光ファイバーを用いた点回折干渉計に関する研究（第2報）*

—コヒーレント長が測定精度に及ぼす影響—

格内 敏** 木下博雄*** 渡邊健夫*** 坂本 亨**

Point Diffraction Interference System Using a Single-mode Optical Fiber (2nd Report)
-On the Effect of the Coherence Length on the Measurement Accuracy-

Satoshi KAKUNAI, Hiroo KINOSHITA, Tatsuo WATANABE and Tohru SAKAMOTO

The technological innovation using the extreme ultraviolet wavelength (EUV) with high brightness of synchrotron radiation is actively advanced. In order to effectively utilize such light, it is important to develop the technology that produces and evaluates the optical elements with very high surface accuracy. The point diffraction interferometer is an interferometer that has inherent high accuracy using a circular aperture with a radius comparable to the wavelength of light. We are constructing a point diffraction interferometer as a profile measurement sensor, which can be also utilized for alignment of the EUV optical system. The optical system is consisted of single-mode optical fiber and fringe scanning using the laser source of visible light. But, the extra interference and diffraction waves are included for original interference fringe. In this report, the effect of the temporal coherence length of light source on the measurement accuracy was investigated by experiments and simulation analyses. As the result, when adjusting optical path difference of the object and reference waves the optimal, it was shown clearly that high accuracy measurement is possible. Furthermore, if a light source of the shorter coherence length is used, the alignment will become easy and its accuracy will also improve more.

Key words: point diffraction interferometer, optical fiber, fringe scanning, profile, coherence length, simulation

1. 緒 言

近年のリソグラフィ技術では、極端紫外線縮小露光(EUVL)を用いたパターン形成が試みられている^{1)~3)}。しかし、短い波長の光を用いた光学系では、従来の可視光に比べて2桁以上も精度の高い表面形状を持つ光学素子が必要であり、その計測評価技術には厳しい精度と条件が要求される。点回折干渉計(PDI: Point Diffraction Interferometer)は、ピンホールから出射する理想的な球面波を参照波面とする高精度な絶対測定の技術であり^{4)~7)}、この技術を EUVL へ応用する研究が精力的に進められている^{8)~15)}。

本研究では空間的に測定の自由度が高く、手軽でコンパクトな形状センサーとしての光ファイバーを用いた点回折干渉計を開発することを目指している¹⁶⁾。しかし、現在の光学システムでは光源の持つコヒーレント長に伴って、物体光と参照光による本来の干渉に対して、点光源から直接に CCD カメラに入射する球面波どうしの干渉や、カメラ内のレンズ汚れや回折光が測定精度を低下させる。本報告では、光源のコヒーレント長に伴う誤差要因が測定精度に及ぼす影響について、実験とシミュレーション解析を用いて考察した。その結果、コヒーレント長が短いレーザを使用し、干渉計の腕の長さを変化させて物体光と参照光の干渉間の距離（以後は光路差とする）を調整することによって、測定精度が向上できることを明らかにした。

2. 実 験

2.1 実験装置

図1に実験装置を示す。He-Ne レーザから出射した光は、偏光ビームスプリッタにより2つにわかれ、一方はピエゾ素子(PZT)に取り付けられたミラーで、他方は距離可変のミラーで反射した後に、対物レンズを通して光ファイバーに入射する。なお、1/2波長板は物体光と参照光の強度比を調整して干渉縞の鮮明度（ビジビリティ）を向上させる。ファイバー端面からは理想的な2つの球面波が出射するが、一方は被検物である凹面鏡への物体照明光に、他方は参照光として CCD カメラに直接

Fig.1 Schematic diagram of PDI using single-mode optical fiber

* 原稿受付 平成 16 年 9 月 3 日

** 正 会 員 兵庫県立大学大学院工学研究科（姫路市書写 2167）

*** 正 会 員 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所（兵庫県赤穂郡上郡町光都 3・1・2）

Fig.2 Profile error from spherical wave of a concave mirror caused by path length differences in an interferometer

