

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390088

研究課題名(和文) フレネル数が減少した軟X線高倍率光学系の結像特性の解明

研究課題名(英文) Imaging Properties of High Magnification Soft X-ray Objective with Reduced Fresnel Number

研究代表者

豊田 光紀 (TOYODA, Mitsunori)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：40375168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：波長1 - 10nm程度の軟X線は、数10nmの高い空間分解能での元素分布イメージングへの応用が期待できる。研究代表者は軟X線顕微鏡用の高倍率対物鏡の開発の過程で、その結像特性が従来の低倍率光学系と異なることを見出した。本研究では、高倍率対物鏡の振る舞いを実験的に明らかにし、また、その結果を援用し、対物鏡の結像理論を新たに構築することを目的とし研究を行った。その結果、高倍率光学系では、像面のデフォーカス特性に非対称性が存在することが観測された。また、非対称性は、像側のフレネル数の低下で生じる固定位相項に起因し、ガウス像面の光強度分布には影響を与えないことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：When we apply soft X-rays, which have wavelengths in the range of 1 to 10 nm, to optical microscopy, high-spatial resolution of a few tens of nanometers can be expected in diffraction-limited imaging. To realize soft X-ray imaging with high-spatial resolution, high magnification of over x1000 should be required for an imaging objective of the microscope. As a result of increasing magnification, numerical aperture of this objective on an image plane, which is inversely proportional to magnification, should be reduced to be fairly small value.

In this study, firstly, we experimentally confirm imaging properties of the high-magnification objective with a greatly reduced numerical aperture on an image plane. Then we formalize the imaging properties of the objective by using these experimental results. We also discuss the effect of increasing the magnification on the imaging properties.

研究分野：応用光学

キーワード：極紫外 軟X線 顕微鏡 フーリエ結像論 多層膜ミラー

1. 研究開始当初の背景

波長 1 - 10nm 程度の軟 X 線は、短波長性と内殻吸収による元素選択性を併せ持ち、数 10nm の高い空間分解能での元素分布イメージングへの応用が期待できる。このため、軟 X 線顕微鏡は生体や磁性材料のナノスケール構造の動的変化をビデオ観察できる新しい光学顕微鏡として注目され、研究代表者は多層膜ミラーによる EUV 顕微鏡の開発研究を 10 年にわたり推進してきた。

軟 X 線顕微鏡には、大開口数 (NA>0.2) で明るく、収差の小さい Schwarzschild ミラー (2 面同心球面ミラー) が拡大光学系として用いられてきた。しかし、従来系は拡大倍率に制限があり (最大で約 100 倍)、10nm 分解能を得るには検出器にサブ μm の空間分解能を持つ写真乾板が必要で、観察は静的試料に限られてきた。CCD 検出器 (画素径 10 μm) を用い、生体や磁性材料などナノスケールの構造が動的に変化する試料をリアルタイム観察するには、光学系の倍率を大幅に向上する必要がある。そこで、研究代表者は、2 面ミラー主光学系と付加拡大ミラーを組合せた、2 段結像による高倍率対物鏡を独自に考案した。

2. 研究の目的

研究代表者は、上述した高倍率対物鏡の開発の過程で、その結像特性が従来の低倍率光学系と異なることを見出した。高倍率対物鏡で現れる特異な特性の起源は、倍率の増加に伴い結像におけるフレネル数が減少し、平面波近似の破綻するためと考えられ、軟 X 線用光学系の結像特性は、従来の低倍率光学系で広く用いられるフーリエ結像論では記述できない。そのため、本研究では、以下を研究することで、高倍率対物鏡の振る舞いを記述する結像理論を新たに構築することを目的とした。

- (1) 独自に開発した高倍率対物鏡の結像特性を、実験的に検証する。
- (2) 得たデータを援用し、フレネル数が減少した結像光学系の結像特性を定式化する。

3. 研究の方法

(1) 高倍率対物鏡の結像特性の評価

フーリエ結像論が成立しない、高倍率対物鏡の結像特性を正しく理解するために、微小点物体や周期格子等のテストパターンを現有の対物鏡で観察し、その結像特性を実験的に確認する。これまでの研究より、フレネル数減少の効果は、主に物体面や像面 (観察面) を光軸方向に移動した場合に顕著に現れることがわかっている。対物鏡は反射型のため、色収差は生じない。このため、実験が容易な可視域で観察を行う。現有の高倍率対物鏡 (図 1) を用い、光学系のセットアップを容易に変えることが可能な透過型顕微鏡を試作し、フレネル数が減少した光学系の結像特性を実験的に調査する。

