

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目： 若手研究（スタートアップ）
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19860006
 研究課題名（和文） 縦配置薄膜ビームスプリッターによる軟X線適用可能な新型コモンパス干渉計の開発に関する研究
 研究課題名（英文） Development of a new type common path interferometer for soft X-ray using a grazing angle beam splitter of a free standing membrane
 研究代表者
 原田 哲男 (HARADA TETSUO)
 兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・助教
 研究者番号： 30451636

研究成果の概要：

低コヒーレンスな軟X線光源に適用可能な新型コモンパス干渉計を提案した。大きな特徴は斜入射ビームスプリッターを縦配置し、等倍共心光学系と組み合わせているため干渉縞生成が非常に容易になることである。シミュレーションより 0.1 mm と大きな光源でも縞生成が可能で、実験室光源への適用を示した。光学素子の移動精度も 10 nm 程度で縞生成可能である。また、可視光干渉計において干渉縞を生成し収差測定した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,310,000	0	1,310,000
2008 年度	1,310,000	393,000	1,703,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,620,000	393,000	3,013,000

研究分野：

工学

科研費の分科・細目：

応用物理学・工学基礎 薄膜・表面界面物性

キーワード：

①応用光学 ②干渉計測 ③超薄膜 ④X線 ⑤超精密計測

1. 研究開始当初の背景

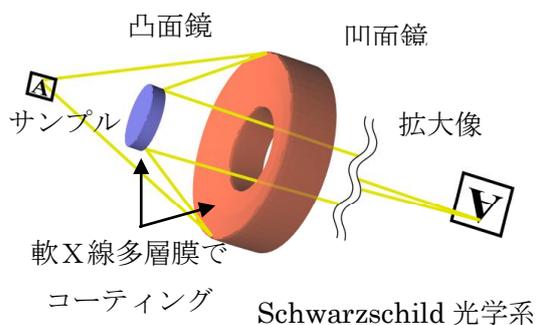


図 1. 軟X線 Schwarzschild 顕微鏡の概念図

細菌やウイルス、染色体などサブミクロンサイズの生体試料の観察手法として、可視顕微鏡はコントラストがつきにくく分解能が不足し、電子顕微鏡は染色や乾燥処理が必要で生きているままの姿を観察することができない。軟X線顕微鏡は測定波長が短く元素コントラストが得られるため、これらの生体試料を生きたままのかつ顕微像として観察可能な技術であり、待望されている。報告者の前所属グループである東北大において軟X線多層膜結像鏡と実験室軟X線光源を組み合わせた、実用的な軟X線顕微鏡が開発されている。一般に顕微鏡において高分解能を

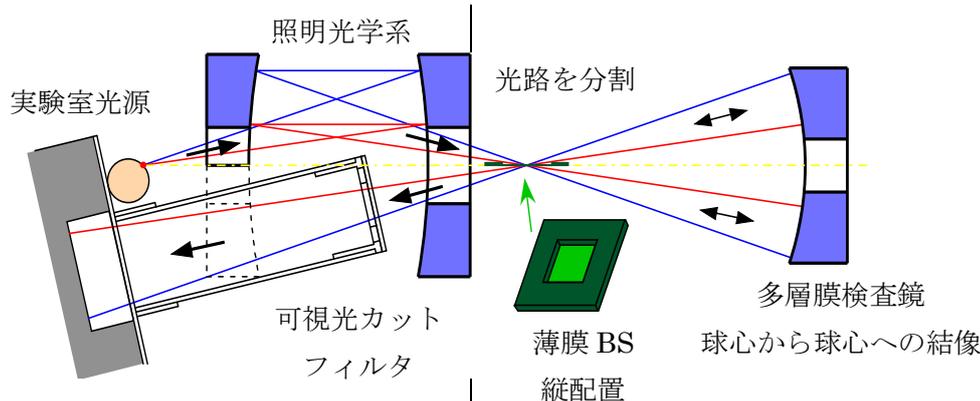


図2. 新型縦配置ビームスプリッターによる Reversal Shearing 干渉計

目指し回折限界結像を達成するには、干渉計により結像系の波面を測定し、波面を補正する技術が不可欠である。軟X線顕微鏡で用いる多層膜結像鏡の反射波面は、多層膜による位相効果があるため使用波長で測定する軟X線干渉計が必要となる。これまで光源に輝度の高い放射光を用いた軟X線干渉計は開発されている。しかし、波面補正技術と組み合わせるには時間的制約のない実験室光源による軟X線干渉計が不可欠である。