に入射する。凹面鏡からの反射光（物体光）は、その形状誤差を含んでファイバー端面のクラッド部で集光した後、反射して CCD カメラに入射する。物体光は参照光と干渉することにより、凹面鏡の球面収差の位相差が $\lambda/2$ (λ : 使用光源の波長) ごとに等変位線の干渉縞が得られるが、干渉縞の間のデータは欠落している。この欠落部分を精度良く読み取るために、干渉縞画像を縞走査して、CCD 素子上で位相を検出して分解能を向上させる。縞走査では参照光路中の PZT でミラーを駆動し、位相を $\pi/2$ ずつ変化させながら強度変化 $I_i (i=1,2,3,4,5)$ を取り込み、Hariharan の式から各点の位相 ϕ を算出する¹⁷⁾。

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2(I_2 - I_4)}{(2I_3 - I_5 - I_1)} \right\} \quad (1)$$

なお、ビームスプリッターで分離した参照光と物体光の CCD カメラまでの距離を等しくすることにより、干渉縞のビジビリティが高まる。しかし、レーザの持つコヒーレント長のため、干渉縞には余分な干渉による誤差成分が含まれる。本研究では、光源のコヒーレント長によって生じる誤差要因が測定精度に及ぼす影響について考察した。実験では光路中の反射鏡 (Retroreflector) を移動して、干渉計の腕の長さを変化させて物体光と参照光に光路差を与えた。光源には He-Ne レーザ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) を用い、被測定物には曲率半径 400 mm、外径 20 mm、公称面精度 $\lambda/4$ の凹面鏡を用いた。使用した光ファイバーのコア径は $3.5 \mu\text{m}$ であり、ほぼ完全な球面波が発生していると考えられる¹⁸⁾¹⁹⁾。なお、実験装置はカバーで覆って除振台に設置し、外部からの振動、空気の流れ、温度変化の影響ができるだけ小さくなるようにした。

2.2 実験結果および考察

図 2 に干渉計の腕の長さを変化させ、物体光と参照光の光路を -300mm から 300mm まで変化して凹面鏡を測定した結果を示す。図の横軸は物体光と参照光の光路差で、縦軸は凹面鏡の理想球面に対する形状誤差の RMS 値を示す。RMS 値は光路差が 130 mm 近傍で 1.9nm、PV 値 29nm となり、その前後の光路差ではこれらの値は大きい。図 3 に、光路差 130mm の形状誤差を表す濃淡表示と、X,Y 軸上の断面形状を示す。形状誤差が断面表示では小刻みなノイズ成分を持つうねりとして現れている。光路差 130mm 近傍で測定精度の向上がみられるが、小刻みに変動する実験結果の原因について考える。図 4 に本干渉計におけるレーザの時間的コヒーレント長と干渉について示す。図 4 (a) の物体光と参照光による本来の干渉縞のほかに、図 4 (b),(c) に示す余分な干渉が考えられる。(b) はファイバー端面から

Fig.3 Optical path difference (OPD) map from the ideal spherical wave

Fig.4 Interference caused by several path length differences (a), (b) and (c) in the optical system

直接 CCD カメラに入射する物体照明光と参照光の干渉、(c) は参照光と物体光の両方が測定物体で反射し、共に収差を含んだ干渉である。さらに、これらにはカメラ内のレンズ汚れや回折光、および振動、空気の流れなどの誤差要因が重なる。図 2 の実験結果について、これらの誤差要因の影響を考察するためにシミュレーション解析を試みた。

3. シミュレーション解析

3.1 誤差要因のモデル化

シミュレーション解析においては、本干渉計における光路差と干渉縞のコヒーレンス (ビジビリティ) の関係を知ることが必要である。干渉計の腕の長さを変えて、物体光と参照光の光路差を変化させた図 2 の実験では、光路差 130mm 近傍で測定結果が向上した。これは、この近傍で本来の測定したい物体光と参照光の光路差が小さくなり、干渉縞のビジビリティが高くなったことが考えられる。なお、本干渉計では図 4 で考

