

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18821

研究課題名(和文) 高次高調波を利用した超精密形状計測法の開発

研究課題名(英文) Development of highly accurate figure measurement method using high order harmonic generation source

研究代表者

三村 秀和(Mimura, Hidekazu)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：30362651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：精密なモノづくりにおいて最終的な精度を決定するのは計測である。計測できないものは作製できない。ミラーやレンズなどの光学素子の表面を測定する方法として光を用いた方法が長年研究開発されてきている。干渉計はその方法の一つであり、干渉させた光の強度データから形状情報を含む光の位相を測定する。光の位相測定では、用いる光の波長が短い方が高い精度が実現できる。

本研究では簡便かつ小型の可干渉性光源である高次高調波軟X線を用いた光学素子の精密計測法を確立した。本研究では、位相回復法をミラーによって集光された高次高調波軟X線ビームに適応し高精度な波面計測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面形状のナノ精度での評価は光を用いて行われている。波長の短いX線を用いれば測定精度の大幅な向上が期待できる。本研究では、高次高調波と呼ばれるコヒーレントな軟X線光源の利用を提案している。この光源は実験室ベースの小型の光源であり、将来的には汎用的な利用が可能になる。本研究では高次高調波を回転楕円ミラーにより集光し、その集光ビームの波面誤差の計測に成功した。波長は10nmレベルであり、1/10程度の波面誤差精度であったとしても1nmレベルの精度を有しており、今後の超精密形状計測への利用が期待できる。

研究成果の概要(英文)： In precise fabrication of products, the final accuracy is determined by the measurement method. As a method of evaluating surfaces of mirrors and lenses, various methods using light have been proposed and developed. Interferometry measures the surfaces by determining the phase information of the light. The measurement accuracy can be improved by shortening the wavelength.

In this study, we proposed the use of a high order harmonic generation (HHG) source to evaluate optical surfaces, because this light source is cost-effective and compact. In this study, we developed the phase retrieval method specialized for this source and succeeded in the wavefront measurement of a HHG beam focused by a precise mirror.

研究分野：超精密加工、X線光学

キーワード：精密計測 位相回復法

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高精度なミラー光学素子作製では、測定された形状データを元に形状誤差を修正するように加工が行われるため、形状計測の測定精度が形状精度を決定する。平面や球面などの単純な形状であれば 0.1nm(RMS) の精度での形状計測が可能である。しかし、近年、精力的な研究開発が行われている非球面、自由曲面の形状計測では、平面、球面と同レベルの精度での手法は確立されていない。

近年、光学素子の形状計測に SPring 8 などの放射光施設で発生するコヒーレントな EUV (Extreme Ultraviolet) 光や X 線の位相測定が応用されている。(Mimura et al, Phy. Rev. 2007) 波長が短い光を用いると、位相測定精度が悪くとも、距離に換算すると極めて高い測定精度になる。例えば、波長 10nm の光を用いて、 $\lambda/100$ レベルで位相計測を行った場合、距離に換算すると 0.1nm の精度に相当し、630nm の He Ne レーザを用いて $\lambda/6000$ で測定したこと同等である。しかし、コヒーレント光である必要があり実験は放射光施設に限られる。

2. 研究の目的

本研究では、高次高調波を利用した形状計測手法を提案する。フェムト秒高強度赤外レーザを Ne などの希ガス雰囲気中で集光することで、50 次以上の次数の周波数の光が発生し、波長は 10nm オーダの EUV 領域に達する。基本的には高調波なので完全なコヒーレント光である。更に、多波長の光を同時に発生しているため、分光器により、波長を選択することも可能である。

