

科学研究費補助金（特別推進研究）公表用資料 〔研究進捗評価用〕

平成18年度採択分

平成21年 4月27日現在

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

YAMAUCHI KAZUTO
氏名 山内 和人

所属研究機関・部局・職 大阪大学・工学研究科・教授



研究の概要：

Sub-10nm サイズの硬 X 線ナノ集光技術を確認し、物質内部の分析や、大気圧下での観察が可能等の特徴を有する X 線顕微鏡において、電子顕微鏡に迫る分解能を有する「ナノ分光イメージングシステム」を世界に先駆けて構築する。

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. 研究開始当初の背景

2000 年以降, SPring-8 に代表される第 3 世代放射光が実用に供され, X 線自由電子レーザーの実現が視野に入るなど, 高輝度 X 線によるナノスケール分析への期待が急速に高まり, 当該グループを筆頭に, ナノ集光ビーム形成のための研究が, 世界レベルで急速に活発化した。

2. 研究の目的

Sub-10nm サイズの硬 X 線ナノ集光を目指し, これに求められる波面精度を有する集光光学系を開発する。このために, 集光点近傍の X 線干渉縞をもとに, 位相回復によって波面位相の分布を評価する「At-wavelength 干渉計測」, その計測結果に基づく「波面補正」等を世界に先駆けて提案しており, これらを実現することによって, ミラー素子光学系の高機能化を達成し, 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。

3. 研究の方法

本研究は, 以下の項目, ①集光プロファイルからの位相回復に基づいた波面誤差計測法の確立, ②アダプティブミラーによる波面誤差補償法の確立, ③ミラー表面の精密創成プロセスの確立, ④Sub-10nm 集光ミラーの作製と評価, ⑤Sub-10nm 集光システムの構築, ⑥顕微鏡システムの構築および性能評価, を実施する。特に, ①②が本研究の特徴である At-wavelength 計測の開発に対応し(図 1), 集光プロファイルの精密計測法, および, 位相回復法等を確立する。

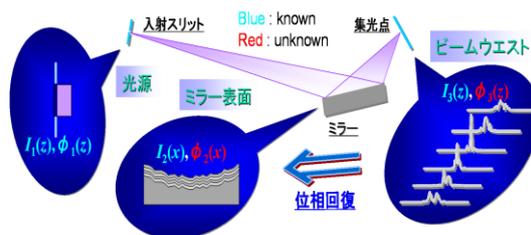


図 1 At-wavelength 波面計測と位相回復による X 線集光のための極限精度の波面誤差評価法の概念

4. これまでの成果

基盤技術の構築や高度化では, 大きな開口数を有するミラーの急峻な非球面曲面に対応した基板形状計測システム(精度 2nm (P-V) / 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行った。また, 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法や Elastic Emission Machining 法等の高度化によって, 研究の目標を満たし得る性能をもったデータミニステ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, ①集光ビームウエストの高精度強度分布計測法の開発, ②強度情報からの位相回復アルゴリズムの開発, ③回復した波面の精度検証等が必要である。これに対し, 強度分布

計測において、メインピーク以外に5次のサブピークまでを極めて高精度に評価可能な新たなナイフエッジスキャン法を開発し、位相回復アルゴリズムを含め、 $\lambda/10$ に迫る精度の波面評価法であることを確認した(図2)。

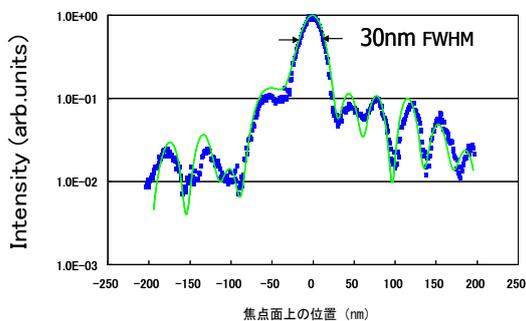


図2 At-wavelength 波面計測法の確立に向けて実施したビームプロファイルの精密計測結果と位相回復精度の裏付けとなる最適フィッティング曲線の比較. 2つの曲線の極めて高い一致度を確認。(使用したミラーの理論集光径:30nm)

また、計測された波面誤差の補正のために、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光学系を構築した。これらの世界初の試みによって 2009 年度末に、目標に設定した 10nm を超える 8nm ライン集光に成功した。その際に計測した波面補正前後の集光プロファイルを示したものが図3(緑:補正前、紫:補正後)である。高い補正効果が確認され、8nm ライン集光の達成と同時に、一連のシステムが所定の性能を有することが実証された。

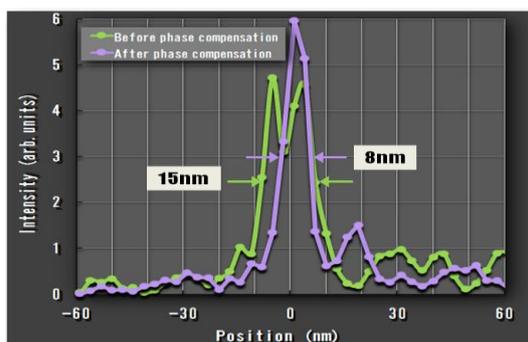


図3 位相回復に基づくAt-wavelength 計測によって波面誤差を評価し、波面補正光学系によってその場修正した前後の集光プロファイル。世界最小の8nm 集光を達成。

5. 今後の計画

(1) 構築した 1 次元でのオンサイト波面補正法をベースに、2 次元での入射波面補正システムを構築する。また、集光点近傍での波動場強度分布の 2 次元計測法を確立し、硬 X 線領域における Sub-10nm サイズの 2 次元集光システムを完成する。

(2) X 線ナノ分光イメージングの様々な形体を検討し、集光システムの完成に合わせて、顕微鏡システムを実現する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)
(研究代表者は太字, 研究分担者は二重下線, 連携研究者は一重下線)

1. **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).
2. 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).
3. H. Mimura, S. Morita, T. Kimura, D. Yamakawa, W. Lin, Y. Uehara, S. Matsuyama, H. Yumoto, H. Ohashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, T. Ishikawa, H. Ohmori, and **K. Yamauchi**, Focusing mirror for x-ray free-electron lasers, Rev. Sci. Instrum. 79, 083104-1-4 (2008).
4. 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, 1019-22 (2008).
5. H. Yumoto, H. Mimura, T. Kimura, S. Handa, S. Matsuyama, Y. Sano, **K. Yamauchi**, Stitching interferometric metrology for steeply curved x-ray mirrors, Surface and Interface Analysis, 40, 1023-7 (2008).
6. H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, **K. Yamauchi**, Efficient focusing of hard x rays to 25 nm by a total reflection mirror, Applied Physics Letters 90, 051903-1-3 (2007).

など,

論文12編, 国際会議招待講演10件, 国内会議招待講演7件, 国際会議発表30件, 国内学会発表34件, 特許出願, 国内3件, 海外3件
受賞: 三村秀和

第22回日本放射光学会奨励賞,
その他, 博士学生等の学生奨励賞等 3件

研究室ホームページ

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