博士論文審査報告書

論文題目：全反射および回折を利用した硬Ｘ線集光素子に関する研究

申 請 者：辻　卓 也

１．論文内容の要旨

近年の半導体デバイスの微細化・多層構造化に代表されるように、幅広い分野においてナノメートルレベルの空間分解能を有する非破壊分析技術への要求は極めて強い。硬Ｘ線顕微鏡はこのような要求に応え得る潜在能力を有しているため、その実用化を目指して世界各国で開発が進められており、現在 50 nm を超える空間分解能が得られている。硬Ｘ線用光学素子として、フレネルゾーンプレート（FZP）とキルクパトリック・バエズ型反射鏡（KB ミラー）が代表的である。FZP では輪帯幅が狭くなるとＸ線が伝播しなくなり、KB ミラーでは全反射臨界角によって開口数が制限され、いずれにおいても 10 nm 以下の空間分解能を得ることは困難である。これらの問題を解決するために、多層膜ラウエレンズや多層膜ミラーが開発され、10 nm 前後の集光サイズが実現されている。これらの素子を用いれば原理的に数ナノメートルの集光が可能であるが、極めて高度な作製技術を必要とするため、簡便な製作法と高性能を両立する新しいＸ線集光素子の開発が望まれている。

本論文では、（１）硬Ｘ線領域において空間コヒーレンスを測定する方法として、全反射ダブルスリットによるヤングの干渉計を考案・製作し、SPring-8 の兵庫県ビームライン（BL24XU）における空間コヒーレンスを実験的に評価した。第三世代放射光源の特長として高い空間コヒーレンスがあるが、ビームラインには分光器などの光学機器が存在するため光源本来のコヒーレンスが保たれて伝播している保証は無い。従って、コヒーレンスを利用するＸ線光学研究を行う場合、実際に入射するＸ線ビームのコヒーレンスを測定することが重要である。本研究では、斜入射光学系による見かけの線幅の縮小効果を利用して通常の透過配置では困難な微小スリット幅を可能とすることにより、新しい空間コヒーレンスの測定法を提案した。実際にBL24XUに適用し、その有効性を実証した。（２）全反射ダブルスリットのアイディアを発展させた全反射ゾーンプレートを考案・設計・製作し、その性能評価を行い回折限界の集光サイズを実現した。全反射を利用しているため透過型のFZPのような輪帯幅の制限がない、集光作用がFZPの原理に基づくため開口数は最小輪帯幅で決まる、斜入射光学系による見かけの線幅の縮小効果を利用しているため狭い線幅が得易いなどの特徴を有することから、新しいタイプのＸ線集光素子と位置づけられる。また、パターンの描画には透過型FZPのような高い精度を要しない、平面基板なので曲面加工が不要であるなど、作製が比較的容易な点も大きな特徴である。本研究では、斜入射配置における光路差を考慮したゾーンパラメータを設計し、入射Ｘ線のエネルギーは 10 keV、斜入射角は 6 mrad、焦点距離は 4.16 mm、回折限界集光サイズは 14.7 nmとした。基板にはシリコン基板、ゾーンパターンには白金を用いた。集光ビームプロファイルを測定した結果、14.4 nmのビームサイズが得られ、回折限界と同等の集光サイズを達成した。また、集光効率は 7 %であり、理想的な値とほぼ一致した。一方、集光ビームプロファイルにおいて不

要なサイドピークが存在することもわかった。光軸方向の焦点距離近傍におけるビームプロファイルの変化の様子を、基板の形状誤差を考慮した回折積分による計算結果と実験による測定結果との比較から詳細に検討し、サイドピークが主に基板の反りに起因することを明らかにした。

２．論文審査結果

本論文は、ナノメートルレベルの硬Ｘ線集光ビームの生成を目的として、全反射型のゾーンプレートを考案・設計・製作し、回折限界に達する 14.4 nmという集光ビームサイズを実現したものである。現在までに開発されているＸ線集光素子の限界を超える可能性を有する新しいタイプの硬Ｘ線光学素子を提案し、その有効性を実証した点が高く評価できる。基板の形状誤差を考慮した回折積分を実行することにより、集光ビームプロファイルにおけるサイドピークが主に基板の反りに起因することを示した。この結果は、今後ナノメートルレベルの集光を目指して高度化を進める上で重要な指針を与えるものである。また、第三世代放射光源やＸ線自由電子レーザーの利用研究においてはコヒーレンス度の測定が不可欠となるが、その測定法の１つを提示したことも評価に値する。本研究で開発した全反射ゾーンプレートは、微細化・複雑化が進む半導体材料や機能性材料等の非破壊内部微細構造観察への応用が期待できる有意義な研究成果といえる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成 22 年 1 月 28 日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査：篭 島　　靖　　印

副査：高 木 芳 弘　　印

：小 林 寿 夫　　印

：松 井 真 二　　印

：鈴 木 芳 生　　印

（財団法人高輝度光科学研究センター、

副主席研究員）

：津 坂 佳 幸　　印