

高精度測定のための点回折干渉計

大 滝 桂

Point Diffraction Interferometer for Accurate Measurement of Extreme Ultraviolet Optics

Katsura OTAKI

Projection optics of extreme ultraviolet lithography (EUVL) is composed of several aspheric mirrors and each mirror must be finished with accuracy of 0.2 nm rms. In order to fabricate such accurate mirrors, higher accuracy is required in measurement. Also wavefront shape of projection optics must be measured with accuracy of same order. Point diffraction interferometer (PDI) is attracting attention as a powerful tool to realize such very high accurate measurement. In this article, we will report recent advances of PDI in ASET and other laboratories.

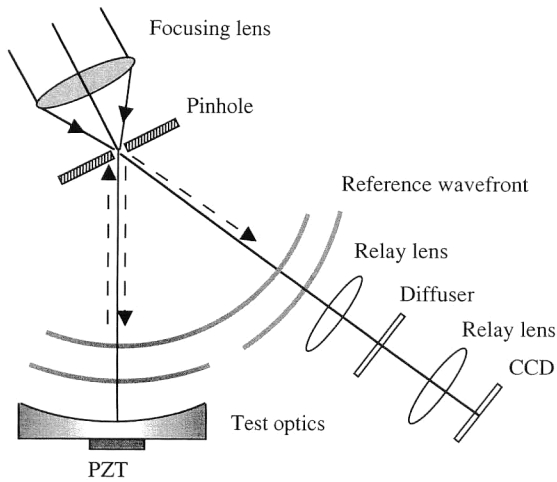
Key words: extreme ultraviolet lithography (EUVL), point diffraction interferometer (PDI), wavefront measurement, aspheric surface measurement

極紫外リソグラフィー (EUVL: extreme ultra violet lithography) では従来の光リソグラフィーに比べて十数分の一の波長が用いられるため、露光光学系に要求される加工精度はきわめて厳しい。投影レンズが六枚非球面ミラーで構成されるとし、許容波面収差を 0.05λ rms = 0.67 nm rms ($\lambda = 13.4$ nm) とすると、各ミラーに配分される許容形状誤差は 0.14 nm rms となる。このような光学系の加工組み立てには、精度 0.1 nm rms の非球面測定機および精度 0.2~0.3 nm rms の波面収差測定機が必要である。超先端電子技術開発機構 (ASET) では、このための超高精度計測ツールとして点回折干渉計 (point diffraction interferometer: PDI) の開発を進めている。米国でも EUV LLC (EUV Limited Liability Company) が中心になって PDI を用いた計測技術の精力的な研究が進められており、大きな成果を上げつつある。本稿では、ASET および米国の PDI 開発の現状について報告する。

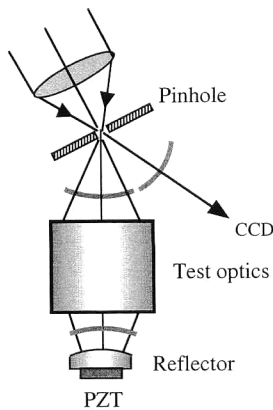
1. 非球面ミラー計測への応用

1.1 PDI の原理

EUVL 投影系は 4~6 枚の非球面ミラーで構成され、おのおののミラーは NA 0.2~0.3, 非球面量 5~10 μm で、面精度は 0.1~0.2 nm rms である。従来の干渉計は基準面の加工精度で測定精度が決定されるため、EUVL ミラーの計測には精度が不十分である。PDI は微小開口より生成される理想球面波を参照面に用いるため、従来の干渉計よりもはるかに超高精度の干渉計測が可能である¹⁻⁴⁾。図 1 は PDI の原理である。図 1(a) でレーザー光は微小ピンホールに集光され、理想的な発散球面波として射出される。透過球面波の半分は参照波面として用いられる。もう半分は被検ミラーで反射され、ピンホール反射面で折り返されて、参照波面と干渉して CCD 上に干渉縞をつくる。この干渉縞を位相シフト法で解析することにより、被検ミラーの形状を知ることができる。このように PDI では従来の干渉計と違って人工の参照面を必要としないので、超高精度測定が可能である。球面波の生成にはファイバー射出光を利



(a)