Fig.5 Theoretical visibility for a He-Ne laser with two longitudinal modes

られるように余分な干渉がノイズ成分として、本来の干渉成分に含まれる。一方、干渉する2つの光波の強度が等しいとき、干渉縞のビジビリティはレーザ光が持つコヒーレンス曲線で表せる^{20)~22)}。ここでは、図2の測定結果に類似するような減衰曲線として、光軸方向のモードである縦モード(軸モードとも言う)2のレーザ光源のコヒーレンス曲線を選び、本干渉計におけるビジビリティを仮定した。なお、He-Neレーザ光源の公称値からはモード6程度のコヒーレンス曲線が考えられるが、図2の実験結果とかなり異なるために、ここでは縦モード2の次式の減衰曲線で近似した。

$$V = \left| \frac{\sin(2\pi\Delta L / 2L)}{2\sin(\pi\Delta L / 2L)} \right| \quad 2L = \frac{c}{\Delta f} \quad (2)$$

ここで、 ΔL は物体光と参照光との光路差、 L はレーザ装置の反射ミラー間の距離、 c は光速(m/s)、 Δf は縦モードの間隔である。計算にはHe-Neレーザ光源の公称値である $L=910\text{mm}$ ($\Delta f=165\text{MHz}$)を使用して、図5のコヒーレンス曲線を得た。本干渉計において、時間的コヒーレントの長い光源を用いた場合、物体光と参照光のみによる本来の干渉以外に、余分な光波どうしが干渉して誤差となる。そこで、本干渉計における誤差要因と凹面鏡形状のモデル化を行ない、図2の実験結果のシミュレーションによる考察を試みる。

本干渉計では、図4に示された種々の光路長を持つ干渉パターン、カメラ内の回折光、および振動・空気のゆらぎなどの誤差要因が本来の干渉縞に含まれる。これらの誤差要因の光路差とビジビリティとの関係を図6に示す。干渉パターン①は本来の物体光と参照光による干渉縞で、光路差が0mmに最大のビジビリティを持つコヒーレンス曲線で表す。干渉パターン②は図4(b)の球面波の干渉で、光路差が110mmのときに最小のビジビリティを持つ。このことは、本光学系では被検物の凹面鏡がファイバー開口端から400mm離れた位置に置かれ、この状態で干渉計の腕の長さをゼロに設定していることによる。なお、図4(c)の干渉パターンは、本来の干渉縞①を得るように調整した光学系では、その影響はごく小さくなる。図6の干渉パターン③はカメラ内の回折光によるもので、(i)カメラ内のレンズに付着したゴミによって起こる回折、(ii)カメラの絞りなどの開口端によって起こる回折等である。ただし、これらの回折光は光路差が変化しても同じように観測されることから、そのビジビリティは一定とし、その大きさは実験結果を参考にして決定した。

凹面鏡の形状は実験結果を基にモデル化を行った。図7に光路差130mmにおける凹面鏡の理想球面に対する形状誤差の断面を示す。図の横軸はカメラの画素位置を示す。断面の刻み

Fig.6 Visibility in the interferometer for several path length differences

Fig.7 Cross-sectional profile in Fig.3

Fig.8 Modeling of cross-sectional profile:
(a) Profile after low path filtering and (b) Modeled profile

Fig.9 Modeling of noises (a) Profile deviation caused by interference of two spherical waves and (b) Modeled profile deviation

なノイズ成分を取り除くために、フィルタ処理を行なった後の断面形状を図8(a)に、さらに、この形状をサイン波で仮定したモデルを図8(b)に示す。一方、図4(b)の球面波による干渉とカ

Fig.10 Intensity distribution of a concave mirror with noises (Path length difference = 150mm)

Fig.11 Simulation results of profile error of a concave mirror caused by path length differences