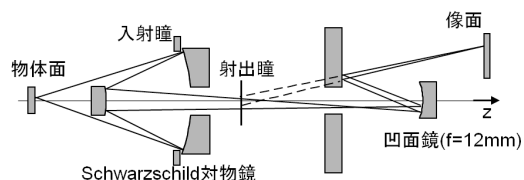


図 1 . 高倍率対物鏡の模式図

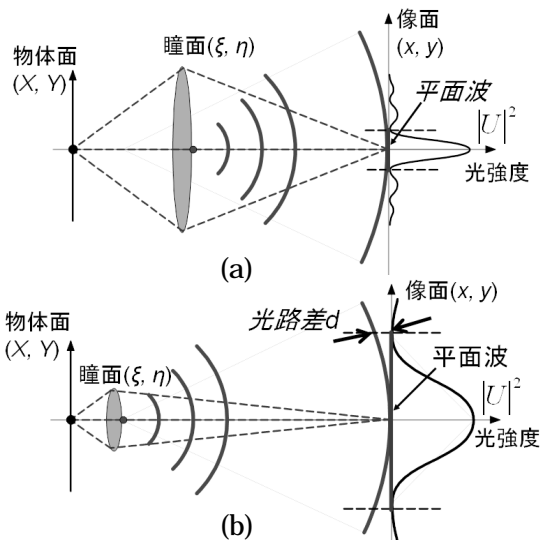


図 2 . 結像倍率の増大に伴うフレネル数の変化

(2) 低フレネル数結像系の結像特性の定量的モデルの構築

フレネル数が減少する高倍率対物鏡の結像特性を定量的に表現できるモデルを構築する。従来のフーリエ結像論では、光学系で生じる 2 回の回折 (物体面から入射瞳、および射出瞳から像面) とともに平面波近似が成り立つことを仮定している (図 2 上)。高倍率対物鏡では、物体面から入射瞳への回折では平面波近似が成り立つ一方で、射出瞳から像面への回折では、回折球面波の曲率が無視できなくなる。一般に、回折波を平面波とみなすには、図 2 に示す像面での光路差 d が波長より十分に小さい必要がある。波長と光路差 d との比をフレネル数 N ($N = \lambda/d$) と言い、従来のフーリエ結像論では、フレネル数 N が十分に大きいことを暗黙に仮定している (図 2 上)。一方で、図 2 下に示すように、倍率が增大すると、像面での光路差 d が波長程度となり、フレネル数 N は減少し、平面波近似は破綻する。このため、高倍率結像の定式化には、2 回目の回折積分に球面波の影響を取り込む必要がある。(1) で得た実験データを援用し、球面波の位相効果を十分な精度で近似する実用的な解析表現を見出す。

4. 研究成果

(1) 高倍率対物鏡の結像特性の評価

図 3 は、顕微鏡の像面で実測した点物体の 2 次元強度分布を示す (実験が容易な可視域

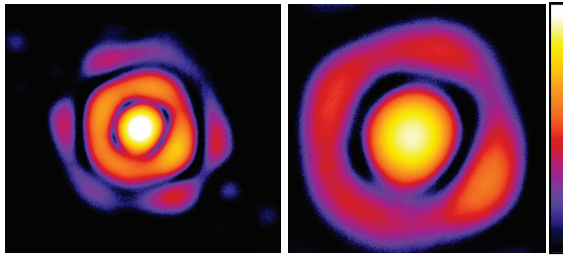


図 3. 像面デフォーカスによる点像強度分布の変化.(a) $z=-500$ mm, (b) $z=+500$ mm.