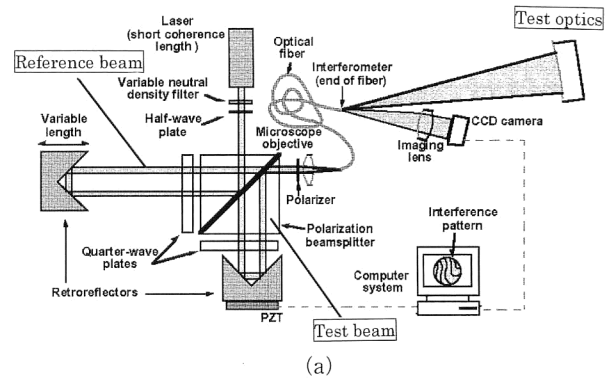


(b)

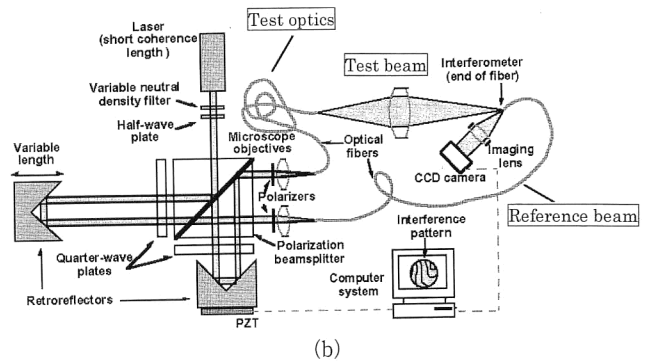
図1 点回折干渉計の原理。(a) ミラー計測用 PDI, (b) 波面計測用 PDI.

用する方法もある。ピンホール方式とファイバー方式にはおのおの長所短所がある。ピンホール方式では、後述のように、集光スポットとピンホールの位置ずれにより射出波面が歪むという問題が生じる。ファイバー方式にはこのような問題はないが、被検面の NA はただか 0.1 程度しかとれない。一方、ピンホール方式では、ピンホール径を小さくすれば NA 0.2~0.3 のミラーの一括計測も可能である。以上の理由から、ASET ではピンホール方式を採用した。

PDI には他に Sommargren 干渉計^{5,6)} とよばれるものがあり、主に米国で用いられている。この干渉計は高コントラストの干渉縞を得るために参照光と被検光の光量バランスが調整できるのが特徴で、そのために低コヒーレンス光源を用いている。図 2(a) がそれで、参照光と被検光を分離してから同一開口より射出させる。参照光と被検光の光量バランスは四分の一波長板で、光路長差は折り返しミラーで調整できる。位相シフトは折り返しミラーを PZT (piezoelectric transducer) で振動させて行う。図 1(b),



(a)



(b)

図2 Sommargren 干渉計。文献 6) に加筆。(a) ミラー計測用 PDI, (b) 波面計測用 PDI.

表1 PDI の誤差要因と要求精度 (集光レンズ NA 0.6, 被検 NA 0.3, ピンホール径 $0.5 \mu\text{m}$ ϕ).

| |
|--------------------------------|
| A. 参照波面の歪み (光源→ピンホール透過): |
| 集光レンズ残収差 ($<0.05\lambda$ rms) |
| ピンホールアライメント誤差 (<50 nm) |
| ピンホール真円度 (<50 nm) |
| B. 被検波面の歪み (被検面→ピンホール反射→ CCD): |
| ピンホール基板表面粗さ (<0.2 nm rms) |
| ピンホール散乱光 |
| ピンホールアライメント誤差 (<100 nm) |
| ピンホール真円度 (<50 nm) |
| C. その他 |
| CCD ピクセル位置ずれ |
| CCD 感度非線形誤差 |
| 機械的振動 |
| 空気ゆらぎ |

図 2(b) は波面計測用 PDI である (2 章 1 節参照)。

1.2 誤差要因の解析

PDI はサブナノメートルオーダーの超高精度計測が可能とされているが、現実にはさまざまな誤差要因が測定精度を低下させる。主な誤差要因と要求精度を表 1 にまとめた。“ピンホールによっていかに理想的な球面波を生成するか”, “被検面で歪んだ波面をいかに乱さずに CCD まで

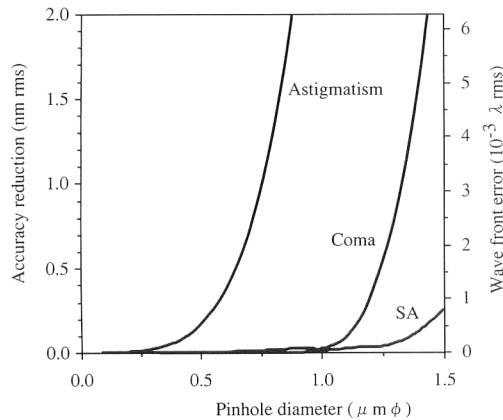


図3 集光レンズの残収差と透過波面歪み. 曲線SA (coma, astigmatism) は集光レンズが0.05 λrmsの球面収差(コマ収差, 非点収差)をもつときの透過波面歪みを示す.

