

平成 31 年 4 月 10 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05019

研究課題名(和文) 回折限界を超えるX線用回折格子型集光素子の提案とシミュレーションによる原理検証

研究課題名(英文) Proposal for a transmission-grating-type focusing device achieving better performance than diffraction limit and its numerical simulation

研究代表者

籠島 靖 (Kagoshima, Yasushi)

兵庫県立大学・物質理学研究科・教授

研究者番号：10224370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：顕微鏡には分解能 $R$ と焦点深度 $D$ の間に回折限界の縛りがあるが、これを緩くすることを目的とした。光学素子としてはZone Plate (ZP)の変形タイプを考えた。ZPの $R$ と $D$ は最外線幅( $dr$ )で決まる。ZPには正と負の区別がある。この2つのZPの集光強度分布は全く同じだが振幅は逆位相である。複合ZPは1次回折ZPの外側に3次回折ZPを配置し、集光効率と $R$ の向上を狙うものである。正・負、複合の構造を組み合わせることにより、X線エネルギー $E$ が10 keVで $R$ を $dr$ で決まる値の7%増しに抑えつつ $D$ を約2倍にできる解を見つけることができた。 $E$ が8～12 keVの範囲でもこの性能が保たれることも確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

放射光が広く利用されるようになり、ZPや全反射ミラーなどのX線光学素子の進歩も相俟って、サブ100 nmの分解能 $R$ が比較的容易に得られるようになり、局所分析やX線顕微鏡の実用性とニーズが高まってきている。集光光学系の基本原理として、より小さい $R$ を得ようとすると焦点深度 $D$ はより浅くなる。すなわち $R$ を小さくすると $D$ を大きくすることは同時には達成できない。 $R$ を損なわずに $D$ を大きくできないことは、厚い試料を高い分解能で観察することは原理的に困難であることを意味しており、実材料の分析において試料の厚さを制限することになる。本研究はX線分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)：An inverse-phase composite zone plate (ZP) is proposed to gain a deeper focus than the diffraction-limited depth of focus, with little reduction in spatial resolution. The structure is a combination of an inner ZP functioning as a conventional phase ZP and an outer ZP functioning with third-order diffraction with opposite phase to the inner ZP. Complex amplitude distributions neighboring the focal point were calculated using diffraction integration. The depth of focus and the spatial resolution were examined. Two characteristic promising cases regarding the depth of focus were found: a pit-intensity focus with the deepest depth of focus, and a flat-intensity focus with deeper depth of focus than usual ZP. It was found that twice the depth of focus could be expected with little reduction in the spatial resolution for 10 keV X-ray energy. It was also found that the depth of focus and the spatial resolution almost unchanged in the photon energy range from 8 to 12 keV.

研究分野：X線顕微鏡、放射光

キーワード：X線顕微鏡 放射光 X線光学 X線ナノビーム

## 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線顕微法 (X-Ray Microscopy)がある。X線顕微法では、実空間における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。

X線集光素子では FZP や全反射鏡 (TRM) が回折限界集光を達成している。回折限界集光サイズ $\Delta_{res}$ は、開口数 (Numerical Aperture: NA) を用いて $\Delta_{res} = 0.61\lambda/NA$  で表される、いわゆるレーリーの定義によるものである。FZP や TRM の回折限界集光は、超精密加工技術を極めることによって達成している。しかしながら FZP も TRM も加工技術の精緻化は概ね極限に達しており、さらなる高性能化には新しい発想が必要と考えている。

### 2. 研究の目的

本研究では、回折格子型集光素子の複素振幅透過率分布 (即ち、格子の構造) を従来に無い新奇な構造とすることにより、回折限界を超える集光ビームの生成に挑む。回折積分を用いたシミュレーションにより本提案の原理検証を行い、最高性能を発揮する回折格子型集光素子の構造を探索することを目的とする。