報告者はそれまで軟X線多層膜結像鏡の開発と、別タイプの軟X線干渉計開発に携わっていた。この干渉計の誤差要因を可視光実験や光線追跡シミュレーションによって見積もり、局所的な歪みの検出には適しているが非点収差やコマ収差など結像性能へ大きく影響する収差測定が原理的に難しいことを明らかにした。そこで、上図の Reversal Shearing 干渉計に分類される軟X線へ適用可能な新型コモンパス干渉計（軟X線 RS 干渉計）を考案した。

大きな特徴は低コヒーレンスな実験室光源対応のコモンパス光学系であり、波面分割用の光学素子に薄膜ビームスプリッター（薄膜 BS）の面が光軸に対して平行になるように“縦配置”している。薄膜 BS は窒化シリコン膜を用い、斜入射での反射と透過で波面分割を行う。その他の特徴を以下に記す。

1. 軟X線光源にレーザー生成プラズマ（LPP）を採用し、実験室規模で利用可能。
2. “縦配置”の薄膜 BS で分割された光路は、検査鏡球面の球心から球心への結像により薄膜 BS 上で再び合わさり、干渉縞を生成する。よって、直入射結像光学系であり、光学系収差由来の解析誤差が小さくなる。
3. 検査鏡波面同士が反転して干渉する Reversal Shearing 干渉計に分類され、結像性能に大きく影響を与える非点収差やコマ収差の測定が可能である。

多層膜結像鏡からなる軟X線顕微鏡で回折限界結像を実現するためには、結像鏡の波面を多層膜の位相効果を含め 0.1 nm 以下の精度で測定できる軟X線干渉計が不可欠である。本研究は、光量を犠牲にコヒーレンスを非常に高くして干渉させる放射光での軟X線干渉計とは異なり、低コヒーレンス光源でも波面計測可能な実用的な新型コモンパス干渉計を目指すことが他に例のない特色である。光学素子に制限が多い軟X線領域では、通常波面分割素子として自立多層薄膜 BS もしくは回折格子が使われる。

本干渉計は薄膜 BS を“縦配置”し斜入射で波面分割する全く新しく独創的なものである。また、球面鏡球心による等倍共心光学系と薄膜 BS による鏡像を利用しており、各光学素子の設置精度を大幅に緩和できる。

2. 研究の目的

本研究で軟X線 RS 干渉計の干渉縞生成要件、高精度波面解析方法、軟X線への適用要件を明らかにし、実際の軟X線光源を用いた開発段階に進みたい。これまで、明るい軟X線実験室光源であるレーザー生成プラズマ（LPP）を用い、結像鏡波面を反映した干渉縞生成例はない。軟X線 RS 干渉計を実現することで、細菌やウイルスの生態観察可能な実験室軟X線顕微鏡の実用化に大きく貢献すると期待できる。

3. 研究の方法

新型干渉計である軟X線 RS 干渉計の可視光プロトタイプを製作し、波面誤差計測の原理を検証するとともに軟X線への適用要件を明らかにする。具体的には以下に示す。

- (1) 縦配置で利用するビームスプリッターである窒化シリコンメンブレンの斜入射透過率と反射率を測定する。測定より計算したス

ループレットより斜入射ビームスプリッターとして利用可能な角度を明らかにする。

(2) 光線追跡シミュレーションを行い、干渉縞生成要件を明らかにする。また軟X線実験室光源を用いた場合の適用要件を定量的に評価する。特に空間コヒーレンスの影響を明らかにする。

(3) 可視光源と可視光学素子からなるプロトタイプを製作する。実際に干渉縞を生成し、軟X線 RS 干渉計の干渉縞特性を実験的に確かめる。

(4) シミュレーションと可視光プロトタイプで生成した干渉縞を用い、軟X線で波面誤差を測定可能な干渉縞解析法を開発する。

4. 研究成果

縦配置薄膜ビームスプリッターによる新型コモンパス干渉計の基本原理を確認した。具

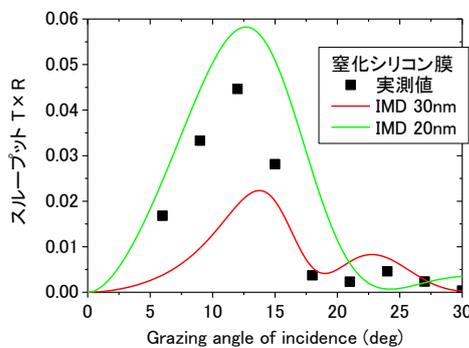


図3. 波長 13.5 nm での窒化シリコン膜のスルーショット実測結果

体的には以下に記す。

(1) Photon Factory にて厚さ 30 nm 窒化シリコン薄膜ビームスプリッターの斜入射透過率と反射率を評価した。測定結果を図3に示す。透過率と反射率を別々に測定しており、掛け合わせたスルーショットを図中に示している。波長 13.5 nm の軟X線での斜入射角 5 度～15 度の領域において、スルーショットが 2% 以上得られることが明らかになった。