伝播させるか”, “干渉縞の輝度情報をいかに乱さずに CCD で取り込むか” がポイントである. 表1で, 誤差 A は参照波面を歪ませる誤差要因である. 例えば, ピンホールが集光スポットよりも大きいと, 集光レンズの収差が除去できず射出波面が乱れたままになる. 図3は, 集光レンズ (NA 0.6) がおのおの 0.05 λrms の球面収差, コマ収差, 非点収差をもつときのピンホール射出波面の歪みを計算したものである. 非点収差の影響が非常に大きいように思えるが, 図1のごとく被検面と CCD 光学系が集光レンズ光軸に関して対称に配置されていれば, 180° 回転対称性をもつ収差は相殺されて測定に影響を与えない. つまり, 非対称収差 (コマ収差) のみを抑えればよい. 図3から, ピンホール径を 1 μm φ 以下にすれば集光レンズの残収差の影響は無視できる. ピンホール方式ではピンホールアライメントも誤差要因になる. 集光スポットとピンホールに位置ずれがあると, 透過光振幅が非対称に変調されるため透過波面は非対称に歪む. これを回避するには, 集光スポットの位置精度を数十 nm の精度で制御する必要がある. ASET の PDI では, これを実現するために散乱光を用いたアライメント調整機構を備えている. 集光スポット反射時も事情は同様である. ピンホールアライメント誤差のように波面を非対称に歪ませる誤差は被検 NA の 3 乗で増大する. つまり, 高 NA では測定精度が急激に低下する. PDI の測定精度を議論する際は被検面の NA が重要なパラメータであることを強調しておく.

誤差 B は, 被検面から CCD までの光路で発生する誤差である. この光路上で被検面からの反射波面は保存されなければならないが, ピンホール基板の表面が粗いとピンホール基板で反射される際に波面が乱される. これを抑えるには, 粗さ 0.2~0.3 nm rms 程度にピンホール基板表面を

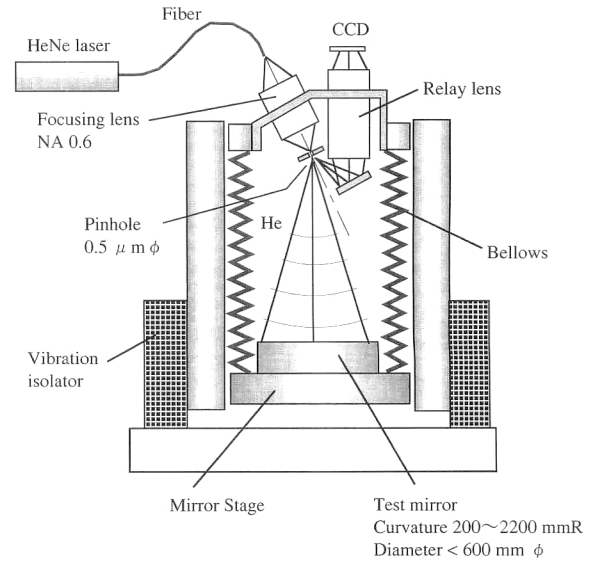


図4 ASET 点回折干渉計の概略図.

仕上げる必要がある. なお, 表面仕上げの領域は集光スポットの広がり程度では不十分で, 被検面の横分解能をカバーするだけの領域が必要である. 要因 C はその他の誤差である. 非球面計測では CCD 上に多数の干渉縞が生成されるが, その状態で計測を行うと CCD ピクセルの位置ずれや CCD 感度の非線形性が致命的な誤差になりうる. 設計ではこれらの誤差を光学シミュレーションにより解析し, それぞれの誤差と光量のバランスから最適なピンホール径や部品の加工精度が決定される.