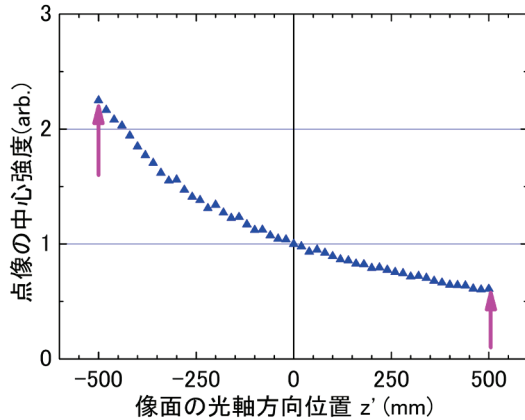


図 4. 回折焦点強度の像面位置依存性

で測定；回折リングを強調するため強度は \log スケールで表示)。図 3(a)および(b)がそれぞれ観察面(CCD 検出器)をガウス像面より光軸 z 方向に ± 500 mm 移動し得た像を示す。観察面を対物鏡から遠ざけるにつれて、結像倍率が増大し点像が大きくなる様子が分かる。図 4 に、回折焦点強度(Airy disk の最大強度)の像面位置依存性を示す。焦点深度内にもかかわらず、焦点強度は像面距離 z' の減少にともなって増加する、非対称な変化をした。これは、フレネル数の大きな通常の光学系で観測される、像面距離 z' に対して対称な(偶関数的な)強度変化と大きく異なっている。このように、フレネル数が低下した高倍率光学系では、像面のデフォーカス特性に非対称性が存在することが観測された。

軟 X 線顕微鏡で観察する試料には厚みがあり、観察される像は、光軸方向の厚みの範囲で得られる像の重ね合わせとなる。このため、像の解釈には、物体の光軸方向位置に対する結像特性の変化を知ることが重要となる。高倍率光学系の物体側のデフォーカス特性を明らかにするため、CCD 検出器を固定し、試料であるポリスチレン球を光軸方向 z に移動しながら点像強度分布を計測した結果を図 5 に示す。図 5(a)および(b)は、試料と、検出器の共役点との間の距離 z が、それぞれ、 $-7 \mu\text{m}$ および $+7 \mu\text{m}$ のとき(光学系の焦点深度に相当)の点像強度分布である。また、図 6 に回折焦点強度の試料位置 z 依存性を示した。物体側のデフォーカスでは、焦点深度を超えた試料位置 z の変化により、強度分布が変化し、試料面が共役点から離れるに従い点像が

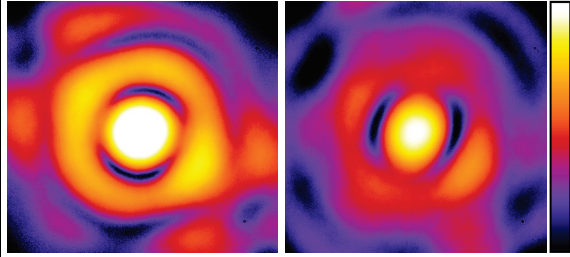


図 5. 物体面デフォーカスによる点像強度分布の変化.(a) $z=-500$ mm, (b) $z=+500$ mm.

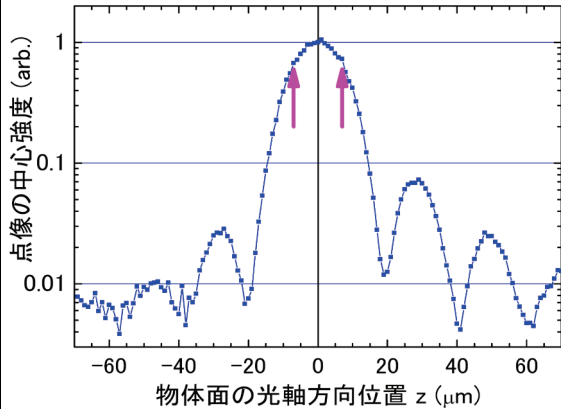


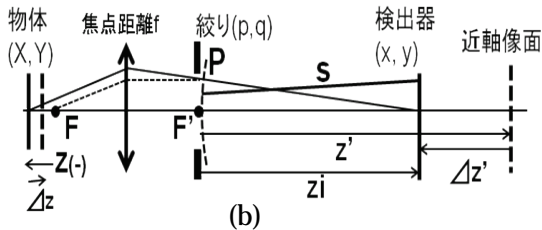
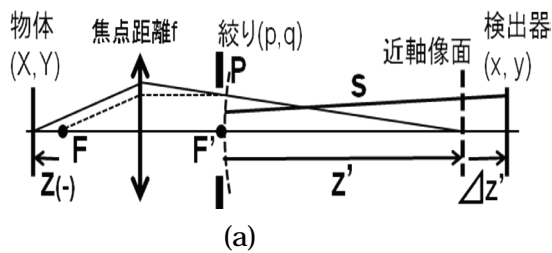
図 6. 回折焦点強度の物体面位置依存性

