

研究種目：特別推進研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18002009

研究課題名（和文） 硬 X 線 Sub-10nm ビーム形成と顕微鏡システムの構築

研究課題名（英文） Sub-10nm hard X-ray focusing and application to nanoscopy/spectroscopy

研究代表者

山内 和人 (YAMAUCHI KAZUTO)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10174575

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：超精密加工, X 線光学, 波面光学, ナノ集光

1. 研究計画の概要

SPRING-8 に代表される第 3 世代放射光 X 線源が実用に供され、高輝度 X 線光源を利用したナノスケール分析への期待が急速に高まっている。波長 1 nm 以下の硬 X 線のナノビームが形成できれば、分子サイズの分解能での物質機能のイメージングや単一分子回折による構造解析などが可能となり、また、更なる高輝度化と単パルス化が実現できれば、化学反応の実時間計測や生きたままの細胞の観察も可能とされている。

本研究では、Sub-10nm サイズの硬 X 線ナノ集光をめざし、これに求められる波面精度を実現する集光光学系を開発する。このために、ビームウエスト近傍の X 線干渉縞の強度情報をもとに、位相回復によって X 線の波面を評価する「At-wavelength 干渉計測」、その計測結果に基づく「波面補正」等、従来にない概念の導入によって、ミラー集光光学系の高機能化を達成する。これによって、電子顕微鏡に迫る分解能を有する「Sub-10nm 分解能硬 X 線顕微鏡システム」を実現する。

2. 研究の進捗状況

基盤的技術の開発においては、極めて急峻な非球面曲面である大開口数ミラーの基板形状計測システム（精度 2nm(PV)/100mm）、開口数の増大によって必要となるグレーデッド多層膜の精密形成システム等の開発を成功裏に終えた。ミラーの高精度形状創成に用いる精密加工技術では、当該研究グループが有する触媒基準エッチングや Elastic Emission Machining の高度化によって、本研究の目標を満たし得る性能を

持ったデタミニスティック加工システムを完成させた。

本研究の最大の特徴は、ビームウエストでの X 線干渉縞構造の高精度計測とその位相情報の回復である。すなわち、多層膜の設計波長に応じた At-wavelength 波面計測法の確立であり、このためには、集光ビームウエストの高精度強度分布計測法の開発、強度情報からの位相回復アルゴリズムの開発、回復した波面の精度検証等が必要である。これらに対し、集光ビームの強度プロファイルを、メインピークに加え、5 次のサブピークまで高精度に計測可能な新たなナイフエッジスキャン法を開発し、その位相回復によって、 $1/10$ に迫る精度の波面評価が可能であることを確認した。また、評価された波面誤差の補正では、集光デバイス上流に、nm 精度でアダプティブに変形可能な位相補正平面ミラーを置く、オンサイト波面補正システムを構築した。全てが世界初の試みであったが、これらの達成により、2009 年度末に、目標とした 10nm を超える 8nm のライン集光に成功した。その際の波面補正前後の集光プロファイルでは高い補正効果が確認され、8nm ライン集光の実現と同時に、一連のシステムが目標とする性能を有していることが示された。

3. 現在までの達成度

：[おおむね順調に進展している]

世界最小の極めて高い数値目標である硬 X 線 Sub-10nm 集光を掲げ、研究を開始したが、当初の目標どおり進捗し、すでに 8nm ライン集光に成功するなど、当初に示した研究目標を達成できる状態に達したため。

4. 今後の研究の推進方策

平成 20 年度末の時点において、研究の推進に大きな問題は発生していない。

すでに構築した 1 次元オンサイト波面補正光学系をベースに、最大の目標である Sub-10nm サイズの硬 X 線 2 次元集光システムの構築に向け、そのために必要な 2 次元入射波面補正システムと集光点近傍での波動場強度の 2 次元分布計測システムを完成させる。また、光学系開発と並行して、顕微鏡システムの形体検討と実証実験によって、2 次元ナノ集光システムの完成と同時期での顕微鏡システムの構築を目指す。

5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計 12 件)

S. Matsuyama, M. Shimura, H. Mimura, M. Fujii, H. Yumoto, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa and K. Yamauchi, Trace element mapping of a single cell using a hard x-ray nanobeam focused by a Kirkpatrick-Baez mirror system, X-ray Spectrometry 38, 89-94, (2009).

H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, S. Handa, T. Kimura, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, K. Yamauchi, Direct Determination of the Wave Field of an X-ray Nanobeam, Physical Review A, 77(1), 015812-1~4 (2008).

S. Handa, H. Mimura, H. Yumoto, T. Kimura, S. Matsuyama, Y. Sano and K. Yamauchi, Highly accurate differential deposition for X-ray reflective optics, Surface and Interface Analysis 40, 1019-1022 (2008).

H. Yumoto, H. Mimura, S. Matsuyama, S. Handa, Y. Sano, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, Åt-wavelength figure metrology of hard x-ray focusing mirrors, Review of Scientific Instruments, 77, 063712-1~6 (2006). 査読有

〔学会発表〕

(国際会議 計 30 件, 国内学会 計 34 件)

(招待講演: 国際会議 10 件, 国内学会等 7 件)

K. Yamauchi, Synchrotron-radiation-based hard-X-ray nanoprobe, JST Symposium on "Micro and Trace X-ray Analysis, (February 12-14, 2009 Osaka City Univ. Media Center, Osaka, Japan).

H. Mimura, Fabrication of 400mm long X-ray mirror by Electrolytic In-process Dressing Grinding and Elastic Emission Machining, The 6th CHINA-JAPAN, International Conference on Ultraprecision Machining, Extended Abstract 22-26 (Nov. 24-25, 2008, Hunan Univ., Changsha, China)

K. Yamauchi, X-ray focusing with Kirkpatrick-Baez optics, SPIE Optics + Photonics 2008 (Aug. 11-14, 2008, San, Diego, California, USA)

K. Yamauchi, Wavefront control for hard X-ray nanofocusing, ACTOP2008 (Oct. 11-14, 2008, Trieste, Italy).

K. Yamauchi, Hard X-ray nanobeam for X-ray nanoscopy/spectroscopy, European

Conference on X-ray Spectrometry, June 2008, Cavtat, Dubrovnik, CROATIA)

K. Yamauchi, Recent achievements and next strategies in hard-X-ray nano-focusing, ALS user meeting (USA, Lawrence Berkeley National Lab, Oct. 5, 2007).

K. Yamauchi, Elastic Emission Machining for the Fabrication of X-ray and EUV Mirrors, OSA Optical Fabrication and Testing Topical Meeting, (October 9-11, 2006, Rochester USA).

〔産業財産権〕

出願状況 (計 6 件)

(国内 3 件, 国外 3 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>