1.3 装置の概略と再現性

図4, 図5は ASET の点回折干渉計概観図である. 干渉計はアクティブ除振台に搭載され, 独立基礎工事を行った床上に設置されている. 被検面は上向きに配置されているが, 将来は下向きミラーへも対応する予定である. 被検面ステージとピンホールユニットの間隔は可変になっており, 曲率半径 200~2200 mm, 直径 300 mm φ までの被検面が測定可能である. 参照光と被検光の光路差は最大 4400 mm にもなるため, 空気ゆらぎの影響を受けやすい. 空気ゆらぎによる再現性の低下を避けるために光学系全体はベローズで覆われ, 内部はヘリウムガスで満たされている. ヘリウムは空気比屈折率が低いいため, ゆらぎの影響は 1/8.3 と見積もられている. 光源は波長安定化 He-Ne レーザー ($\lambda=633$ nm) を用いている. ピンホールは小さいほうが精度の点で有利であるが, 光量とのバランスを考慮し 0.5 μm φ を用いた. ピンホールは石英基板にクロムスパターンし, ドライエッチングにより作製した. 集光レンズは NA 0.6, 集光スポット径 ($1/e^2$) は 1.0 μm φ である.

EUVL 用ミラー計測に要求される絶対精度 (accuracy)

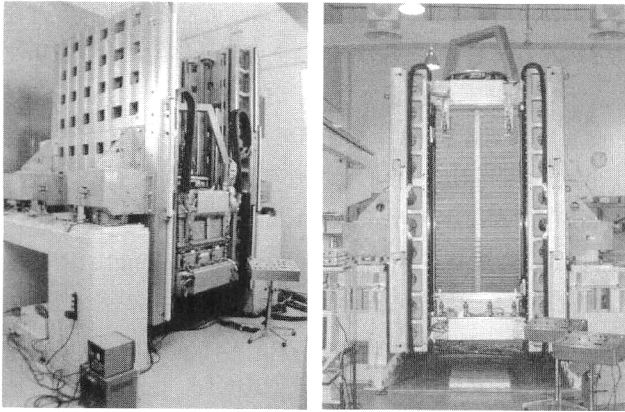


図5 ASET点回折干渉計の概観。

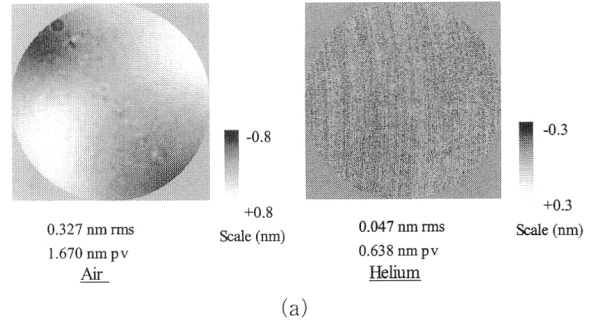
を 0.1 nm rms とすると、それを上回る再現性 (precision) が必要である。本 PDI では、チャンパー内ヘリウム置換により $0.03 \sim 0.04 \text{ nm rms}$ という再現性が安定して得られている。図6は、再現性を空気とヘリウム雰囲気とで比較した例である⁷⁾。図6(a)は連続2データの差を示したもので、空気中ではゆらぎ (緩やかな白黒の低周波成分) により再現性が低下しているが、ヘリウム雰囲気中ではゆらぎによる再現性低下はほとんどみられない。なお、左図の左上から右下に並んだ小斑はごみによる散乱光、右図のざらつきは回転拡散板によるスペックルである。図6(b)は再現性の時間変動を示したものである (測定間隔 10 分)。ヘリウム雰囲気中では、再現性の平均値が小さいだけでなく、変動幅もきわめて小さい。この結果は、少ない測定回数で有意な測定を行えることを示している。測定回数を増やすことで再現性 0.03 nm rms も安定して得られている。

1.4 システム誤差の評価

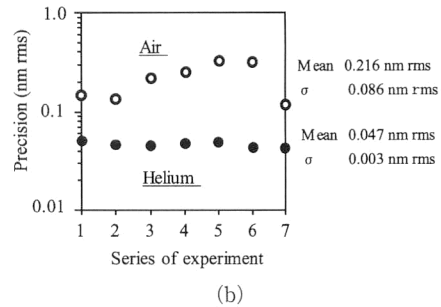
絶対精度の検証には、異なる原理に基づく複数の測定装置で比較するのが理想であるが、ここでは1台の装置で行える方法で絶対精度の検証を行う。測定値は被検面形状と干渉計のシステム誤差の和で表現できる。システム誤差が測定を通じて不変と仮定すれば、被検面を回転 (移動) したときにミラーとともに回転 (移動) する成分が真のミラー形状であり、残った成分がシステム誤差と考えられる。図7はミラーの回転 (移動) 前後のミラー形状である。被検面に NA 0.15 の球面ミラーを用い、回転角は $90^\circ \times 4$ 、移動量は直径の 24% である。回転 (移動) の前後ではほぼ同じ測定データが得られており、 1 nm 以下の構造も再現されている。これらのデータから、システム誤差として 0.16 nm rms (NA 0.15)、 0.10 nm rms (NA 0.08) が得られている^{7,8)}。

