

令和 5 年 10 月 23 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12630

研究課題名(和文) 回折限界を超える逆位相コンポジットゾーンプレートの実用設計

研究課題名(英文) Practical design of the Inverse-Phase Composite Zone Plate for achieving better performance than diffraction limit

研究代表者

籠島 靖 (Kagoshima, Yasushi)

兵庫県立大学・理学研究科・教授

研究者番号：10224370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：微細実材料のオペランド非破壊観察には、X線顕微鏡コンピュータトモグラフィ(CT)による3次元構造の可視化が必須である。顕微鏡CTでは試料の大きさをレンズの焦点深度内に収める必要があるため深い焦点深度のX線光学素子は重要な開発要素である。研究代表者は空間分解能の劣化を抑えつつ焦点深度を拡張可能な新規のX線レンズを提案し、逆位相コンポジットゾーンプレートと名付けた。本研究ではその実用的な設計値を探索するための集光特性計算プログラムを開発・改良し、性能をシミュレーションした。8～12 keVのX線で空間分解能の劣化を7%増に抑えつつ焦点深度を約2倍にできる設計値を見つけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高輝度放射光が広く利用されるようになり、ゾーンプレートや全反射ミラーなどのX線光学素子の進歩も相俟って、100 nm以下の空間分解能が比較的容易に得られるようになり、実材料の顕微構造分析へのニーズが高まってきた。物理学の基本原則として、より小さい空間分解能を得ようとするほど焦点深度はより浅くなる。空間分解能を損なわずに焦点深度を大きくできないことは、厚い試料を高い空間分解能で観察することが原理的に困難であることを意味しており、試料の厚さを制限することになるため実材料分析への適用を妨げてしまう。本研究は特にX線顕微トモグラフィによる非破壊3次元構造解析の実用性の向上に資するものである。

研究成果の概要(英文)：Visualization of three-dimensional structures by X-ray microscopic CT (computer tomography) is essential for operando microscopic nondestructive observation of real materials, especially for industry. Since CT microscopy requires the sample size to be kept within the depth of focus D, an X-ray lens with a deep D is an important development element. The principal investigator has proposed a novel X-ray lens, which we named inverse phase composite zone plate, that can extend D while minimizing the degradation of resolution R. In this study, we searched for a practical design value and simulated its performance, and found a design value that can approximately double D while suppressing R degradation by 7% for 8-12 keV X-rays.

研究分野：放射光X線光学

キーワード：X線顕微鏡 放射光 X線光学 X線トモグラフィ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線の波長は0.1 nm前後と原子の大きさと同程度であるため、X線光学素子を用いてX線を結像ないし集光することによって原子スケールの空間分解能で物質の構造を直接見ることが原理的には可能である。これを究極の目的とする学問分野としてX線顕微鏡がある。X線顕微鏡の研究では、高空間分解能化をメインストリームとして、X線光学素子の開発・高性能化やX線顕微鏡装置の開発などの研究が世界的に展開されている。

フレネルゾーンプレート (FZP) や全反射ミラーなどのX線光学素子の進歩により、50 nmレベルの空間分解能が比較的容易に得られるようになり、走査型X線顕微鏡による局所分析やX線顕微鏡トモグラフィ (CT) による非破壊3次元構造解析へのニーズが高まってきている。顕微鏡光学系には、より高い空間分解能を得ようとすると焦点深度はより浅くなるという基本原理がある。従って、空間分解能を高くすることと焦点深度を大きくすることは同時に達成できない。空間分解能を高いレベルで維持したまま焦点深度を大きくできないことは、厚い試料を高い空間分解能で観察することが原理的に困難であることを意味するので、微細実材料のオペランド観察には焦点深度の大きいX線光学素子は必須の開発要素といえる。

申請者は前基盤研究 (C) において、波動光学的なアプローチでこの縛りを緩くできないかと考えた。X線光学素子としてはFZPの変形バージョンであるInverse-phase composite zone plate (IP-CZP; 逆位相コンポジットゾーンプレート) を発案した[1]。回折積分に基づくシミュレーションを実行し、空間分解能の劣化を8%にとどめ焦点深度を2倍にできる設計値を発見した[2]。しかしながらその設計値はゾーンの格子構造の最大アスペクト比が30を超えており、現在の微細加工技術では実際に製作することは困難である。また代替の加工技術も無い。従って、IP-CZPの早期の実用化を図るには現状の加工技術で製作可能な実用的な設計値を見いだす必要がある。

[1] [Y. Kagoshima & Y. Takayama, Microscopy and Microanalysis 24, Supplement S2, 280-281 \(2018\).](#)

[2] [Y. Kagoshima & Y. Takayama, J. Synchrotron Rad. 26, 52-58 \(2019\).](#)

2. 研究の目的

申請者は前基盤研究 (C) において、IP-CZPの回折積分計算プログラムを開発し、集光光学系をシミュレーションし、空間分解能の劣化を8%にとどめ焦点深度を2倍にできる設計値を発見した。しかしながらその設計値は、ゾーンの厚さ $t=2.645 \mu\text{m}$ 、最小ゾーン幅 $\Delta r_N=84 \text{ nm}$ であり、従って格子構造の最大アスペクト比 ($t/\Delta r_N$) が31.5に達する。このような狭幅かつ高アスペクト比の微細格子構造の製作は、最もポピュラーな加工技術である電子線リソグラフィでは不可能である。また代替の加工技術も無い。本研究では、電子線リソグラフィで製作可能※すなわち低アスペクト比でも実用性のある設計値を見いだすことを目的とした。※電子線リソグラフィで製作可能な最大アスペクト比は、 $\Delta r_N=50 \text{ nm}$ で5程度、 $\Delta r_N=100 \text{ nm}$ で8程度である。

