

軟 X 線干渉法による EUV 投影光学系の波面計測

新部正人 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3-1-2

要旨 次世代の半導体パタン露光技術の候補である極端紫外線リソグラフィ（EUVL）法の開発においては、投影光学系の波面収差を0.1 nmの精度で計測する必要がある。この目的を達成するため、我々は簡単な部品交換で多種類の軟 X 線干渉計測ができる実験干渉計を開発し、ニュースバル放射光施設に設置した。行った計測は点回折干渉（PDI）法とシアリング干渉（LSI）法に大別され、波長13.5 nmの実露光波長を用いて、Schwarzschild型テスト光学系の波面収差を評価した。測定精度を検証するため、光学系鏡筒を光軸まわりに90°または120°回転した測定を繰り返して行い、本計測における計測誤差を見積もった。その結果、PDI法では測定再現性0.048 nmRMS、システム誤差0.066 nmRMSという高精度の計測技術を実現できた。

1. はじめに

次世代半導体パタン露光技術の候補として極端紫外線リソグラフィ（EUVL）法が注目され、これに用いられる光源、光学系、マスク、レジストなどの技術開発が活発に行われている¹⁾。この技術は波長 $\lambda = 13.5$ nmで高い直入射反射率をもつMo/Si多層膜ミラーを複数枚用いた光学系で、反射型マスクのパタンをシリコンウエハ上に縮小転写し、半導体回路の微細加工を行うものである。EUVL装置に用いられる縮小投影光学系は、非常に高精度に加工および組み立てする必要があり、例えば32 nm線幅のパタンを転写するための光学系としては、0.45 nmRMS以下の波面収差が要求される²⁾。しかし、従来の可視光を用いた干渉計測法（例えば、フィゾー干渉計）は、参照面の加工精度が $\lambda/100$ ($\lambda = 633$ nm)程度しかなく、EUVL用ミラーの評価や光学鏡筒のアライメントにそのまま用いることはできない。また、用いられるミラーには多層膜反射に起因する、入射角に依存した反射波面の位相変化が生じるので、可視光と極端紫外線（EUV）で測定した波面は、厳密には一致しない。したがって、実際の露光波長を用いて波面を計測・評価することが必須であり、その測定精度は0.1 nmRMSが必要である。

この高精度計測を実現するため、実際の露光に使う波長の光を用いて、また精密加工された参照面を使わないで行う干渉計測法が提案され、1996年頃から米国ローレンスバークレイ研究所を中心に、技術開発が進められてきた。この参照面を使わない実波長（at-wavelength）干渉計測法として、点回折干渉（PDI, Point Diffraction Interferometer）法やシアリング干渉（LSI, Lateral Shearing Interferometer）法が知られている^{3,4)}。残念ながら、日本では露光法の選択に関する戦略的な理由から、この種の計測技

術の開発が始まったのは2000年頃からとなった⁵⁾。

我々はこれらの先行技術の欠点をカバーするいくつかの新しい干渉方式を提案した⁶⁾。そして先行技術を検証するとともに、これらの新しい干渉法の実用性を検討するため、簡単な部品交換で多種類の干渉計測を行える実験干渉計（EEI）を開発した。これらの干渉計実験を行うには、高輝度で、干渉性が高く、安定に動作するEUV光源が必要である。このため兵庫県立大学のニュースバル放射光実験施設において、長尺アンジュレータ光源ビームラインBL9⁷⁾にEEIを設置した。本研究では、上記の各種干渉方式を先行技術と比較しながら、最適な波面測定方式を開発することを目的とした。

本稿では、はじめにEEI装置で行った各種の干渉計測法についてその概要を紹介し、次に特に良好な結果が得られたPDI法と直交回折格子シアリング干渉（CGLSI）法について少し詳しく述べ、最後に測定精度を検証するための鏡筒回転計測についてその結果を紹介し、種々のEUV投影光学系を評価するための手法について考察する。

なお、本研究は経済産業省の基盤技術研究促進事業の一テーマとして、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）の委託を受け、技術研究組合極端紫外線露光システム開発機構（EUVA）の20名近いメンバーと兵庫県立大学、電気通信大学などが関わって進められたものであるが、今回はこれらの研究に基づいて筆者が技術開発の概要をまとめ、「放射光」の読者に紹介する。