1.5 非球面計測

非球面反射光は、参照光と干渉して CCD 上に多数の干



(a)



(b)

図6 空気とヘリウムの再現性比較。(a) 差分データの分布、(b) 再現性の時間変動 (測定間隔=10 分)。

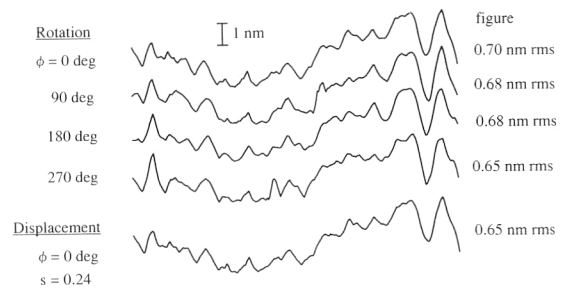


図7 ミラー回転・移動前後の断面形状。 ϕ = ミラー回転角、 s = ミラー移動量 (直径で規格化)。

渉縞をつくる。このままの状態を一括計測する (multiple-fringe measurement) のが最も単純であるが、干渉縞に沿って初期位相の差による振動や CCD 起因の誤差が発生しやすい。また、非球面の反射被検光と参照光が同一光路を通らないため、リレーレンズの影響を受けて精度が低下する⁹⁾。これらの問題を回避するには、ナル (null) 光学系により被検光を球面波に変換して干渉縞を減らし、いわゆる single-fringe measurement を行えばよい。このナル干渉法では、ナル光学系の加工精度と、いかに校正するかが問題になる。干渉縞起因の誤差を減らす別の方法は、球面波と被検非球面が接する輪帶領域を測定し合成する、いわゆる輪帯波面合成法である¹⁰⁾。この方法では、測定領域は常に single fringe なので干渉縞に起因する誤差はわずかであるが、合成時の誤差が蓄積され逆に精度を低下させる恐れがある。どの方法が最良であるかは測定環境・被検面形状、被検面 NA 等に依存する。海外では、ローレンスリバモア

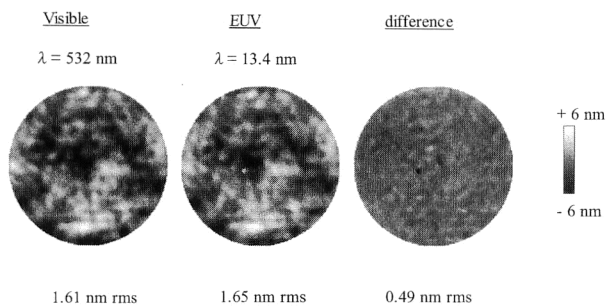


図8 可視光 PDI と at-wavelength PDI の比較¹³⁾。

国立研究所 (LLNL) とカール・ツァイスによる同一ミラーの比較計測による精度検証が進められている^{11,12)}。PDI (LLNL) とナル・フィゾー干渉計 (Zeiss) で非球面量 3.8 μm のミラーを測定し、両者の差として 0.25 nm rms を得ている。ASET でも 1 章 4 節で述べた球面ミラーと同様の手法による精度検証が進められている。

2. 波面計測への応用

2.1 可視光 PDI

PDI は、非球面計測だけでなく波面計測にも有効である。波面計測ではミラー計測よりも若干低い 0.2~0.3 nm rms 程度の精度があればよく、そのうえ光学系の収差が補正されていれば、波面は球面に近いので非球面計測よりも難易度は低いといえる。図 1(b)、図 2(b) は透過波面計測用の可視光 PDI である。図 1(b) は折り返しミラーを用いて被検光を往復させる。折り返しミラーは別途校正する必要がある。図 2(b) は被検光と参照光のための 2 本のファイバーを備えており、被検レンズを透過した波面は参照光用ファイバー端面で反射される。ところで、EUV 露光光学系は反射ミラーのみで構成されるが、反射位相特性が可視