メラ内の回折光による誤差のモデル化のために、被検物の凹面鏡を隠して球面波の直接光どうしを干渉させる実験を行った。図 9(a)に実験結果の断面を示すが、不規則なノイズ成分が現れる。図の左端は変動が小さいことより、球面波の干渉に振動・空気のゆらぎなどの誤差要素が重なった成分とし、図の右は左の球面波の成分にレンズ内の回折光が加わったノイズ成分とした。図 9(b)は、(a)の右側の回折光によるノイズ成分をランダム関数で仮定したモデルを示す。このようにモデル化した凹面鏡の形状誤差とノイズ成分について、図 6 の光路差とビジビリティの関係から強度分布をそれぞれ算出し、これらを加算して凹面鏡の測定における強度分布を求めた。図 10 に光路差 150mm での強度分布の算出例を示す。この強度分布をコンピュータ上で縞走査し、各素子位置で 5 個の強度変化を求めて Hariharan の式に代入して位相 (球面からの形状誤差) を算出した。

3.2 結果と考察

図 11 に物体光と参照光の光路長を 300mm から 300mm まで変化させ凹面鏡の形状誤差を算出した結果を示す。この結果は図 2 の実験結果と定性的に良く一致した。図 12(a),(b)に光路差が 0mm と 100mm における断面形状を示す。光路差 100mm では、図 8(b)で仮定した凹面鏡の形状誤差のサイン波が判別できるが、光路差 0mm では形状がノイズに埋もれる。なお、実験とシミュレーション解析では最小の RMS 値を取る光路差が異なった。この結果の相違に及ぼす反射ミラー間距離の公称値の影響について考察する。いま、ミラー取付け等による長さの誤差を約 5% と仮定したとき、同様なシミュレーションによる解析結果を図 13 に示す。図より、RMS 値の最小値は 150mm 近傍になった。使用レーザ光源のミラー間距離と公称値との差が、実際にはこの設定値より小さいと考えると、最小値はより実験値の 130mm に近づく。したがって、実験の測定精度を向上するには、図 1 の距離可変の反射鏡を調整して実験を繰り返し、最適な光路差の実験条件を見つけることが重要である。

Fig.12 Cross-sectional profile by simulation analysis:
(a) Path length difference $\Delta l = 0\text{mm}$
(b) Path length difference $\Delta l = 100\text{mm}$

Fig.13 Simulation results of profile error of a concave mirror after compensation of the distances between mirrors

Fig.14 Theoretical visibility for a Ar^+ laser with two longitudinal modes

Fig.15 Simulation results of profile error of a concave mirror in an interferometer using Ar^+ laser

一方、レーザのコヒーレント長を短くすれば、測定精度が向上できる。例えば、レーザ装置内の反射ミラー間の距離 $L = 100\text{mm}$ を持つアルゴンイオンレーザを考えた場合、図 14 に示すようなコヒーレンス曲線となり、光路差と RMS 値の結果は図 15 となる。図 13 に比べて、比較的長い光路差の範囲で測定精度の維持が可能となる。光路差 0mm, 100mm における断面形状を図 16(a),(b)に示す。光路差 0mm では凹面鏡の形状誤差であ

Fig.16 Cross-sectional profile by simulation analysis

(a) Path length difference $\Delta l = 0$ mm(b) Path length difference $\Delta l = 100$ mm

るサイン波の形状が保存され、図12(b)と比較してノイズ成分が小さい。一般にコヒーレント長の短い高出力のレーザ光は、出力と波長が不安定になることが多いが、性能の優れたレーザ光源を使用すれば、精度の向上が期待できるものと思われる。

4. 結 言

光ファイバーを用いた点回折干渉計を構築して凹面鏡の測定を行った。このとき、光源のコヒーレント長に伴う誤差要因について、実験とシミュレーション解析を用いて検討した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 本光学システムでは、凹面鏡の理想球面に対する形状誤差が小刻みなノイズ成分を持つうねり成分として観察される。
- (2) 光学系における物体光と参照光との光路差を調節することにより、測定精度を向上することが可能である。
- (3) 主な誤差要因には、ファイバー端面から直接 CCD カメラに入射する物体照明光と参照光に重なる振動、空気の流れ、およびカメラ内の回折光が考えられる。
- (4) コヒーレント長が比較的短いレーザを用いれば、光路差の調整も容易になり、誤差要因の影響が小さい。