本研究により、大型の放射光でしかできなかった短波長光による光学素子評価を、実験室ベースでの EUV 光源を利用した光学素子の高精度形状計測手法に不可欠な波面誤差計測手法の確立を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、集光ミラーを対象とし形状誤差に起因する波面誤差の計測手法に集光点近傍の複数の強度分布を利用する位相回復法を用いる。本研究を実施するためには二つの準備が必要である。一つ目は集光光学系の構築である。光学系の構築は東京大学の高次高調波施設で行う。回転楕円ミラーを用いた集光光学系において高精度な集光強度測定システムを開発する。二つ目は、位相回復法による波面誤差プロファイルを求める手法の確立である。ここでは Angular spectrum method を用いた反復計算プログラムを採用している。

本研究では、以下の研究項目を実施した。

1. ミラーを利用した高次高調波集光システムの光学系の構築

東京大学の高次高調波発生施設において、回転楕円ミラーを用いた集光システムの光学系を構築し、高精度に集光強度プロファイルを計測可能とした。

2. 集光強度プロファイルを用いた位相回復アルゴリズムの開発

複数の集光強度プロファイルを利用した集光ビームの波面誤差プロファイルを求めるプログラムを開発した。

3. 高次高調波集光ビームの波面誤差計測

上記、1、2 を活用しミラーによる高次高調波の集光ビームの波面誤差の計測を試みた。

4. 研究の成果

4.1 ミラーを利用した高次高調波集光システムの光学系の構築

近年、量子光学や物理化学分野において、高次高調波による EUV 光源は汎用光源と認識されている。短パルス性を活かした化学反応観察やコヒーレンス特性を活かした顕微鏡の開発が行われている。本研究で使用する光源は、波長 800 nm のフェムト秒レーザをパルス幅 10 fs まで圧縮し、Ne ガス雰囲気中で集光することで、非線形光学現象により波長 10 nm までの EUV 光を発生させることが可能である。図 1 に本研究で提案する光学系を示す。Zr フィルターを通過させることで、赤外光とともに 20 nm 以下の波長の光が遮断されている。高次高調波は、コヒーレント光であるが強度は弱いため、集光することでサンプル地点での強度密度を向上させる必要がある。様々な波長の光を集光するために、色収差のない回転楕円ミラーによる集光システムが高次高調波では最適とされている。これまで多波長スペクトルの高次高調波を単色化せず 2 μ m サイズにまで集光することに成功している。