光と EUV 光とでは若干異なるため、可視光で波面収差を追い込んだとしても十分とはいえず、最終的には EUV 光源を用いた測定が必要になる。これがいわゆる at-wavelength 計測である (2 章 2 節参照)。とはいえ、可視光 PDI は at-wavelength PDI のような大掛かりな設備が不要なので併用できれば都合がよい。Chapman (LLNL) らは、NA 0.1 の露光機を可視光 PDI と at-wavelength PDI で比較測定した¹³⁾。彼らが用いた可視光 PDI は図 2(b) の Sommargren 型 ($\lambda = 532 \text{ nm}$)、at-wavelength PDI はローレンスバークレー国立研究所 (LBNL) に設置された後述の PS-PDI ($\lambda = 13.4 \text{ nm}$) である。可視光 PDI の球面波生成はファイバーでなくピンホールを用いている。結果を図 8 に示す。両者は RMS 値だけでなくパターン of 微細構造までよく一致している。しかし、その差は 0.49 nm rms = $\lambda_{\text{EUV}}/27$ と可視光と EUV 光の差にしては大きく、理由は明らかになっていない。実用機は六枚ミラー構成で NA = 0.25 と考えられている。NA が大きくなると可視光と EUV 光での波面収差の差は拡大するが、可視光 PDI は初期調整には有効である。

2.2 At-wavelength PDI

波面収差の最終評価には、EUV 光源を用いた at-wavelength PDI が必要である。図 9(a) は at-wavelength PDI である。図 9(a) で、光源側ピンホールから射出した理想球面波は回折格子で分離され、被検光学系を透過しウィンドウとピンホールに導かれる。ウィンドウは集光スポットよりも十分大きく、そのまま素通りする。ピンホールは集光スポットより十分小さく、透過波面は理想球面波になる。この参照波面とウィンドウ透過後の被検波面の干渉縞を位相シフト法で解析すれば光学系の波面収差を知ることがで

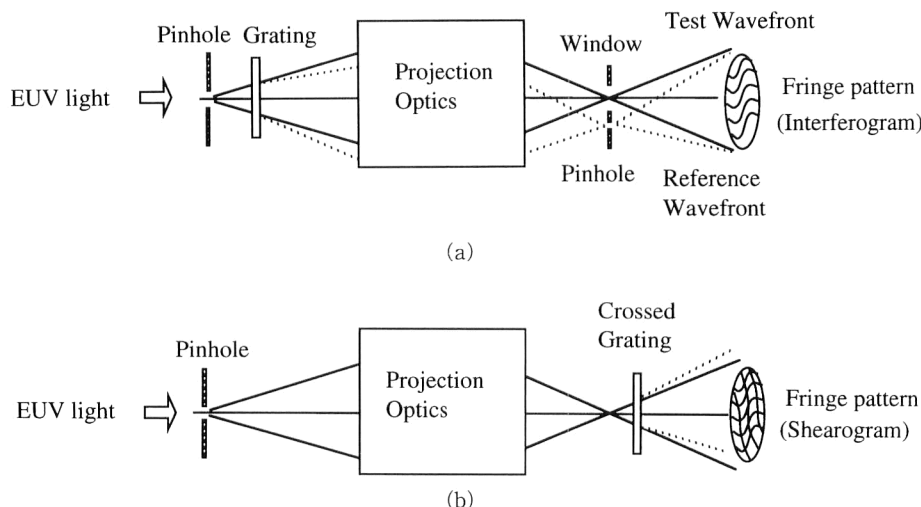


図9 at-wavelength PDI の原理。(a) PS-PDI, (b) LSI。

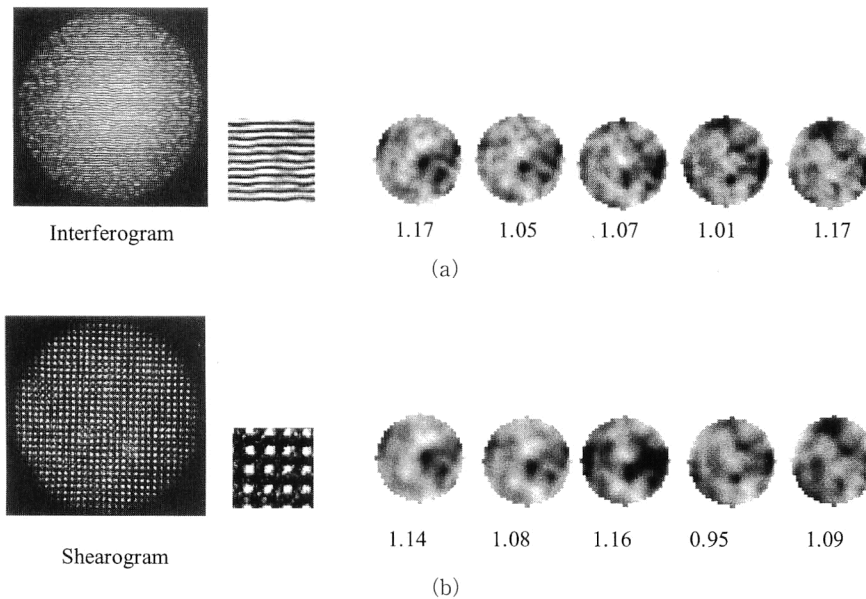


図10 at-wavelength PS-PDIとLSIの比較¹⁴⁾. (a) PS-PDI, (b) LSI. 有効視野内の5点の測定波面データ. 数字はゼルニケ37項展開後の波面収差 (nm rms).