### 3. 研究の方法

①回折限界を超え得る回折格子型集光素子の格子構造の考案、②集光面の光波の複素振幅分布を計算する Fortran コードの開発と精緻化、③考案した複数の回折格子構造について、パラメータの詳細設計と主要性能 (空間分解能と焦点深度) の期待値の算出を行う。①では、設定した円形回折格子の構造を複素振幅透過率分布に変換し、数値回折積分を実行し、集光面の光波の複素振幅分布を計算する Fortran コードを作成する。集光面の光波の複素振幅について、実数部と虚数部、振幅と位相、絶対値の2次元空間分布を計算し、それぞれを三次元表示する。この数値計算結果から、主要性能である空間分解能と焦点深度の期待値を求める。

### 4. 研究成果

X線光学素子としては Fresnel Zone Plate (FZP)の変形バージョンを考察した。FZP の $\Delta_{res}$ は最外線幅 (=最小線幅:  $\Delta r_N$ ) で決まる。FZP には、Positive ZP と Negative ZP という区別がある。この2つの ZP はともに凸レンズの働きをし、集光点の強度プロファイルは全く同じだが、複素振幅は逆位相である。また、Composite ZP というものがあり、これは通常の1次回折集光 ZP の外側に3次回折集光 ZP を焦点距離が等しくなるように設計し、集光効率と空間分解能の向上を狙うものである。本研究では、Positive ZP と Negative ZP を逆位相とした Composite ZP の構造を提案し、Inverse-phase composite zone plate (IP-CZP)と名付けた。その構造を図1に示す。(a)が IP-CZP、(b)がその断面、(c)が外側 ZP、(d)がその断面である。本研究で開発した回折積分計算を実行することにより、X線のエネルギーを10 keV、ZPの材質を Ta に仮定して、 $\Delta_{res}$ を $\Delta r_N$ で決まる値の約7%増し程度に抑えて、DoFを $\Delta r_N$ で決まる値の約2倍にできる解を見つけることができた。その計算結果である焦点近傍の強度分布を図2に示す。(a)が動径方向 (空間分解能を決める)、(b)が光軸方向 (焦点深度を決める) である。空間分解能 ( $\Delta_{res}$ ) は、内側 ZP だけ (iZP-only) の時が102 nm なのに対し、IP-CZP (ZP-A) では110 nm 程度で留まっており、約7%の劣化に抑えられていることがわかる。一方焦点深度 (DoF) は、内側

ZP だけの時 (iZP-only) が  $231\ \mu\text{m}$  なのに対し、IP-CZP (ZP-A) では  $461\ \mu\text{m}$  と約 2 倍に拡大できていることがわかる。また、X線のエネルギーが  $8\sim 12\ \text{keV}$  の範囲でもこの性能が保たれることも確認した。