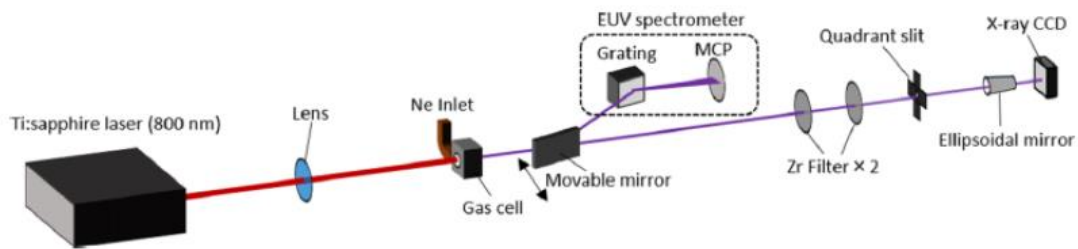


図1 高次高調波光学系

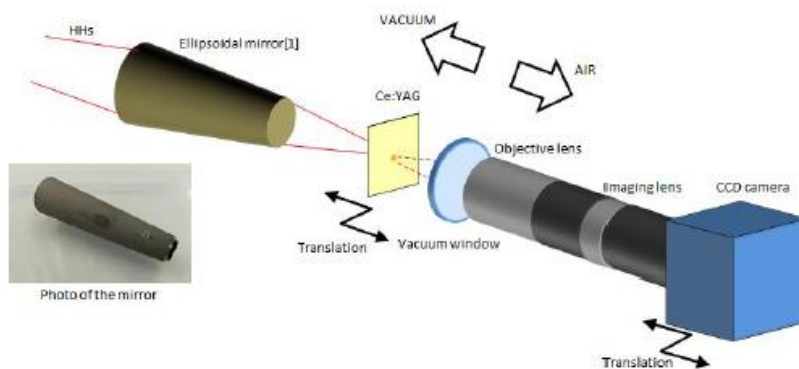


図2 高次数調波集光ビームの評価方法の概要

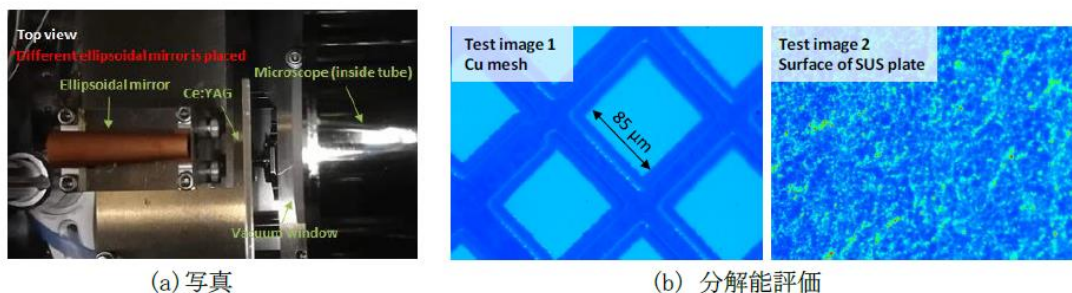


図3 高次高調波集光ビームの強度分布の計測システム

本予算において、図2に示す集光強度プロファイル計測システムを導入した。集光されたEUV光を直接CCDカメラにより測定することは不可能である。本システムでは、集光ビームをCe:Yag基板に照明する。Ce-Yag基板は、照明されると発光する。その発光強度は、EUV光の強度に比例するため、間接的に集光ビームの強度分布を測定することができる。発光波長は可視領域であるため、可視用のレンズやCCDカメラを使うことにより、500 nm程度の分解能で強度分布を測定できる。

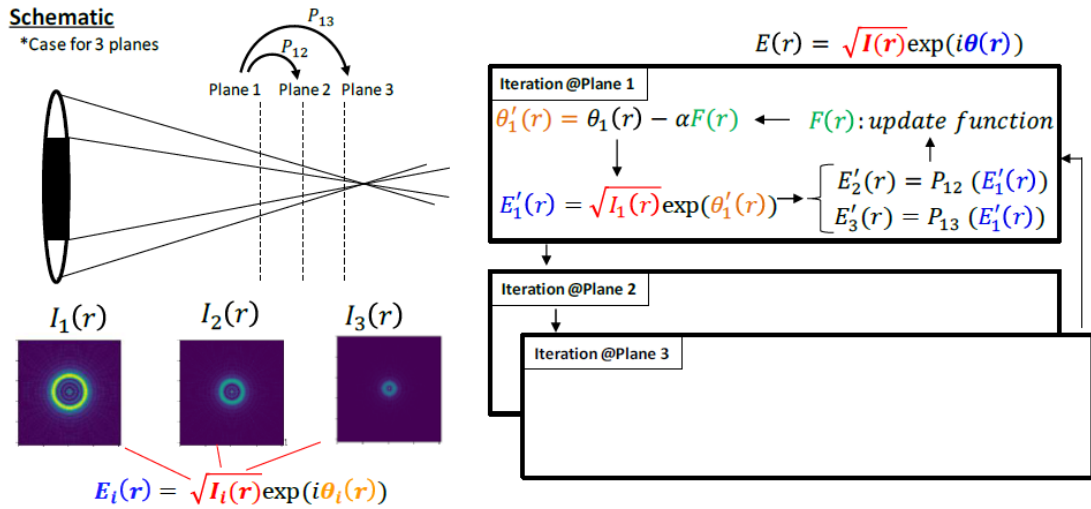


図4 焦点近傍の複数の強度プロファイルを用いた位相回復法

図3 に、2次元集光プロファイル評価システムの写真と測定分解能の評価のためのメッシュと SUS 表面の顕微鏡像を示す。本結果から、約 $1\mu\text{m}$ の横分解能での顕微計測が可能であることがわかる。本手法では、焦点はずれのデータを利用し、波面を回復するために、強度計測において高い分解能は不要であり $1\mu\text{m}$ の分解能で十分に波面誤差を求めることができる。

