

1. 研究課題名：硬X線Sub-10nmビーム形成と顕微鏡システムの構築

2. 研究期間：平成18年度～平成22年度

3. 研究代表者：山内 和人（大阪大学・大学院工学研究科・教授）

4. 研究代表者からの報告

(1) 研究課題の目的及び意義

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、X線自由電子レーザーの実現が視野に入った今日、高輝度X線光源を利用したナノスケールX線分析への期待が急速に高まっている。硬X線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の機能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る。X線領域のナノビームを形成するためには、様々なX線光学系の中でも、大開口、高集光効率、長焦点距離（長ワーキングディスタンス）が実現可能な、2枚の全反射ミラーを用いたKirkpatrick-Baez (KB) 光学系が最も有効である。当該グループは、任意形状の表面に対して原子レベルの平滑性を得る表面ナノプロセスを考案し、領域100mmに亘って形状精度0.1nm (RMS) を有する硬X線集光ミラーを試作して、世界最小のSub-50nm、Sub-30nm集光を実現した実績がある。

本研究では、これまでの研究成果をベースに、可能な限り高い精度のミラーを作製するとともに、集光ビームプロファイルから位相回復法によりミラー上での波面誤差を知る「At-wavelength 波面計測」と、これに基づく「ミラー上流での波面補正」など、従来にない概念を提案しており、これらを確立することによって、「世界最小のSub-10nm硬X線ナノビーム」を波動光学的な回折限界において達成する。そして、電子顕微鏡やイオン顕微鏡などと同等の分解能で、生体組織を含め、様々な物質を分子スケールで分析可能な「Sub-10nm分解能硬X線顕微鏡」を実現する。

(2) 研究の進展状況及び成果の概要

順調に進捗している。At-wavelength 波面計測のためのビーム強度プロファイル計測では、空間分解能1nmと強度分布計測におけるダイナミックレンジ60dBを得ることに成功し、Sub-10nmビーム評価へのブレイクスルー技術を確立した。位相回復アルゴリズムの開発においても、計測誤差への許容度の高いアルゴリズム開発に成功した。波面補正法の構築では、ミラー上への追加成膜による位相補正法の理論面からの検証を終え、プログラマブル多層膜形成システムの完成と同時に実証フェーズに移れる状況にある。さらに、オフラインでの作業が必要な追加成膜による位相補正法に比べ、より高機能なインラインでの波面補正法として、1nmレベルで形状調整が可能なアクティブ平面ミラーを用いる光路長変調法を考案し、そのシステムの設計と製作を開始した（年度内確立の予定）。プログラマブル多層膜形成システムの開発では、装置の設計製作を終え、所定の基本性能を得た。具体的には、膜厚分布の制御性ならびに成膜された多層膜の硬X線（20keV）反射率において、所期の性能を満足した。顕微鏡システム完成後の応用展開の準備についても、基盤研究(S)で構築した加工プロセスを活用して、ズーミング機能を有する空間分解能30nmの走査型蛍光X線顕微鏡システムを構築し、収束イオンビームにより加工したナノテストパターンの観察を通して、顕微鏡システムとしての基本性能の確認するとともに、細胞周期に関連させながら細胞内小器官の高分解能元素マッピング等を実施した。

5. 審査部会における所見

A（現行のまま推進すればよい）

本研究の目的達成には集光ビームプロファイル計測手法の確立が鍵を握ることになるが、本研究グループはSi結晶をFIB加工したものにPtを蒸着したナイフエッジをピエゾ駆動する手法を開発し、空間分解能1nmの強度分布計測法を確立しつつある。また、位相誤差補償法については、アルゴリズムを開発し、位相誤差情報をフィードバックする段階に来ている。補正法として、追加製膜による手法と並行してアクティブ平面ミラーを用いたインライン波面補正法にも着手しており、研究は順調に進展している。このような研究は、基盤となる精密加工技術およびそれを可能にする設備インフラがなければ到底なしえないものであるが、本研究グループはこれまでの成果をベースに整備されている大規模クリーンルームおよび各種装置を活用することにより、極めて効率良く研究を進めている。研究代表者のリーダーシップのもとに、若手研究者・大学院生が積極的に活動している。これまでの研究は予定通りないしは予定以上の進展を見せており、今後の成果に大いに期待が持てる。さらに、実際の応用を見据えて生物系の研究者との共同研究も既に進められている。