, 開発した at-wavelength 計測法によって, ミラー基板上で sub-nm の形状誤差に対応する波面誤差の評価を可能にし, 同時にミラー光学素子の姿勢調整にも適用することによって, 世界で初めて約 10 nm に XFEL を集光することに成功している.

以上のように, 本論文は XFEL のナノ集光光学系の設計と必要なミラー光学素子の開発を行い, 約 10 nm の集光径を実現すると共に, ミラー光学素子に必要となる要素技術の確立を行ったものである. ここで構築した XFEL ナノ集光光学系は, XFEL を用いた未踏の X 線物理学の探索に大いに貢献するものと期待されており, 本論文は精密科学への発展に寄与するところが大きい. よって本論文は博士論文として価値あるものと認める.