2. 実験用干渉計システム（EEI）

EUV光の干渉計では、用いる光のコヒーレント長が長くないため、通常、コモンパス型の干渉計配置を用いなければならない。また、参照面を用いない干渉計としては、

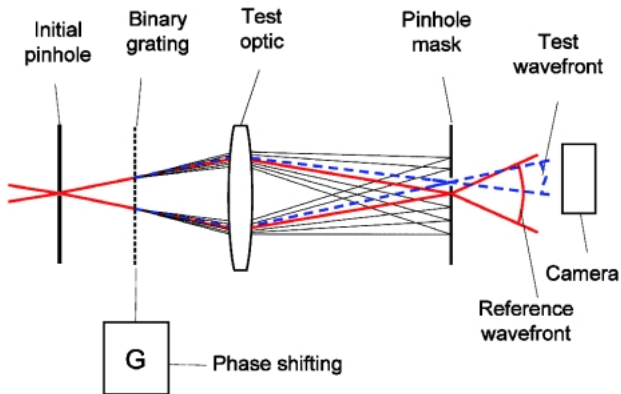


Fig. 1 Schematic diagram of the phase-shift point-diffraction interferometer (PS-PDI) for the EUV region.

ピンホールを用いて参照球面波を生成する PDI 方式の干渉計と、テスト光学系の波面同士をわずかにずらして干渉させ、微分波面を得るシアリング (LSI) 方式の干渉計の、主に 2 種類しか解がない。ここでは、まず本干渉計測法の基本形である PDI 法と LSI 法を中心に、装置、実験法等について述べる。

2.1 PDI 法

PDI 法の原理は、微小ピンホールに光を透過させると、ピンホールが空間周波数フィルターとして働き、ピンホール射出光が高次の空間周波数成分を含まない理想的な球面波となる性質を利用するものである。光の波長を λ 、テスト光学系の開口数を NA としたとき、ピンホール径は λ/NA 程度以下の大きさのものを用いる。ピンホールからの球面波を参照波面に用いることにより、精密加工した参照面を用いなくて、高精度の干渉測定ができる。

Fig. 1 に PDI 装置の概念図を示す。はじめに入射側ピンホールで整形した球面波を透過型回折格子 (G) を通して、テスト光学系に導く。G はビームスプリッターとしての役割を持ち、各回折光はテスト光学系を通ったのち、光学系の像側焦点面上のわずかに離れた別々の点に集光する。焦点面上には第 2 のピンホール ($\sim 50 \text{ nm}\phi$) と 1 次光選択窓 ($1.5 \mu\text{m}$ 口) を開けたピンホールマスクが置かれている。回折光のうち、0 次光は第 2 ピンホールを透過すると、再び理想的な球面波となる。一方 1 次光はテスト光学系による波面収差を保ったまま窓を透過する。これらの透過光は CCD カメラ面上で干渉縞を形成し、これを解析することにより、テスト光学系の波面収差を知ることができる。また、G を微小に動かすことにより、0 次光—1 次光間の位相を変化させる位相シフト (PS) 法により、データを取得している。

本研究ではこれらのピンホールをスリットに代えることにより、光量不足や暗い光学系にも対処できる線回折干渉法 (LDI, Line Diffraction Interferometer) を提案した⁶⁾。

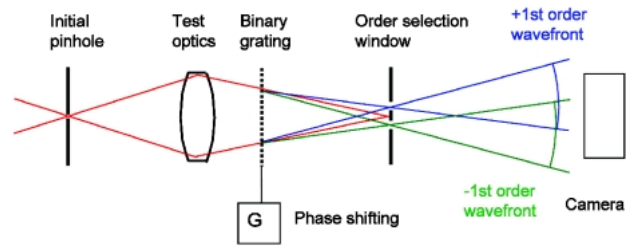


Fig. 2 Schematic diagram of the phase-shift lateral-shearing interferometer (PS-LSI) for the EUV region.

2.2 LSI 法

シアリング干渉法では Fig. 2 に示すように、まず入射ピンホールで入射光の波面を球面波に整形し、テスト光学系に入射する。テスト光学系の下流に透過型回折格子を置き、テスト光学系を通った光を複数の回折光に分離する。さらに光学系の像側焦点に 2 つの窓を持つ回折次数選択マスクを配置し、回折光のうち、 ± 1 次光のみを選択透過させて、これらの光を CCD 面上で干渉させる。干渉縞から得られる波面は、自分自身の波面をずらして干渉させた微分波面である。

この基本型に対して、本研究ではピンホールの代わりにスリットを用いるスリット型 LSI 法 (SLSI) を提案した⁶⁾。また、2 枚の回折格子をテスト光学系の共役像位置に配置し、単色干渉縞の得られるダブル回折格子型 LSI 法 (DLSI) を提案した^{6,8)}。さらに従来ローレンスバークレイ研究所で開発されたシアリング法が直交回折格子を用いた LSI 法であったのに対し、この方法にさらに次数選択窓を配置して測定精度を高めた、独自の直交回折格子 LSI 法 (CGLSI) を提案した⁹⁾。