(2) 光線追跡法による干渉縞シミュレーションソフトを開発し、干渉縞生成要件を検討した。干渉縞はビームスプリッター面と検査鏡球心位置関係にのみ依存することが明らかになった。ビームスプリッターは 2 次元平面であるため、検査鏡中心位置が面方向にずれるデフォーカス条件は干渉縞には影響を与えない。また光源位置にも依存しない。波長 13.5 nm においても 0.1 mm 程度と大きな光源でも実用的な干渉縞を生成可能であり、軟X線実験室光源へ適用できることを明ら

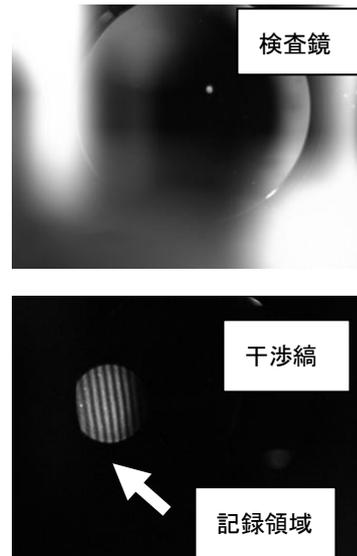


図4. 検査鏡と生成した干渉縞

カメラを同位置で測定したため縞の生成領域が検査鏡の測定領域となる

かにした。また、検査鏡形状で一番重要な低次収差項の非点収差は、縞解析に必要な X キャリアと直交する Y キャリアとして解析可能と分かった。ビームスプリッター位置は X キャリアに影響をあたえるが、Y キャリアには影響をあたえない。よって、Y キャリアの大きさは収差に相当する。また、干渉縞はビームスプリッター面の並進 300 nm に対して 10 本程度生成されるため、10 nm 程度の移動精度で干渉縞生成可能である。

(3) 光源に面発光 LED とピンホールを用いた新型干渉計のプロトタイプを製作した。市販の Al ミラー (φ 50 mm, R-100 mm) を検査鏡に用い、ビームスプリッターには軟X線でも使用する窒化シリコンメンブレンを用いた。窒化シリコンメンブレンの大きさはフレームサイズ 10 mm, ウィンドウサイズ 5 mm, フレーム厚さ 0.2 mm, メンブレン厚さ 30 nm である。市販のダブルレットタイププリレーンズによる照明では収差が大きく、厚さ 0.2 mm

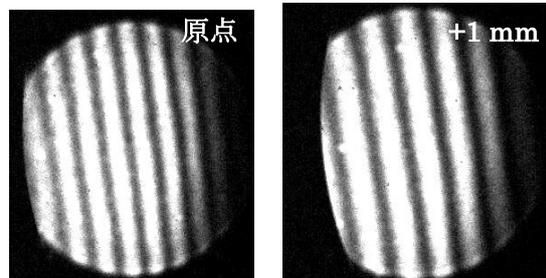


図5. 原点位置と検査鏡を光軸方向 1 mm 並進時の干渉縞画像

の窒化シリコンのフレームによってフーコー縞が生成した。そのため、より収差の少ない非球面レンズを用い、干渉縞生成領域をビームスプリッターの透過率で制限される全域に拡張できた。図4にカメラを固定して記録した検査鏡と干渉縞画像を示す。干渉縞が生成している領域が測定領域であり、おおよそ窒化シリコンビームスプリッターの使用可能領域となるように調整した。

検査鏡を光軸方向（デフォーカス方向）に移動させても、干渉縞本数には影響がなく、シミュレーションとの一致を確認できた。図5は光軸方向に1 mmと大きく検査鏡を並進前後の干渉縞である。並進による干渉縞への影響はみられず、光軸対称収差の影響を受けず容易に干渉縞生成が可能であることを実験的に確かめられた。また、光源サイズをφ0.1 mmからφ0.2 mmと変えた場合でも干渉縞コントラストの変化はなく、空間コヒーレンスの影響は見られなかった。