4.2 集光強度プロファイルを用いた位相回復アルゴリズムの開発

可干渉性の光は、強度と位相により表現される。強度は直接計測できるが、位相は直接計測できない。そのため干渉計など様々な方法により位相計測が行われてきた。本研究で採用するのは、実験光学系としては最も簡便な位相回復法による手法である。位相回復法は、進行する光の複数の強度情報のみから位相を回復する手法である。本研究では、位相回復法の中でも集光強度プロファイルの分布から位相を回復する手法を採用する。

図4に位相回復アルゴリズムの概要を示す。集光系において焦点面とレンズ瞳上の波動場は、Fraunhofer 近似により表現され、フーリエ変換、逆変換の関係となる。焦点近傍での波動場は Angular spectrum method を用いることで、波動場間を伝播、逆伝播させることができる。集光点近傍の各断面で測定した強度情報を固定化させ、位相分布の値を更新させると位相情報が回復する。

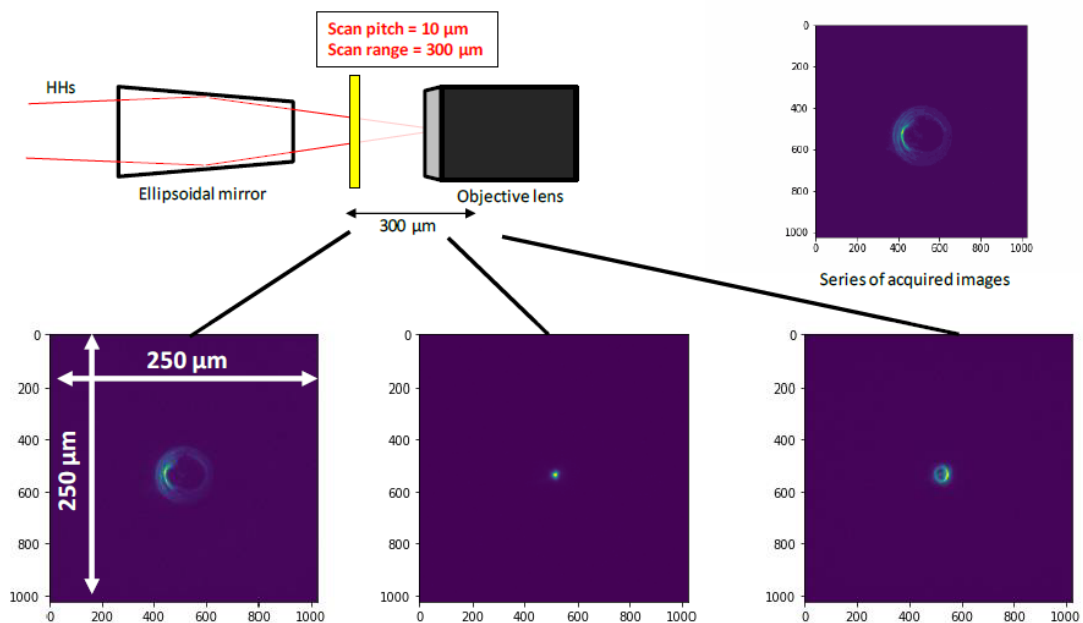


図5 高次高調波の回転楕円ミラーによる集光プロファイルの2次元強度分布

4.3. 高次高調波集光ビームの波面誤差計測

本研究では、図1～図3で示した光学系と光学システムを利用し、波長 20 nm の高次高調波を回転楕円ミラーにより集光し、集光されたビームの2次元強度プロファイルを測定した。図5に、その測定結果を示す。集光ビームの光軸方向にCe:Yag基板とカメラの両方を移動させることで、焦点近傍において複数の強度プロファイルを測定した。回転楕円ミラーによる集光ビームはリング状の強度分布であり、輪帯状のビームが集光されている状況が測定できた。集光点近傍においては、集光ビームの波面誤差により強度分布に偏りがあることがわかる。