本干渉計では軟 X 線のビームスプリッターとして透過型の回折格子を利用したが、光路長に関する理論的解析の結果、この回折格子が干渉計測に必要な光源の波長バンド幅に関する制限を大幅に緩和することに寄与していることがわかった。詳細は文献^{10,11)}を参照して頂きたいが、例えば PDI 法においては、回折格子と CCD 面までの 0 次光と 1 次光の光路長差 (OPD) を ΔL 、波長を λ とすると、 $\Delta L/\lambda = \text{const.}$ という関係が成立する。このため CCD 面上の 1 点では広い波長範囲にわたって同一位相の関係が実現し、干渉縞のコントラストは 40 波長分離れた OPD の回折光同士の干渉に至るまで、ほぼ一定となり、劣化が起こらない。このことより、使用する光源のバンド幅は著しく狭帯域化する必要はなく、アンジュレータの 1 次光を照明用の Mo/Si 多層膜ミラーで粗く分光する程度で、瞳の周辺まで十分なコントラストが得られた。さらに、狭帯域化する必要がなかったため、長尺アンジュレータの光を有効に利用でき、1 枚の干渉縞像を 1 秒以下の露光時間で撮影できた。

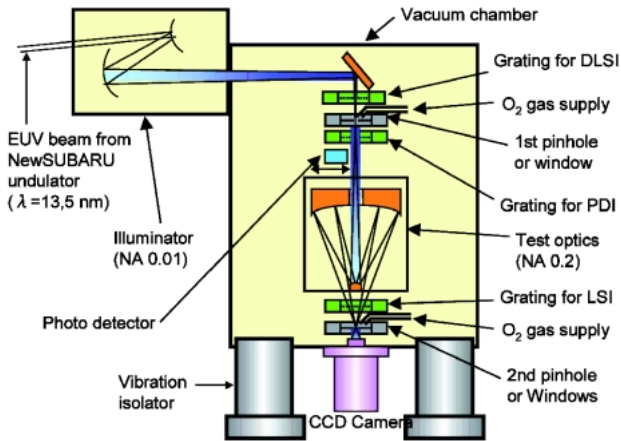


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental EUV interferometer (EEI).

2.3 EUV 実験干渉計 (EEI)

ニュースバルに設置された EEI 装置の模式図を Fig. 3 に示す。EEI は上記の各種方式の干渉実験が簡単な部品の交換で実現できる構成となっている。光源はニュースバル放射光施設の長尺アンジュレータ（全長10.8 m, 200周期, 1次光中心波長：13.5 nm@35 mm gap, 1.0 GeV）である。ビームラインの照明は全ての方式に対応できるように最適化した。波面測定用のテスト光学系は NA = 0.2, 倍率1/20の Schwarzschild 光学系で, 2枚のミラーは Mo/Si 多層反射膜がコートされている。このテスト光学系は別に開発された可視光の PDI 装置により¹²⁾, 本測定に見合う波面精度 (1.06 nmRMS) まで組立調整し, EEI 装置に搭載した。テスト光学系の物体側および像側焦点近傍には, ピンホールマスクや回折格子を挿入するためのステージ類があり, 干渉計の種類に応じて種々のセットアップができる。

本研究では光学部品の製作も大きな課題であった。まず, ピンホール形状を最適化する必要がある。このため種々の膜厚とピンホールサイズについて, 基板を透過して迷光となってしまう成分も含めた電磁場解析を行い, 厚さ 200 nm の Ta マスクのピンホール径として 50 nmφ, 厚さ 150 nm の Ni マスクのピンホール径として 30–45 nmφ 付近が最適値であることがわかった¹³⁾。

次に PDI, LDI では厚さ 200 nm 程度の自立薄膜 (Ni, Ta) に数 10 nm 径の超微細なピンホールあるいはスリットを加工する必要がある。本研究では EB 描画のリフトオフ法, 収束イオンビーム (FIB) 装置による直接加工法等を検討し, 最終的に厚さ 150 nm の Ni 自立膜に直径 30–100 nm までのピンホールを開けたマスクを入手して実験に用いた¹⁴⁾。

マスクの窓の形状は当初, 先行技術で使われた正方形の窓のものを用いたが, PDI 法などで 0 次光のフレアが窓を透過して誤差が発生することを防ぐため, 最終的には直

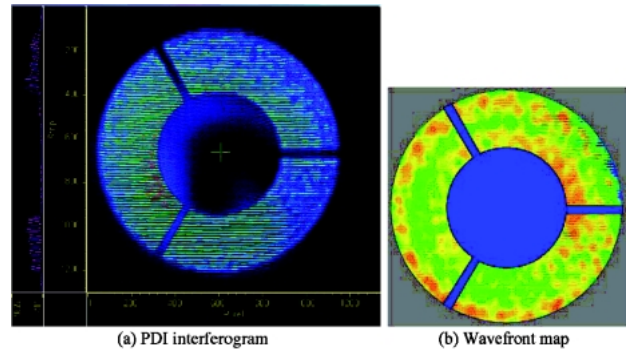


Fig. 4 Interference fringes and wavefront map of the Schwarzschild test optics obtained by the PDI method. (a) PDI interferogram, (b) Wavefront map.

径 1 μm の円形窓のものを用いた。

EUV 光を用いた干渉実験に当たっては, コンタミネーションによるピンホール閉塞が問題になった。ピンホールに付着した成分を分析し, ピンホールが炭素を主成分とする薄膜の堆積により閉塞していることがわかった。干渉計内への酸素ガスの導入や, ピンホール材質についても検討し, 遮光性に優れる Ni が Au や Ta と比べて, 低い閉塞レートを持つことを見出した¹⁵⁾。

3. PDI 実験の結果と解析

PDI 法で 100 nmφ のピンホールを用いて取得した干渉縞の一例を Fig. 4(a) に示す。この場合, 干渉縞のコントラストは十分であり, 波面を計算することができる。実際の計算には 90° ずつ位相変化させた 9 個の干渉縞画像から, 各点の位相を求める 9 パケット法のアルゴリズムを用いた。Fig. 4(b) は解析した波面マップである。テスト光学系の組立調整時に取得した可視光 (λ = 633 nm) PDI による計測波面と EEI による計測波面を比較すると, 可視光では 1.06 nmRMS, EUV 光では 1.12 nmRMS の 2 乗平均偏差が得られ, 形状も良く類似していることがわかった¹⁴⁾。ただし, この測定ではピンホール径が大きすぎるため, おもに低次の非点収差成分がピンホールを透過し, 計測に誤差を与えていると判断された。

ピンホール径を 50 nm 程度まで小さくすると, 干渉縞のコントラストが劣化して, 波面解析が困難となってくる。これはピンホールを通る 0 次光の光量が減少するとともに, 0 次光のフレア成分が 1 次光選択窓を透過して, テスト光学系の 1 次光あるいは 0 次光同士で干渉する割合が相対的に増えるためである。ここでフレアとは, 研磨加工したミラー表面に残っている波長 1 μm ~ 1 mm 程度の中間周波数粗さにより, EUV 光が散乱し, 焦点のまわりに広がった成分である。

この問題を解決するため, 得られた干渉縞に対して 2 次元のフーリエ変換 (FT) を行う方法¹⁶⁾を用いた。Fig. 5

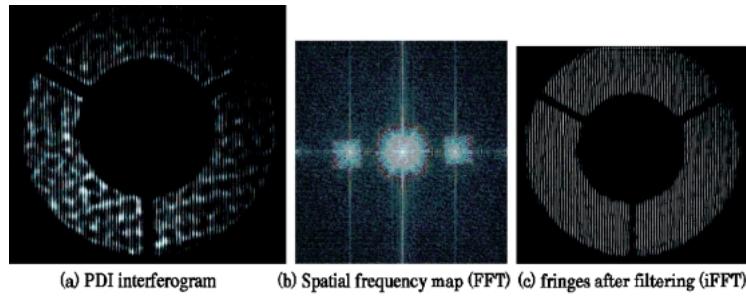


Fig. 5 Interferogram, spatial frequency map, and fringes after the filtering of the Schwarzschild test optics obtained by 2D FFT method. (a) PDI interferogram, (b) Spatial frequency map (FFT), (c) fringes after filtering (iFFT).

(a)に示すような干渉縞に対して FT を行うと、Fig. 5 (b)に示すような空間周波数領域でのマップが得られる。このうち中心のスポットは窓を通った 1 次光と 0 次光のフレア同士が干渉したもので、ノイズ (DC) 成分となる。一方その左右のスポットは、窓とピンホールを通った光同士の干渉で、この中にはテスト光と参照光の干渉のほか、参照光と自分自身のフレア光の干渉が含まれる。しかし、後者はさらに位相シフト法を用いて除去できる。空間周波数領域の右側にあるスポットの領域のみを選択し、これをさらに逆 FT すると、Fig. 5 (c)に示すようなノイズが除去された、コントラストの高い干渉縞が得られる。

この方法を用いて波面解析が困難であったコントラストの低い干渉縞から波面回復ができるようになった。解析した波面に対しては、Zernike 多項式¹⁷⁾による最小 2 乗フィッティングを行い、第 36 項までの Zernike 係数を得た。ここでは通常用いられる Fringe Zernike 多項式を用いると、Z9, Z16, Z25, Z36 などの球面項係数の再現性が悪いことがわかった。これは、テスト光学系の瞳形状が円形ではなく輪体状であるため、球面項のフィッティングに誤差を生じやすいためと考えられた。そこで本光学系の解析では、輪体形状を解析するのに適した Annular Zernike 多項式¹⁶⁾を用いて解析し、上記各項の再現性を顕著に改善することができた。

4. CGLSI 法

2000 年以降、我々は EUV 光学系の波面を計測する干渉計測法として PDI 法を中心に研究してきた^{19,20)}、そこで明らかになったこととして、PDI 法は補足可能収差の範囲が狭く、評価に供するテスト光学系は、もともとかなり高い精度で加工およびアライメントをしておく必要がある、ということが分かった。従って、PDI 法は測定精度は高いが、収差やフレアの大きな光学系の計測・修正には、はじめから使うのは適当でない場合がある。そこで、もっと補足収差の大きいシアリング干渉による計測法を検討した。

我々はこれまでシアリング干渉法として、前記した LSI

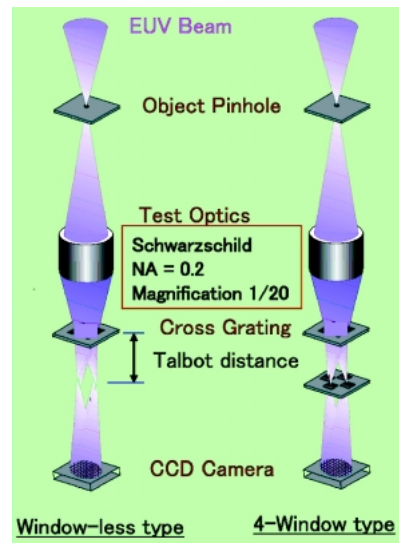


Fig. 6 Schematic diagram of the two types of cross-grating lateral-shearing interferometer (CGLSI), window-less type and four-window type.

法、SLSI 法、DLSI 法など、各種の方法を試みてきたが、これらの方法はいずれも光軸に垂直な面内の X または Y の一方向に波面をずらせた計測法であるため、回折格子やスリットの入れ替えによる位置ずれによって、特に非点収差の計測に誤差を生じやすいことが分かった。各方法の比較は紙面の都合で省略するので、別の報告文献²¹⁾を参照されたい。ここでは特に、2 次元の直交回折格子を用い、X、Y 両方のシア波面を同一の回折格子で取得できる CGLSI 法による干渉計測について述べる。

4.1 CGLSI 法の実験

Fig. 6 に CGLSI 干渉計の模式図を示す。物点側ピンホールを通して歪みのない球面波に整形された EUV 光はテスト光学系を通して集光しながら直交回折格子に入る。まずローレンスバークレイ研究所で行われていたようなシアリング干渉法⁴⁾の場合、直交回折格子は CCD カメラ面との間で Talbot 条件²²⁾を満たす位置に置かれ、回折格子を射出した複数の回折光はいったん回折次数ごとに複数の

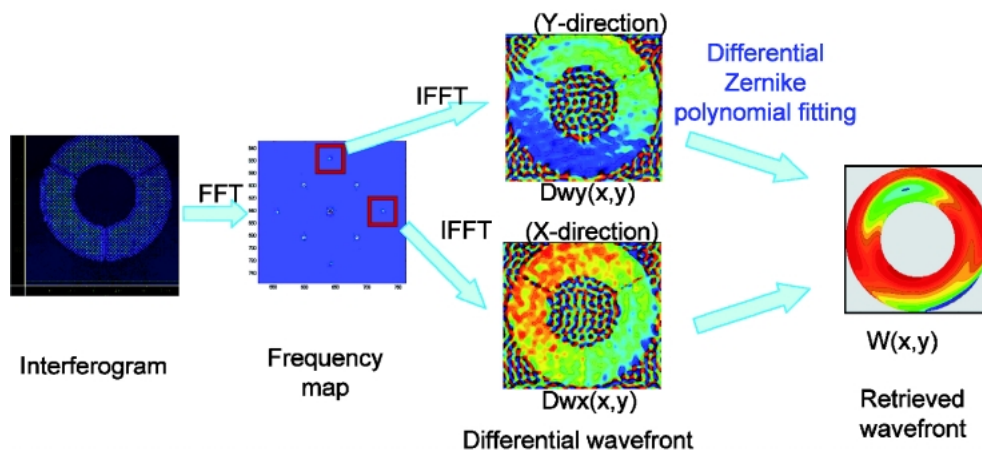


Fig. 7 Wavefront retrieval process of CGLSI interferogram by differential Zernike polynomial fitting method.

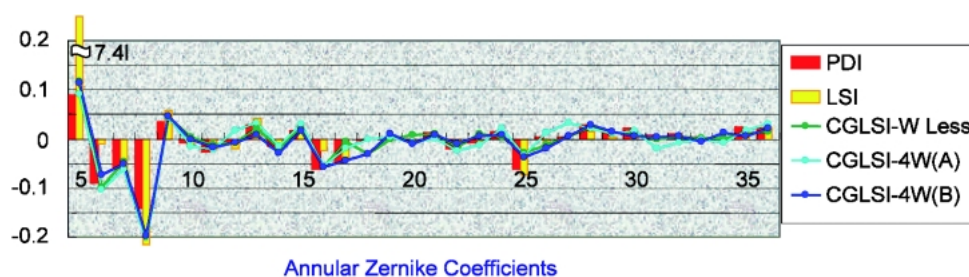


Fig. 8 Comparison of the Zernike coefficients of the test optics obtained by PDI, LSI and CGLSI.

スポット状に集まるが、さらに進んで CCD カメラ面上で干渉し、網目状の干渉縞をつくる。

従来型の「窓なしタイプ」の干渉計に対して、今回は新たに 1 次光のみの選択マスクを用いた「4 窓タイプ」の CGLSI 干渉計を構成して、同一のテスト光学系の波面を実波長測定した⁹⁾。窓を設けることにより、高次回折光の混入の影響をなくし、1 次光のみによる SN 比の高い測定ができる。シア比は直交回折格子のピッチによって調整でき、テスト光学系の瞳に対して約 0.02~0.04 とした。

4.2 CGLSI 法の縞解析と結果

得られた干渉縞からの波面再構成は、微分波面の積分による回復法など、各種の方法で試みた。その結果、今回の光学系のような輪体瞳の場合、積分法は、積分開始位置を瞳中心に取れないことから、大きな計算誤差を生じることが分かった。そこで今回は、微分 Zernike 多項式をつくり、これと計測したシア波面とを最小 2 乗法によりフィッティングすることにより²³⁾、第 36 項までの Zernike 係数を求め、波面を再構成した。

まず、得られた干渉縞に対して 2 次元のフーリエ変換 (FT) を行うと、Fig. 7 の左から 2 番目に示すようなスポットが得られる。これは空間周波数マップに相当し、これらのスポットの中から X および Y 方向のそれぞれ 1 次光干渉の部分のみを選択する。これをさらに逆 FT すると、

1 次光干渉のみによるシア波面が得られる。この操作で、PDI 法の場合と同様に干渉縞の DC 成分や高次干渉によるノイズが除去され、コントラストの高いシア波面となる。一方で Zernike 多項式より微分 Zernike 多項式を生成し (ここでは Annular Zernike 多項式を用いた)、これらが X, Y 両シア波面に最適にフィットするよう最小 2 乗法を用いて第 36 項までの Zernike 係数を決定した。Fig. 7 のいちばん右側の図は、上記操作で決定した Zernike 係数をもとに再構成したテスト光学系の波面である。

CGLSI 測定から上記のプロセスで再構成したテスト光学系の波面は、60 nmφ のピンホールを用いて測定した PDI 法による波面測定結果と形状等がよく一致した。Fig. 8 に、同一のテスト光学系に対して PDI 法、LSI 法および今回の CGLSI 法で測定された 36 項の Zernike 係数値の比較を示す。これまで PDI 法と LSI 法で求めた低次の非点収差 (Z5, Z6) の間には大きな差があったが、PDI 法と CGLSI 法による Zernike 係数は低次の非点収差も含めて各項がほぼ一致した。Z5 項から Z36 項までの Zernike 係数で計算した波面収差は、PDI 法で 1.28 nmRMS、CGLSI 法で 1.30 nmRMS となり、両者の誤差は 0.28 nmRMS であった。もっとも大きな不一致を示したのは低次のコマ収差 (Z8) であった。

以上のことから、CGLSI 法は捕獲収差が大きく、PDI 法に近い測定精度があり、粗アライメントをした光学系の

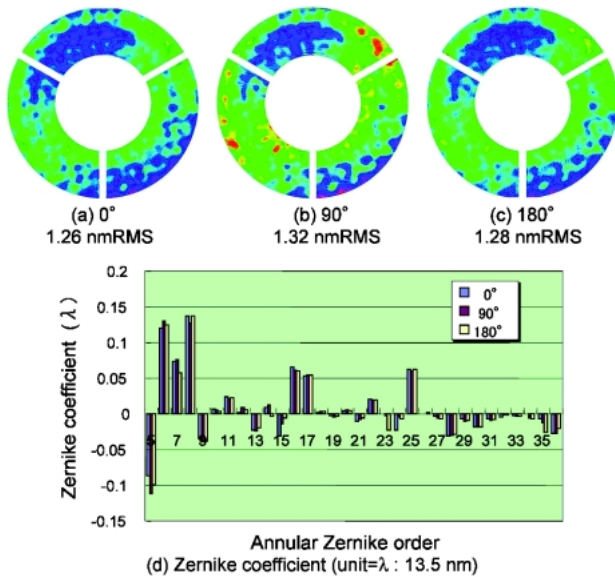


Fig. 9 Comparison of the wavefront maps and the Zernike coefficients of the test optics obtained before and after the rotation of the optics. (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°, (d) Zernike coefficients (unit= λ : 13.5 nm).

実波長計測に適した方法であることが分かった。

5. 本干渉計測法の測定精度と誤差見積もり

本測定で得られる収差の値には、テスト光学系の収差のほかに、測定系に付随したシステム誤差が含まれる。システム誤差としては、照明光学系の収差、回折格子の形状から発生する収差、ピンホールで作られる球面波の収差、CCDカメラの傾きによる収差などがある。これらのシステム誤差は、鏡筒を光軸まわりに回転して測定した波面を比較することにより、見積もることができる。ここではPDI法でのシステム誤差の評価について述べる。

まず、システム誤差のうち回折格子で発生する誤差およびCCDカメラの傾きにより発生する誤差を低減するため、PDI用マスクのピンホールを窓に代えた窓-窓型のマスクを用いて干渉縞を計測し、上記のシステム誤差を見積もり、PDIの計測値から差し引く操作を行った。これを我々は「アブソリュートPDI法」²⁴⁾と呼び、PDIの解析には常用している。

鏡筒の回転は2~3週間の期間をおき、真空槽を大気圧にもどして、手動で鏡筒を持ち上げて回転する方法で行った。回転角としては、0°、90°、180°、120°の4方位で計測した。解析においては、各回転角における干渉縞の中心座標のずれを小さくする方法として、輪体の遮蔽部の中心を解析中心とすることで、精度が向上することが分かった。

Fig. 9 にテスト光学系の鏡筒を光軸まわりに(a) : 0°、(b) : 90°および(c) : 180°回転させた光学系について波面計測した結果を示す(像は比較のため回転をもどして表示

した)。この結果より、3つの測定波面がよく似た形状を示しており、また、Zernike係数(d)もほぼ一致していることが分かる。

これより、本測定のシステム誤差はZ5~Z36のZernike係数に対して0.066 nmRMSという値を得た。さらに各測定におけるピンホールアライメント精度を向上させることにより、測定再現性が0.048 nmRMSまで向上させることができた。また、このシステム誤差を測定値から差し引くことにより、より高精度の波面計測を行うことができると考えている。

6. まとめと課題

以上の研究より、本研究プロジェクトの目標としていた測定誤差0.1 nmRMS以下を達成することができた。またEUV領域で用いられる投影光学系などを評価するためには、まず捕獲収差の大きなCGLSI法で計測し、再アライメントをしながら光学系の収差を低減し、最後にPDI法で精密測定するのが適当と思われる。

今後の課題として、例えばフルフィールドのEUV投影光学系(非球面6枚系)などではNAが0.26~0.3程度となり、用いるピンホールの加工やアライメントもさらに厳しくなる。また多層膜ミラーの反射回数も増えるため、光量減少に対応するための対策も必要になってくる。本稿では詳しく触れなかったが、本プロジェクト独自の方法である線回折干渉(LDI)法が有効になってくることも考えられる。

謝辞

本研究は、基盤技術研究促進事業の一環として、新エネルギー産業技術開発機構(NEDO)からの委託により行われた。電気通信大学の武田光男教授には、波面解析に関して多数の貴重なアドバイスを頂いた。また、兵庫県立大学の角谷幸信氏には放射光ビームの安定化に関して、種々の協力を頂いた。以上の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Ed. by SEMATECH, Proc. 3rd Int'l. EUVL Symp. Nov. 1-4, 2004 Miyazaki, Japan.
- 2) C. Krautschik, M. Ito, I. Nishiyama and T. Mori: Proc. SPIE **4343** 524-534 (2001).
- 3) E. Tejnil, K. A. Goldberg, S. Lee, H. Medechi, P. J. Batson, P. E. Denham, A. A. MacDowell, J. Bokor and D. Atwood: J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 2455-2461 (1997).
- 4) P. P. Naulleau, K. A. Goldberg and J. Bokor: J. Vac. Sci. Technol. B **18**, 2939-2943 (2000).
- 5) K. Sugisaki, Y. Zhu, Y. Gomei, M. Niibe, T. Watanabe and H. Kinoshita: Proc. SPIE Vol. **4146**, 47-53 (2000).
- 6) K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa, S. Hara and A. Suzuki: Proc. SPIE Vol. **5037**,

- 257-264 (2003).
- 7) M. Niibe, M. Mukai, S. Miyamoto, Y. Shoji, S. Hashimoto, A. Ando, T. Tanaka, M. Miyai and H. Kitamura: Synchrotron Radiation Instrumentation, AIP Conf. Proc. **705**, 576-579 (2004).
 - 8) Z. Liu, M. Okada, K. Sugisaki, M. Ishii, Y. Zhu, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, M. Niibe and K. Murakami: Proc. SPIE Vol. **5752**, 663-672 (2005).
 - 9) S. Kato, C. Ouchi, M. Hasegawa, A. Ohkubo, A. Suzuki, K. Murakami, J. Saito, K. Sugisaki, M. Okada and M. Niibe: Proc. SPIE Vol. **5751**, 110-117 (2005).
 - 10) Y. Gomei, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Niibe, T. Watanabe and H. Kinoshita: SPIE Vol. 4506, 39-45 (2001).
 - 11) Y. Gomei, K. Sugisaki, Y. Zhu and M. Niibe: Microelectron-ic Eng., **61-62**, 1077-1082 (2002).
 - 12) K. Otaki, K. Ota, I. Nishiyama, T. Yamamoto, Y. Fukuda and S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. B **20**, 2449-2458 (2002).
 - 13) Y. Sekine, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Hara, T. Hasegawa, Y. Kuramoto, S. Kato, K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, K. Otaki and Z. Liu: J. Vac. Sci. Technol. B **22**, 104-108 (2004).
 - 14) T. Hasegawa, C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, K. Sugisaki, A. Suzuki, K. Murakami, J. Saito and M. Niibe: Proc. SPIE Vol. **5374**, 797-807 (2004).
 - 15) K. Sugisaki, M. Hasegawa, S. Kato, C. Ouchi, J. Saito, M. Niibe, A. Suzuki and K. Murakami: Proc. SPIE Vol. **5374**, 702-709 (2004).
 - 16) P. Naulleau and K. A. Goldberg: Appl. Opt. **38**, 3523-3533 (1999).
 - 17) M. Born and E. Wolf: "Principle of Optics" Pergamon press, (1975).
 - 18) S. R. Restaino, S. W. Teare, M. DiVittorio, G. C. Gilbreath and D. Mozurkewich: Opt. Eng. **42**, 2491-2495 (2003).
 - 19) M. Niibe, M. Mukai, T. Tanaka, K. Sugisaki, Y. Zhu and Y. Gomei: Proc. SPIE Vol. **4782**, 204-211 (2002).
 - 20) K. Sugisaki, Y. Zhu, Y. Gomei and M. Niibe: Proc. SPIE Vol. **4688**, 695-701 (2002).
 - 21) K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu, K. Otaki, Z. Liu, J. Kawakami, M. Ishii, J. Saito, K. Murakami, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki, H. Yokota, M. Niibe and M. Takeda: Proc. SPIE Vol. **5921** (2005) to be published.
 - 22) M. Takeda and S. Kobayashi: Appl. Opt. **23**, 1760-1764 (1984).
 - 23) P. Naulleau et al.: Proc. SPIE, 3331, 114-123 (1998).
 - 24) Y. Zhu, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Z. Liu, M. Ishii, J. Kawakami, J. Saito, K. Murakami, C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki and M. Niibe: SPIE Vol. **5752**, 1192-1199 (2004).

● 著者紹介 ●



新部正人

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所・助教授

E-mail: niibe@lasti.u-hyogo.ac.jp

専門：X線光学

【略歴】

1984年3月、北海道大学大学院理学研究科化学第2専攻博士課程修了。1984年4月よりキャノン㈱勤務。研究開発本部中央研究主任研究員を経て、1994年10月より姫路工業大学高度産業科学技術研究所、助教授。2004年4月兵庫県立大学の統合により現職。キャノン㈱在職中より、軟X線多層膜の作製とその応用について研究してきた。

Wavefront metrology of EUV projection optics by soft x-ray interferometry

Masahito NIIBE Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo 3-1-2, Kouto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo 678-1205 Japan

Abstract An experimental EUV interferometer, using which various interferometry methods can be tested by simply changing the optical parts, was developed and installed at the NewSUBARU SR facility. The methods of measurement were classified into two groups, point diffraction interferometry (PDI) and lateral shearing interferometry (LSI). The wavefront of Schwarzschild test optics was evaluated at a wavelength of 13.5 nm, which has been used in the EUVL tool. To verify the measurement accuracy, the measurements were repeatedly carried out by rotating the optics from 0° to 90° or 120° around the optical axis, and the systematic error of the measurements was estimated. In the PDI measurement, ultra-high-accuracy metrology can be realized with a repeatability of 0.048 nmRMS and a systematic error of 0.066 nmRMS.