ボケていく様子がみられた。また、回折焦点強度は試料位置 z に対して偶関数的に変化した。これらの結果より、像側のデフォーカス特性は、フレネル数の大きい通常の光学系と同じ振る舞いであることが分かった。

(2) 低フレネル数結像系の結像特性の定量的モデルの構築

フレネル数が低下した高倍率光学系のデフォーカス特性は、像側では像面位置に対して非対称になる一方で、物体側では、フレネル数の大きい通常の光学系と同様に、物体面位置に対して対称な振る舞いをすることが分かった。像側で観察された非対称性は、レーザー集光系など、開口が小さくフレネル数が減少した光学系で観察される現象と同様のものとして理解できる。一方で、物体側で観測された対称なデフォーカス特性は、低フレネル数光学系の振る舞いとして奇異なものに思える。

光学系の結像特性を理解するために、フレネル数が低下した高倍率光学系の結像特性の定式化を試みた。物体側の大きなフレネル数を表現するため、以下では、図 6(a)に示す物体側にテレセントリックな光学系を仮定する。このとき、物体側のフレネル数は ∞ となる。高倍率を得るため、物体は、前側焦点 F から僅か z だけ離れた位置にあり、絞りから z' 離れた近軸像面からさらに z だけ離れた(デフォーカスした)位置に検出器があると仮定する。このとき、絞り面上の実空間座標 (p, q) における電場振幅 E は、物体位置 z により生じるデフォーカス収差を考慮して、以



下のように書ける。

$$\bar{U}(p, q) = c \iint o(X, Y) \exp(-ik \frac{Xp + Yq}{f}) dXdY \cdot \exp(-ik \frac{p^2 + q^2}{2z'})$$

上式で、積分の外にあるデフォーカス収差に起因する部分は、半径 z' の球面波の振幅を表している。これを物理的に考えれば、物体の空間スペクトルは図 6(a) に記した参照球面 P 上に生じると考えることができる。

検出器上の電場振幅を求めるには、参照球面 P 上に生じた空間スペクトルの、検出器への回折積分を考えれば良い。球面波の重ね合わせとして、検出器上の振幅 U は以下のように書ける。

$$U(x, y) \cong c \iint \bar{U}(p, q) \exp(iks) dpdq$$

ここで、 c は定数である。また、積分は球面 P 上で行うものとし、 s は、球面 P 上の点 (p, q) と検出器上の点 (x, y) との間の距離とする。簡単な計算より、距離 s には近似的に以下の関係が成り立つ。

$$s = z' + \Delta z' - \frac{xp + yq}{z' + \Delta z'} - \frac{p^2 + q^2}{2(z' + \Delta z')z'} \Delta z' + \frac{x^2 + y^2}{2(z' + \Delta z')} + \dots$$

の第 1-2 項は、積分内で定数となり像の強度に影響を与えない。第 3 項は、フーリエ変換の項である。分母に検出器位置 D_z' の寄与があり、 D_z' の変化により像側の開口数が変化する。このため、像側フレネル数の減少した光学系では、検出器の位置の変化により結像倍率が変化することがわかる。第 4 項は、デフォーカス収差を表す。分母に検出器位置 D_z' の寄与があるため、低フレネル数光学系では、デフォーカス収差の大きさが、検出器位置 D_z' に対して非対称となる。第 5 項は、検出器上に重畳する固定位相項を表す。本項は、低フレネル数光学系特有のものであるが、電場の絶対値の二乗に比例する光強度には影響を及ぼさない。

次に、図 6(b) のモデルを用い、物体側のデフォーカス特性を考える。図内の物体側および像側には、実線および破線で示した 2 組の

共役関係を仮定し、検出器は像側の実線で示した位置に設置するものとする。幾何光学的な関係から、球面 P 上の点 (p, q) と検出器上の点 (x, y) との間の距離 s は以下となる。

$$s = z' - \frac{xp + yq}{z'} + \frac{p^2 + q^2}{2f^2} \Delta z + \frac{x^2 + y^2}{2z'} + \dots$$

第 1 項は像の強度に影響を与えない。第 2 項は、フーリエ変換の項である。分母には像側でみられた様なデフォーカスの依存性はなく、物体の位置 D_z による倍率変化は生じない。また、第 3 項のデフォーカス収差は、フレネル数の大きい従来光学系と同様な形をしている。第 2 項と第 3 項から分かるこれらの事実は、図 5-6 で示した物体側のデフォーカス特性が、フレネル数の大きい従来光学系と同様となる実験データを、よく説明する。結局、フレネル数の低下の影響は、第 4 項で表現される、検出器上に重畳する固定位相項にのみあられ、像の光強度分布には影響を与えないことが、上述の考察から明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 5 件)

"Flat-field anastigmatic mirror objective for high magnification extreme ultraviolet microscopy", Mitsunori Toyoda, Adv. Opt. Techn. 4, 339-346 (2015), 査読有, DOI: 10.1515/aot-2015-0020.

"Demonstrating 30-nm spatial resolution of three-multilayer-mirror objective for extreme ultraviolet microscopy: Imaging test by observing lithography mask", Mitsunori Toyoda, Kenjiro Yamasoe, Akifumi Tokimasa, Kentaro Uchida, Tetsuo Harada, Tsuneo Terasawa, Tsuyoshi Amano, Takeo Watanabe, Mihiro Yanagihara, Hiroo Kinoshita, Appl. Phys. Express 7, 102502-1-102502-4 (2014), 査読有, DOI: 10.7567/APEX.7.102502.

"Observation of phase defect on extreme ultraviolet mask using an extreme ultraviolet microscope", Tsuyoshi Amano, Tsuneo Terasawa, Hidehiro Watanabe, Mitsunori Toyoda, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 13, 023012-1-023012-7, (2014), 査読有, DOI: 10.1117/12.2046164.

"Simulation Analysis of the Characteristics of a High Magnification Imaging Optics for the Observation of Extreme Ultraviolet Lithography Mask to Predict Phase Defect Printability", Tsuneo Terasawa, Yukiyasu Arisawa,

Tsuyoshi Amano, Takeshi Yamane, Hidehiro Watanabe, Mitsunori Toyoda, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 096601 (2013), 査読有, DOI: 10.7567/JJAP.52.096601-1-096601-8.

"Observation of Residual-Type Thin Absorber Defect on Extreme Ultraviolet Lithography Mask Using an Extreme Ultraviolet Microscope", Tsuyoshi Amano, Susumu Iida, Ryoichi Hirano, Tsuneo Terasawa, Hidehiro Watanabe, Kenjiro Yamasoe, Mitsunori Toyoda, Akifumi Tokimasa, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, Appl. Phys. Express 6, 046501-1-046501-3 (2013), 査読有, DOI: 10.7567/APEX.6.046501.

〔学会発表〕(計 15 件)

"極紫外放射光ナノ顕微鏡の開発による次世代デバイス構造の可視化", 豊田光紀, 日本学術振興会産学協力研究アモルファス・ナノ材料第 147 委員会・第 131 回研究会, 弘済会館(東京), 2016.1.8.

"広視野を 30nm 解像する EUV 顕微鏡の開発", 豊田光紀, 分子研研究会(学協会連携)・放射光学会第 8 回若手研究会"軟 X 線イメージングの描く未来", 分子研(岡崎), 2015.9.7-2015.9.8.

"点回折干渉計による高倍率 EUV 顕微対物ミラーの 1nm 精度波面制御", 豊田光紀, 砂山諒, 柳原美広, The 13th Symposium on X-Ray Imaging Optics, 名古屋大学(名古屋), 2015.11.17-2015.11.18.

"多層膜ミラー光学系による EUV リソグラフィマスクの高分解能観察", 豊田光紀, レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場(北九州), 2014.1.20-2014.1.21.

"Design, fabrication, and test of a novel wide field microscope objective for extreme ultraviolet multiscale imaging", Mitsunori Toyoda, The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics, Osaka, Japan, 2013.11.18-2013.11.20.

"Design, fabrication, and test of an EUV mask imaging microscope for lithography generations with sub-16 nm half pitch", M. Toyoda, K. Yamasoe, M. Yanagihara, T. Amano, T. Terasawa, A. Tokimasa, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita, 2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Toyama, Japan, 2013.10.6-2013.10.10.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊田 光紀 (TOYODA MITSUNORI)
東北大学・多元物質科学研究所・助教
研究者番号: 40375168