きる. この型のPDIは位相シフト型PDI (phase shifting-PDI; PS-PDI) とよばれる. PS-PDIは回折限界付近の波面収差測定には有効であるが, 大きな波面収差に対応できない. 露光系透過後の集光スポットが広がってしまい, フレアや参照光量低下によりS/Nが劣化するからである. シアリング干渉計 (lateral shearing interferometer; LSI) ではこのような問題はない. 図9(b)で, 光源側ピンホールから射出された理想球面波は被検レンズを透過後, 二次元回折格子で分離され, CCD上に干渉縞 (shearogram) をつくる. この干渉縞をシアリング法で解析すれば波面収差が測定できる. LSIでは波面収差のダイナミックレンジが広く, 露光機組み立ての初期段階から投入できる. 表2に, PS-PDIとLSIの特徴をまとめた. LSIはピンホールアライメントが不要, 高NA計測が可能等の利点もある.

PS-PDIとLSIの比較は興味深い. Naulleau (LBNL)からは, PS-PDIとLSIによる波面収差の比較測定を行った^{14,15)}. 図10はその結果である. 図の左はPS-PDIとLSIの干渉縞, 右は有効視野内の5点で得られた波面収差である. NA 0.091 (NA 0.082)の波面収差を37項ツェルニケ多項式で展開し, 両者の差として $0.49 \text{ nm rms} = \lambda_{\text{EUV}}/27$ ($0.19 \text{ nm rms} = \lambda_{\text{EUV}}/71$) という結果を得ている. NA 0.091とNA 0.082はそれぞれ5個と30個の測定データの平均値を用いている. Naulleauらは, PS-PDIのシステム誤差の評価も行っている. 彼らは, 二重ピンホールによる干渉縞の歪み解析 (ナルテスト) から参照波面の歪みを見積もり, NA 0.082に対して $0.038 \text{ nm rms} = \lambda_{\text{EUV}}/350$ という結果を得ている¹⁶⁾. ASETでも現在両タイプのPDI

表2 PS-PDIとLSIの比較.

| | PS-PDI | LSI |
|-------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 測定精度 | 高い ($\approx 0.1 \text{ nm rms}$) | 中 ($\approx 0.2 \text{ nm rms}$) |
| 空間分解能 | 高い | 低い |
| 被検 NA | 低 NA (≈ 0.1) | 高 NA (≈ 0.3) |
| 収差の計測範囲 | 狭い ($< 0.5\lambda \text{ rms}$) | 広い ($> 1\lambda \text{ rms}$) |
| ピンホールアライメント | 困難 | 不要 |

の開発を進めている.

3. PDIの課題と今後

これまで述べたようにPDIは従来の干渉計に比べてきわめて高精度の計測が可能であり, EUVLの目標精度に近づきつつあるが, 課題も残されている. 現状では, 球面ミラーに対して 0.1 nm rms , 非球面ミラーに対して $0.2 \sim 0.3 \text{ nm rms}$ 程度の測定精度が得られている. 絶対精度が不十分でも載せ替え再現性 (resetability) が十分ならば, ミラーの修正研磨と波面収差測定の繰り返しにより波面収差を追い込めるが, 作業効率の点からは絶対精度が高いほうが望ましい. したがって, 非球面ミラーに対してはさらなる精度向上が望まれる. PDIによる凸面計測も課題のひとつである. PDIで凸面を直接計測することはできないので, 集光レンズで発散光を収束光に変換する必要がある. 集光レンズをいかに校正するかが問題になる. 凹面をPDIで校正してフィゾー面に用いる, という提案もなされている.