3. 研究の方法

IP-CZPの回折積分計算プログラムは前基盤研究 (C) にて開発済みであった。本研究では、複数のパラメータを網羅的に変化させて計算できるプログラムを新たに開発する。開発した計算プログラムを用いて、現状の加工技術により製作可能で実用的な設計値 (最大アスペクト比が8程度) を探索し、主要性能 (空間分解能と焦点深度) の期待値の算出を行う。

日本放射光学会年会や日本光学会年次学術講演会等において研究の進捗状況を発表する。2020年度にはX線顕微鏡国際会議XRM2020で成果を発表する予定であったが、新型コロナウイルスのため延期され2022年に開催された (XRM2022となった)。

4. 研究成果

本研究ではより精緻な設計を可能とするために制御パラメータを増やし、特定のパラメータを順次変化させて計算できるプログラムを新たに開発し、実用性のある設計値を探索した。硬X線領域では、X線のエネルギーは8から12 keV、目標の空間分解能は100 nmとして設計し性能をシミュレートした。ゾーンプレートの材質がタンタルでX線のエネルギーが8 keVの場合の計算結果を図1に示す。位相ZPとしての最適なゾーン厚は2.645 μm (アスペクト比31.5)であるが、ゾーン厚を現在の加工限界であるアスペクト比8 (ゾーン厚672 nm)まで下げても、光軸上の強度は半減程度に留まり、焦点深度は維持され(358 μm)、空間分解能は1.1倍弱(103 nm \Rightarrow 111 nm)に抑えられることがわかった。軟X線領域では、X線のエネルギーは285 eV、目標の空間分解能は55 nmとして設計し性能をシミュレートした。その結果、空間分解能の劣化を1.1倍に抑えつつ焦点深度は1.9倍に拡大できることがわかった。

シミュレーションで得られた光学伝達関数を用いてフーリエ光学に基づく結像シミュレーションを行い、IP-CZPのX線レンズとしての実用性を示した。

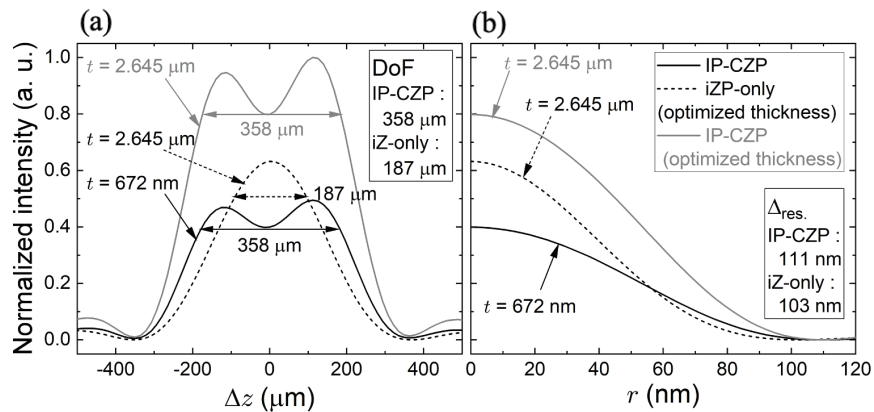


図1. 焦点近傍の強度分布の計算結果. (a) 光軸上光軸方向、(b) 焦点面内動径方向. 点線は内側のZPだけ (iZP-only) すなわち従来のZPの場合の値である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1. 著者名 Kagoshima Yasushi, Takayama Yuki | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Optical transfer function of inverse-phase composite zone plate devised for deep-focusing X-ray microscopes | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 118001 ~ 118001 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac2e69 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名 Y. Kagoshima & Y. Takayama | 4. 巻 in press |
| 2. 論文標題 Practical Design of the Inverse-Phase Composite Zone Plate for Improved Depth of Focus | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings (Proceedings of 15th International Conference on X-Ray Microscopy, XRM2022, June 19-24, 2022) | 6. 最初と最後の頁 uncertain |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|--------------------------------------------|
| 1. 発表者名 藤井 綾香, 高山 裕貴, 竜島 靖 |
| 2. 発表標題 軟X線顕微鏡用ディープフォーカスゾーンプレートの設計と集光特性 |
| 3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Y. Kagoshima and Y. Takayama |
| 2. 発表標題 Practical Designing of Inverse-Phase Composite Zone Plate for Deeper Depth of Focus |
| 3. 学会等名 The 15th Symposium of Japanese Research Community on X-ray Imaging Optics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 竈島 靖、高山裕貴 |
| 2. 発表標題 ディープフォーカスゾーンプレートの実用設計 |
| 3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|----------------------------------------|
| 1. 発表者名 竈島 靖、高山 裕貴 |
| 2. 発表標題 ディープフォーカスゾーンプレートの結像シミュレーション |
| 3. 学会等名 第35回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名 Y. Kagoshima & Y. Takayama |
| 2. 発表標題 Practical Design of the Inverse-Phase Composite Zone Plate for Improved Depth of Focus |
| 3. 学会等名 XRM2022, 15th International Conference on X-Ray Microscopy |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果を国際会議 (XRM2020, 19-24 July 2020, Taipei) における発表を予定し、査読付プロシーディングス原稿も投稿したが、国際会議がキャンセルされ原稿もキャンセルとなってしまった。同会議が2022年6月に開催されることとなったので、補助事業期間延長を申請し、2022年度も継続することとした。同会議で本研究の成果を発表し、同会議のプロシーディングスとして間もなく出版予定である。

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 高山 裕貴 (Takayama Yuki) | 東北大学 | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |