

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05314

研究課題名(和文) EUV波面シンセサイザの開発と実時間・超深度ナノイメージングへの応用

研究課題名(英文) EUV Wavefront Synthesizer for Real-Time and Extended Depth-of-Focus Imaging

研究代表者

豊田 光紀 (Toyoda, Mitsunori)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：40375168

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：吸収が大きく透過型位相板が無い極紫外(EUV)域で波面コーディング(Wave Front Coding)法による超深度イメージングを実現するには、対物鏡の波面を自在に変調し低次収差を重畳する「波面シンセサイザ」の開発が鍵となる。このため本課題では、以下を研究した。低次収差の動的変調のため、2枚の回転対称非球面ミラーに、積極的な偏心(ミスアライメント)と荷重変形を加え安定して0.1nm精度で波面を制御する新規解を探索し、実用解を得た。さらに、設計解をもとに試作したEUV多層膜対物ミラーを独自に開発した点回折干渉計上に設置し低次収差項の変調実験を行い、1nm精度で波面を制御できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究代表者は、EUV顕微鏡が拓く新領域として、軽元素で顕著な元素コントラストを活用した、ポリマー試料の合成・破壊過程の実時間・ナノイメージングを想定している。そのためには、厚い試料の実時間観察に最適なWFCの実現が強く求められている。研究代表者は、上述の10年に渡る開発で、理論(全幅探索設計法)・実験(点回折干渉計、デフォーダブル多層膜ミラー)の両面でEUV波面の0.1nm精度補正法を独自に開発している。本研究では、これらの基に「波面シンセサイザ」の基盤技術を確立し、新たな超深度EUVイメージング法の端緒とした。

研究成果の概要(英文)：To realize extended focal-depth imaging by the wave-front coding method in the extreme ultraviolet (EUV) region, the development of a "wave front synthesizer" that can modulate low-order aberrations on the wave front of the imaging objective is primary required. To realize this synthesizer, the following were studied in this project. For dynamic modulation of low-order aberration, we searched for a novel optical design to control the wavefront by applying decenters, tilts and load deformation to two aspherical mirrors, and obtained practical solutions. Then, a prototype objective mirror was installed in the point diffraction interferometer to experimentally modulate the low-order aberration term, and it was successfully demonstrated that the wavefront can be controlled with an accuracy below 1 nm.

研究分野：X線光学、応用光学

キーワード：多層膜ミラー 超深度イメージング ポリマーブレンド

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

波長 2nm から 20nm 程度の極紫外線(EUV)を用いる EUV 顕微鏡は、軽元素の内殻吸収で生じる元素コントラストを、数 10nm の空間分解能で観察でき、生体や高分子の微細構造をビデオ観察する究極の光学顕微鏡として注目されている。研究代表者は独自開発の全幅探索設計法 [Opt. Rev. 13 149(光設計賞)]を用い、EUV 多層膜ミラーよる 2 段結像・高倍率対物鏡を新たに考案した [Adv. Opt. Techn. 4 339.(EOS 機関紙招待論文)]。対物鏡は 3 面 Mo/Si 多層膜ミラーによる簡便な構成で、大開口数(NA=0.25)により、従来ゾーンプレートの 100 倍明るい、高分解能 EUV 像のリアルタイム観察が期待できる。さらに、分担者(原田)と共同で放射光を光源とする EUV 顕微鏡を構築し、リソグラフィマスクの観察により多層膜ミラー光学系として世界最高の空間分解能(30nm)を実証し、大きな反響を得た [App. Phys. Exp. 5 112501(科学計測振興賞)]。

研究代表者は、EUV 顕微鏡が拓く新領域として、軽元素で顕著な元素コントラストを活用した、ポリマー試料の合成・破壊過程の実時間・ナノイメージングを想定している。その一歩として 2016 年から、実験室 EUV 顕微鏡によるポリマー試料の無染色観察に挑戦している。図 2 にポリスチレン(PS)/PMMA および PPS/PEI ポリマーブレンドの無染色・透過 EUV 像の例を示す [ICO-24 予稿集 Tu2N-03]。レーザープラズマ光源の 1 ショット(10ns)露光で、スピノーダル分解で生じる網目状や、海島状の微細構造が、炭素-酸素間の元素コントラストにより、無染色で明瞭に観察できることを、波長 13nm 領域で初めて実証できた。

一方で、実時間ナノイメージングへの展開には、光学系の焦点深度の拡大が必須であることも分かった。焦点深度は開口数に反比例し、開発システムでは 100nm 程度となる。厚い試料(試料厚>500nm)の観察では焦点深度外の構造はボケる。厚み方向への変形を伴う破壊プロセス観察や 3 次元 CT への展開では、焦点深度の一層の拡大(~数 μm)が必要となるが、試料全体の観察には複数露光によるスルーフォーカス像が必要で、従来手法では、実時間性が失われる問題があった。

2. 研究の目的

上記研究により研究代表者は、分解能の劣化なく、実時間で、焦点深度を拡大する、超深度イメージング法が必須と確信した。光学素子の欠如から EUV 域で適用例は未だ無いものの、単一画像による焦点深度の拡大手法に、波面コーディング(Wave Front Coding)法がある。WFC では、対物系の波面を位相板で変調し低次収差を発生させ、点像強度分布がデフォーカスに対して鈍感な中間像を得る。次に、中間像にデコンボリューション演算(デジタルフィルタ)を施し最終像を得る。高速演算が可能で、実時間で焦点深度の拡大が期待できる。

吸収が大きく透過型位相板が無い EUV 域で WFC を実現するには、要求される焦点深度にあわせ、対物鏡の波面を自在に変調し低次収差を重畳する「波面シンセサイザー」の開発が鍵となる。研究代表者は、上述の 10 年に渡る開発で、理論(全幅探索設計法)・実験(点回折干渉計、デフォーカブル多層膜ミラー)の両面で EUV 波面の 0.1nm 精度補正法を独自に開発している。本研究では、これらの基に「波面シンセサイザー」の基盤技術を確立し、新たな超深度 EUV イメージング法の端緒としたい。

3. 研究の方法

研究目的に従い、以下について研究した。

全幅探索設計法を拡張し、多層膜ミラーの偏心・変形により焦点深度の拡大に必要な低次収差を安定して発生する EUV 対物ミラーの設計解を得る。

設計解をもとに、「波面シンセサイザー」機能を持つ、多層膜対物ミラーを開発する。

波面シンセサイザーが発生する低次収差をサブ nm の絶対精度で計測する干渉計システムを開発する。

上記を組み合わせ、実時間・超深度 EUV イメージング実現の鍵となる WFC 法に好適な nm 精度の低次収差変調を実証する。

4. 研究成果

上述した研究の方法の順に従い、研究成果の概要を示す。また、研究の進展に従い新たに生じた成果については章末に示した。

EUV における波面コーディング法の鍵となる低次収差の動的変調のため、2 枚の回転対称非球面ミラーに、積極的な偏心(ミスアライメント)と荷重変形を加え安定して 0.1nm 精度で波面を制御する新規解を探索した。探索には、独自の全幅探索法 [Opt. Rev. 18 441] を拡張した設計手法を考案した。本手法では、2 面の非球面ミラーからなる直入射光学系を仮定し、ミラーの並進およびチルトで生じる偏心コマ収差および球面収差、さらに、ミラーへの曲げモーメント印加で生じる非点収差を最適化パラメータとして、実現可能な設計解を大域的に探索することができた。

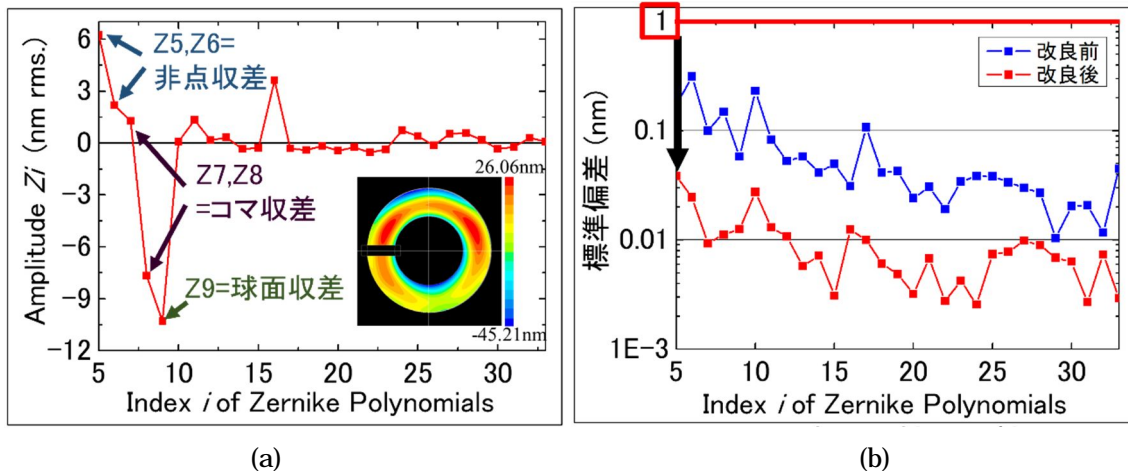


Fig. 1. 波面シンセサイザーで発生した低次収差の実測例. (a): 波面収差の Zernike 多項式表現. 非点収差(z_5, z_6), コマ収差(z_7, z_8), 球面収差(z_9)の各項の振幅を 1nm 精度で自在に変調できる. (b): 点回折干渉計の計測再現性. 光学系の改良により、Zernike 多項式 z_5 - z_{32} 各項の振幅を 0.1nm 以下の再現性で計測できる.

上記で得た光学デザインに基づき、EUV 多層膜対物ミラーを試作した。具体的には、超研磨した石英ガラス基板に対して Mo/Si 多層膜ミラーの成膜を行った。さらに、低次収差である、球面、コマおよび非点収差を変調できる、精密ミラーホルダの開発を行った。Mo/Si 多層膜ミラーは、現有マグネトロンスパッタ装置および実験室反射率計を活用し成膜した。また、これまで開発した精密ミラーホルダの機械設計を基に、ミラーの偏心および加重変形を積極的に利用し、波面シンセサイザーの光学仕様を満たす新規品を東北大多元研技術室と共同で開発した。

対物ミラーを独自に開発した点回折干渉計上に設置し、超深度 EUV イメージングの実現に必要なこれらの低次収差項の変調実験を行った。点回折干渉計は、検査光および参照光が、対物ミラーをほぼコモンパスに通過する構成とし、波面シンセサイザーで発生された波面収差をサブ nm の計測精度で計測できる。精密ミラーホルダ上に設置した凹面ミラーをピエゾモーターにより僅かに偏心させることで、波面コーティング法に求められる低次収差(コマ収差、非点収差および、球面収差)を 1nm 精度で発生・制御できることを実証することができた。この実験例を Fig. 1 に示す。

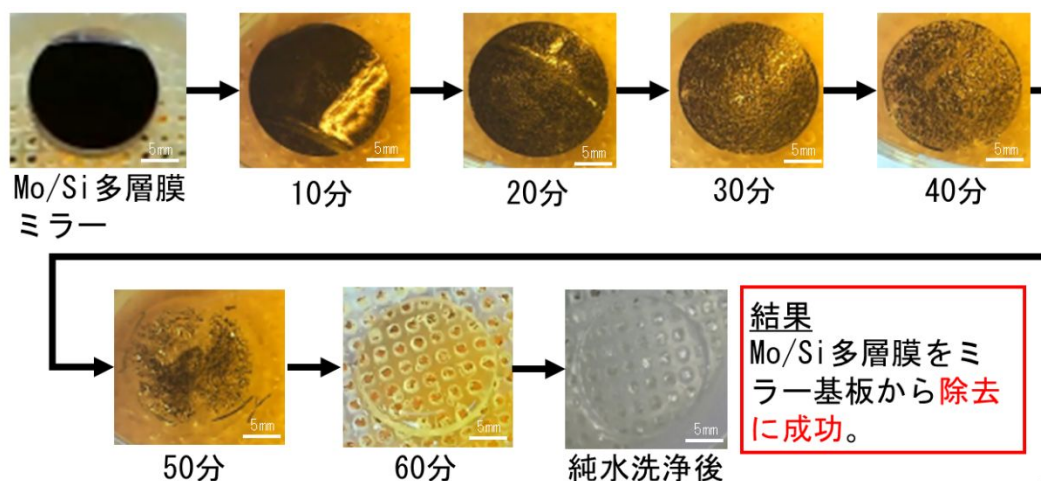


Fig. 2. アルカリ溶液による Mo/Si 多層膜ミラーの除去実験. 基板には超研磨した石英ガラス基板を、エッチャントにはフェリシアン化カリと水酸化ナトリウムの混合溶液を用いた。エッチング前後の表面粗さはともに 0.2nm rms であり、ミラーの除去に伴う表面粗さの変化は僅かであることが明らかになった。

研究の進展により、Mo/Si 多層膜ミラーの精密除去法の開発も合わせて行った。Mo/Si 多層膜ミラーによる EUV 結像光学系では、ミラー基板にはサブ nm の形状精度が求められる。作製期間が長くかつ高価なミラー基板の再利用は、実用上重要である。上述した研究の過程で、フェリシアン化カリと水酸化ナトリウムの混合溶液を用いれば、Mo および Si 双方の薄膜をエッチングできることを見出し、ミラー基板からの多層膜ミラーの除去法の開発を行った。その結果を Fig. 2 に示した。エッチャントの濃度や温度の最適化により、ミラー除去前後の表面粗さを、ほぼ劣化させない除去法を明らかにできた。本手法は、実用上に大きな意義を持つと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Toyoda Mitsunori, Yokoyama Ryo, Waki Shuntaro, Kakudate Toshiyuki, Chen Jun	4. 巻 14
2. 論文標題 Removal of Mo/Si multilayer coatings on fused silica substrates by wet chemical etching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 052003 ~ 052003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abf666	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 -
1. 著者名 Harada Tetsuo, Yamakawa Shinji, Toyoda Mitsunori, Watanabe Takeo	4. 巻 60
2. 論文標題 Development of a high-power EUV irradiation tool in a hydrogen atmosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 087005 ~ 087005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac15ef	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 -
1. 著者名 Shibuya Masato, Tanabe Takao, Toyoda Mitsunori	4. 巻 249
2. 論文標題 Conservation of energy between pupil and image for point spread function	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optik	6. 最初と最後の頁 168189 ~ 168189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijleo.2021.168189	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 -
1. 著者名 Mitsunori Toyoda, Shunsuke Aizawa, Shiori Gondai, Toshiyuki Kakudate, Masaki Ageishi, Hiroshi Jinnai, Jun Chen	4. 巻 13
2. 論文標題 Staining-free observation of polymer blend thin films on transmission extreme ultraviolet microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 82011
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/aba882	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山下正汰, 陳軍, 豊田光紀
2. 発表標題 2面斜入射対物ミラー設計解の大域的探索 (5)
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 豊田光紀, 桃野幸文, 角館俊行, 陳軍
2. 発表標題 実験室EUV顕微鏡の開発と高分子の無染色可視化への応用
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇俊太郎, 陳軍, 豊田光紀
2. 発表標題 実験室EUV顕微鏡用の高倍率多層膜ミラー対物光学系の開発
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相澤駿介, 豊田光紀
2. 発表標題 軸外物体を考慮したEUV多層膜ミラーの光学設計
3. 学会等名 第67回 応用物理学会 春季学術講演会 (上智大学 四谷キャンパス)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 相澤駿介, 角館俊行, 豊田光紀
2. 発表標題 EUV顕微鏡付加拡大系用の凹面Mo/Si多層膜ミラーの作製
3. 学会等名 第80回 応用物理学会 秋季学術講演会 (北海道大学 札幌キャンパス)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

見えない光を自在に操り、世界初の光学顕微鏡を開発 https://www.t-kougei.ac.jp/manabi/engineering/37738.html

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
研究分担者	原田 哲男 (Harada Tetsuo) (30451636)	兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・准教授 (24506)	

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
---------	---------