PDIは波面形状が球面に近いほど高い精度が得られるので波面収差測定には向いている. At wavelength PDIは

ナルテストやLSIとのクロスチェックを通じて高い精度が確認されている。ただし、評価は $NA < 0.1$ の光学系に対するものであり、PDIでは高NAほど精度が低下しやすいことを考えると、 $NA \geq 0.25$ なる実用機に対しても精度が維持できるかどうか今後の課題になる。可視光PDIとat-wavelength PDIの比較検証もさらに進めていく必要がある。

PDIは単純ながら驚くべき測定精度が得られる装置であり、今後、EUVLだけでなくさまざまな分野で用いられ、いくと思われる。拙稿がEUVLの発展とPDIの普及に役立てば幸いである。

波面計測PDIに関し貴重な助言をいただいたASET EUV研究室杉崎克己氏、朱郁葱氏および資料を提供いただいたDr. K. Goldberg (Center for X-ray Optics, LBNL), Dr. H. Chapman (LLNL)に感謝いたします。ASET-PDIの開発にあたり(株)ニコンの開発陣にお世話になりました。本研究の内容は通産省プロジェクト「超先端電子技術開発促進技術」の一環として、NEDOの委託を受けて行われた。

最新の成果は文献17), 18) 参照。またCXRO (Center for X-ray Optics) のウェブサイト*1に関連文献が多数掲載されている。

文 献

- 1) R. N. Smartt and W. H. Steel: Jpn. J. Appl. Phys., **14**, Suppl. 14-1 (1975) 351-356.
- 2) Y. Ichihara and N. Magome: *Conference of J. Appl. Phys., Technical Digest*, 31p-Q-5 (1981).
- 3) Y. Ichihara: U. S. Patent No. 5076695 (1991).
- 4) F. Bonneau, K. Otaki and Y. Ichihara: *Nikon Technical Report* (1993) (Marseille Univ.) (in press).

- 5) G. E. Sommargren: U. S. Patent No. 554840 (1996).
- 6) G. E. Sommargren: *OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography*, eds. G. Kubiak and D. Kania (OSA, 1996) Vol. 4, pp. 108-112.
- 7) K. Otaki, K. Ota, T. Yamamoto, Y. Fukuda, I. Nishiyama and S. Okazaki: *Digest papers of Microprocesses and Nanotechnology Conference* (Matsue, 2001) pp. 290-291.
- 8) K. Otaki, T. Yamamoto, Y. Fukuda, K. Ota, I. Nishiyama and S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. B, **20** (2002) 295-300.
- 9) G. E. Sommargren, D. W. Phillion and E. W. Campbell: *Precision Science and Technology for Perfect Surfaces*, eds. Y. Furukawa, Y. Mori and T. Kataoka (JSPE, Tokyo, 1999) pp. 329-335.
- 10) K. Ota, T. Yamamoto, Y. Fukuda, K. Otaki, I. Nishiyama and S. Okazaki: Proc. SPIE, **4343** (2001) 543-550.
- 11) U. Dinger, F. Eisert, H. Lasser, M. Mayer, A. Seifert, G. Seitz, S. Stacklies, F. Stickel and M. Weiser: Proc. SPIE, **4146** (2000) 35-46.
- 12) J. S. Taylor, G. Sommargren, R. Soufli, L. Hale, D. Phillion, S. Baker, H. Chapman, D. Sweeney, E. Gullikson, U. Dinger, G. Seitz, F. Eisert, P. Kurz, S. Burkart, M. Weiser, S. Schulte, S. Stacklies, R. Hudyma and P. Gabella: *3rd International Workshop on EUV Lithography* (Matsue, 2001).
- 13) H. Chapman, L. Hale and N. Nguyen: *2nd International Workshop on EUV Lithography* (2000).^{*2}
- 14) K. Goldberg, P. Naulleau, P. Batson, P. Denham, E. Anfer-son, H. Chapman and J. Bokor: *2nd International Workshop on EUV Lithography* (2000).^{*3}
- 15) P. Naulleau, K. A. Goldberg and J. Bokor: J. Vac. Sci. Technol. B, **18** (2000) 2939-2943.
- 16) P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee, C. Chang, D. Attwood and J. Bokor: Appl. Opt., **38** (1999) 7252-7263.
- 17) *2nd International Workshop on EUV Lithography* (San Francisco, Oct. 19-20, 2000).^{*4}
- 18) *3rd International Workshop on EUV Lithography* (Matsue, Oct. 29-31, 2001). CD-ROM has been published by International Sematech.

(2002年3月6日受理)

*1 <http://goldberg.lbl.gov/xfringe/index.html>

*2 http://www.semtech.org/public/news/conferences/euvl2000/documents/Poster_OPT13_chapman.pdf

*3 http://www.semtech.org/public/news/conferences/euvl2000/documents/505_OPT11_goldberg.pdf

*4 <http://www.semtech.org/public/news/conferences/euvl2000/index.htm>