この計測データを利用し、図4に示した位相回復計算を行った例を図6に示す。約30回程度の繰り返し計算により回復値が収束した。本回復したプロファイルから集光ビームにおいて激しい球面収差が存在していることがわかった。

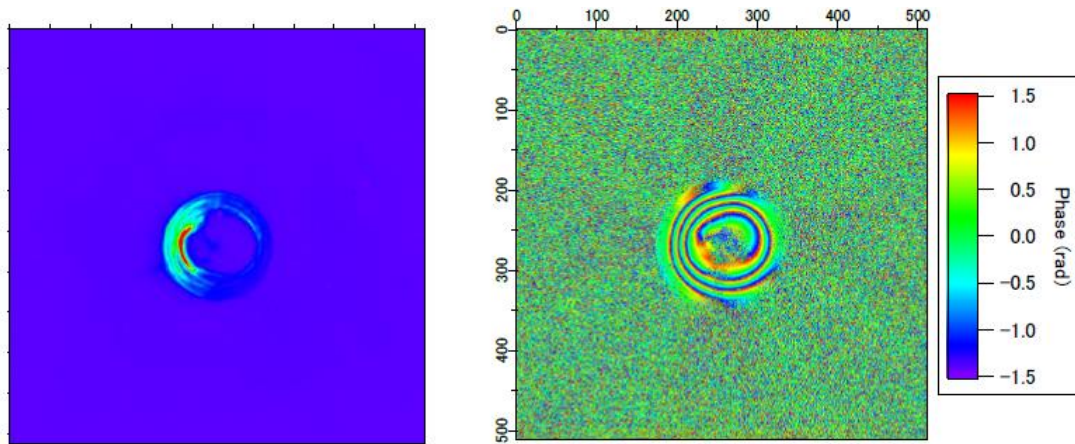


図6 位相回復計算により回復した集光ビームの波面プロファイル

5. 今後の展開

本研究では、既存の高次高調波施設において、簡便に2次元集光強度プロファイルの計測システムを構築するとともに、集光強度プロファイルから位相回復計算により集光ビームの波面誤差プロファイルを求めるプログラムを開発した。

今回は30nmの波長により集光ビームの評価およびミラーの形状評価に起因する波面誤差の計測を行ったが、形状誤差を求めるためには、本手法の測定精度、測定再現性を向上させる必要がある。今後、波長を変更し評価結果を比較することで測定結果の確からしさを評価する予定である。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Y. Takeo, A. Suzuki, H. Motoyama, Y. Takei, T. Kume, Y. Matsuzawa, Y. Senba, H. Kishimoto, H. Ohashi, and H. Mimura	4. 巻 116
2. 論文標題 Soft x-ray nanobeam formed by an ellipsoidal mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 121102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5144932	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3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hidekazu Mimura
2. 発表標題 Fabrication of precise ellipsoidal mirrors for soft x-ray nanofocusing,
3. 学会等名 International Workshop on X-ray Optics and Application (IWXM2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹尾陽子、鈴木明大、仙波康徳、岸本輝、大橋治彦、三村秀和
2. 発表標題 回転楕円ミラーによる高NA集光ビームを用いた軟X線タイコグラフィ計測
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 2019年

1. 発表者名 竹尾陽子、鈴木明大、仙波泰徳、岸本輝、大橋治彦、三村秀和
2. 発表標題 軟X線タイコグラフィを用いた回転楕円ミラーの形状評価
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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