(4) 生成した干渉縞を CCD カメラで記録し、フーリエ変換法による縞解析によって位相情報を得た。RS 干渉計の測定に使用した検査鏡を ZYGO 干渉計で形状計測したところ面精度は $1/4\lambda$ で非点収差が主であった。この非点収差測定のため RS 干渉計において検査鏡を 45° ずつ回転させながら干渉縞を記録した。図5に CCD カメラで記録した干渉縞

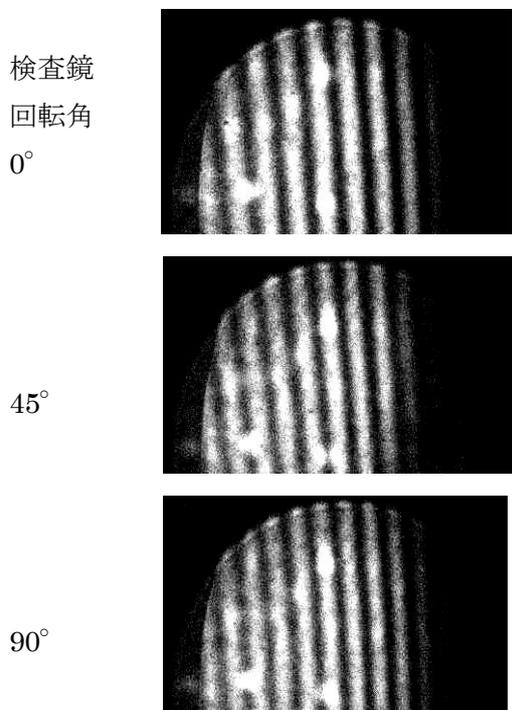


図5. 検査鏡を回転に伴う干渉縞変化

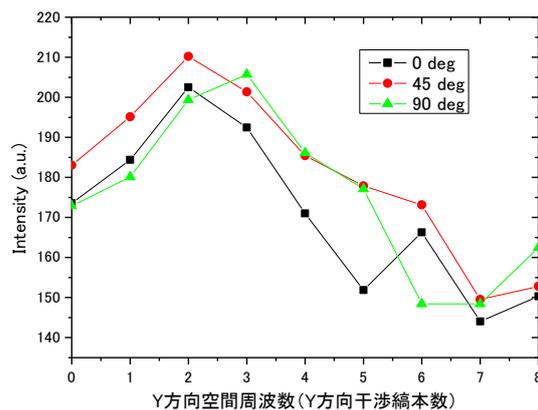


図7. 検査鏡回転角と Y 方向空間周波数変化

画像を示す。検査鏡回転角による Y キャリア変化は ZYGO で測定した非点収差の方向と一致しており、解析可能であった。検査鏡を回転させると検査鏡球心とビームスプリッター面の相対位置がホルダー精度の問題よりずれてしまう。そのため、検査鏡を回転させた後、ビームスプリッター面を並進させ干渉縞本数がある程度そろえてから CCD カメラで記録している。そのため回転角毎に X チルトが変化するため、干渉縞画像からは Y キャリアが判断しにくい。よって、干渉縞画像をフーリエ変換し Y キャリアを評価した。図7はフーリエ変換結果において Y 方向のみを取り出したグラフである。 0° と 45° では空間周波数はほぼ同じで、 90° で干渉縞 1 本分 (1λ) 程度シフトしている。よって、おおよそ 22.5° の方向に $1/4\lambda$ の非点収差があることがわかり、ZYGO の測定結果と方向と大きさが定性的に一致している。

本研究で軟 X 線 RS 干渉計の干渉縞生成要件を検討し、可視干渉計で凹面鏡の収差測定をした。結果、実験室光源へ適応可能な空間コヒーレンスと設置誤差許容量を持っていること、反転対称な収差測定が可能であることが明らかになった。今後は軟 X 線への適用することで、その干渉縞生成の容易さから結像鏡の収差測定だけでなく、薄膜の軟 X 線位相の直接測定にも応用が期待される。

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)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 原田 哲男, 新型軟 X 線用コモンパス干渉計の開発, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 平成 21 年 3 月 30 日, 筑波大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 哲男 (HARADA TETSUO)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・助教

研究者番号： 3 0 4 5 1 6 3 6

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者