本研究を遂行するにあたり、兵庫県立大学の数井直樹君、森田雅行君の助力を得た。また、本研究は CREST「高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」から助成金を受けていることを記し、併せて謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) C.W.Gwyn, et al: Extreme ultraviolet lithography, EUVLLC, Livermore, California, (1998).
- 2) 木下博雄, 渡邊健夫, 浜本和弘: 極紫外リソグラフィ, 光学, **31**, (2002) 524.

- 3) D.Sweeny, R.Hudyma, N.Chapman and D.Shafer: EUV optic design for a 100nm CD imaging system, Proc. SPIE, 3331, (1998) 2.
- 4) W.Linnik: Simple interferometer to test optical systems, Comptes Rendus de l'Academie des Sciences d'U.R.S.S., **1**, (1933) 208.
- 5) R.Smartt and J.Strong: Point-diffraction interferometer, J.Opt. Soc. Am., **62** (1972) 737.
- 6) R.N.Smartt and W.H.Steel: Theory and application of point-diffraction interferometers, Japan J. Appl. Phys., **14**, (1975) 351.
- 7) R.Smart and H.Steel: Point diffraction interferometer, Appl. Opt., **24** (1985) 1402.
- 8) D.Attwood, G.Sommargren, et al: Undulator radiation for at-wavelength interferometry of optics for extreme -ultraviolet lithography, Appl. Opt., **32** (1993) 7022.
- 9) K.A. Goldberg, R.Beguiristain et al: Point diffraction interferometry at EUV wavelengths, OSA Proc. on extreme ultraviolet lithography, **23** (1994) 134.
- 10) G.E.Sommargren: Phase shifting diffraction interferometry for measuring extreme ultraviolet optics, OSA, **4** (1996) 108.
- 11) H.Medeki, E.Teijnil, K.A.Goldberg and J.Bokor: Phase-shifting point diffraction interferometer, Optics Letters, **21**, (1996) 1526.
- 12) E.Teijnil, K.Goldberg et al: At-wavelength interferometry for extreme ultraviolet lithography, J.Vac. Sci. Technol., **B15**, (1997) 2455.
- 13) G.E.Sommargren, D.W.Phillion and E.W.Campbell: Sub-nanometer interferometry for aspheric mirror fabrication, Proc. Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, Tokyo, (1999) 329.
- 14) P.P.Naulleau, et al: Extreme ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer, Appl. Opt., **38**, (1999) 7252.
- 15) K.Otaki, F.Bonneau and Y.Ichihara: Absolute measurement of spherical surface by point diffraction interferometer, SPIE, 3740, (1999) 602.
- 16) 格内 敏, 木下博雄, 渡邊健夫, 坂本 亨: 光ファイバーを用いた点回折干渉計に関する研究, 精密工学会誌, **69**, (2003) 1170.
- 17) P.Hariharan, B.F.Oreb and T.Eiju: Digital phase shifting interferometry: a simple error-compensating phase calculation algorithm, Appl. Opt., **26**, (1987) 2504.
- 18) G.E.Sommargren: Phase shifting diffraction interferometry for measuring extreme ultraviolet optics, OSA, **4** (1996) 108.
- 19) Y.Oshikane, K.Ikeda, T.Kataoka, K.Endo and H.Inoue: Development of phase-shifting point diffraction interferometry method with fiber point sources, Proc. Precision Science and Technology for Perfect Surfaces, Tokyo, (1999) 336.
- 20) P.Hariharan, Basic of Interferometry, Academic Press, Inc. (1992) 45.
- 21) Principles of Optics, M.Born and E.Wolf, (草川徹, 横田 英嗣 訳), 東海大学出版会, (1999) 499.
- 22) J.W.Foreman, Jr.: Optical path-length difference effects in photomixing with multimode gas laser radiation, Appl. Opt., **6** (1967) 821.