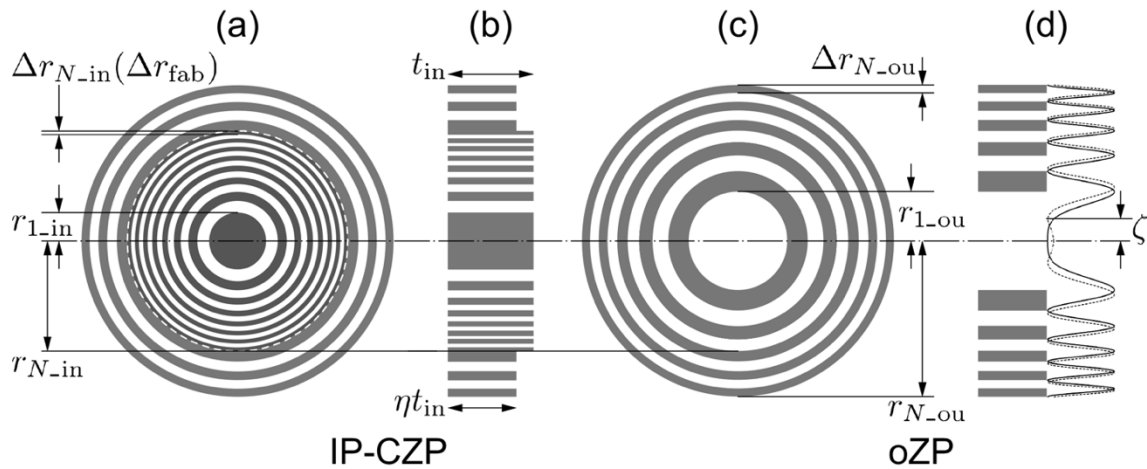


図 1. IP-CZP の構造

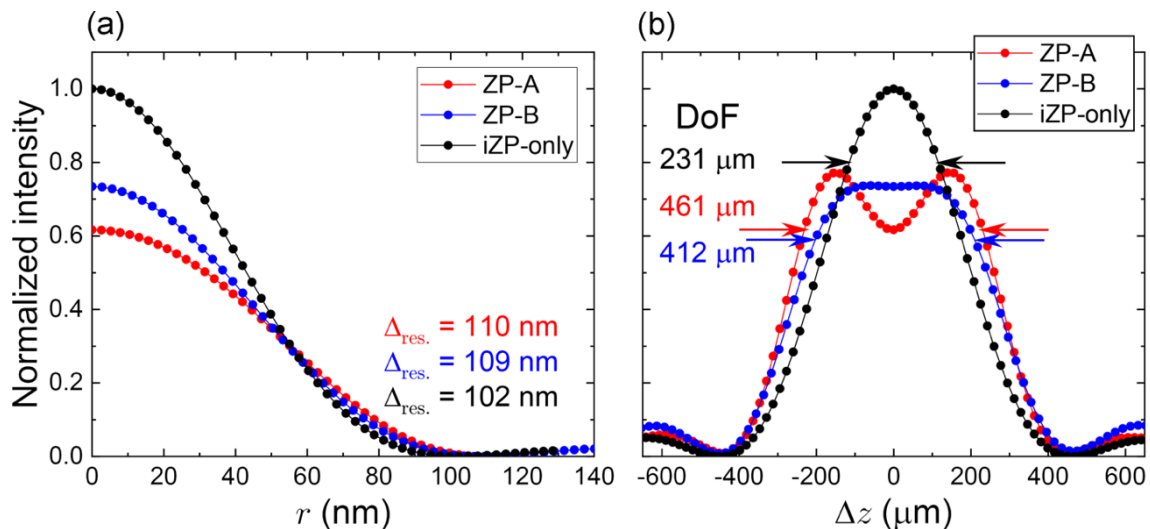


図 2. 焦点近傍の強度分布

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) “Inverse-phase composite zone plate providing deeper focus than the normal diffraction-limited depth of X-ray microbeams”, Y. Kagoshima & Y. Takayama, *J. Synchrotron Rad.* (2019). **26**, 52-58. (Open Access)
- (2) “Proposal for Inverse-Phase Composite Zone Plate for Deeper Depth of Focus”, Y. Kagoshima & Y. Takayama, *Microscopy and Microanalysis* **24**, Supplement S2 (Proceedings of Microscopy & Microanalysis 2018) August 2018, pp. 280-281. (Open Access)

[学会発表] (計 4 件)

- (1) 「ディープフォーカスゾーンプレートの提案(2)」(一般講演)、籠島 靖、高山 裕貴、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、2019 年 1 月国際会議場。
- (2) “Proposal for Inverse-Phase Composite Zone Plate for Deeper Depth of Focus”, Y. Kagoshima & Y. Takayama, XRM2018, 14th International Conference on X-Ray Microscopy (国際学会) (ポスター発表)。
- (3) 「ディープフォーカスゾーンプレートの提案(1)」(ポスター発表)、籠島 靖、高山 裕貴、第 31 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2018 年 1 月つくば国際会議場。

(4) 「ディープフォーカスゾーンプレートの提案」(ポスター発表)、竈島 靖、高山 裕貴、第 13 回 X 線結像光学シンポジウム、2017 年 11 月、筑波大学。

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：高山裕貴

ローマ字氏名：Yuki Takayama

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。