

極紫外リソグラフィーにおける波面収差の評価

長谷川雅宣*・杉崎 克己**

Evaluation of Wavefront Aberration for Extreme Ultraviolet Lithography

Masanobu HASEGAWA and Katsumi SUGISAKI

Since EUV-LLC was established in 1997, LBNL played the main role in the development of EUV at-wavelength interferometry. They developed PS/PDI and CGLSI, and it was proved that these methods had the measurement accuracy of 0.1 nm or less. In Japan, EUVA Wavefront Measurement Laboratory has been developing EWMS (EUV Wavefront Measurement System) at the NewSUBARU synchrotron facility of University of Hyogo, which measures the wavefront aberration of six-mirror projection optics of EUV exposure system. In this paper, we describe the development status of PDI and LSI and the other methods, and the remaining technical subjects for attaining the accuracy of 0.1 nm are described.

Key words: extreme ultraviolet lithography (EUVL), wavefront measurement, point diffraction interferometer (PDI), lateral shearing interferometer (LSI)

極紫外 (extreme ultraviolet: EUV) リソグラフィーは、32 nm 以下のノードに唯一適用可能な光リソグラフィー技術として、その実現が期待されている。NA 0.25 の投影光学系の波面収差は $\lambda/30$ (0.4 nm rms) を要求されており、その波面収差を測定するための干渉計には、0.1 nm という厳しい精度が要求されている。本稿では、EUV リソグラフィーの波面評価技術が開発された経緯と、国内外の現状を紹介する。

1. 露光波長での波面評価の必要性

本題に入る前に、露光波長での波面評価の必要性について述べる。極紫外領域では物質の複素屈折率は 1 に近く、 δ も κ も 1 より十分小さい。よって、レンズは使用できず、光学系をすべて反射鏡で構成する必要がある。また、反射鏡には、反射率を高めるために多層膜コーティングを施す必要がある。EUV 光が多層膜ミラーで反射する場合、多層膜干渉効果の影響により、反射波面の位相は入射角に依存して大きく変化する。一方、測定の容易さから、実用的には、可視・紫外光を利用した計測も併用される。可視光・紫外光は、多層膜の表面近傍で反射されるので、反射波面の位相は入射角に依存しない。したがって、一般には、露光波長 (EUV) による計測波面と可視・紫外光で

の計測波面は異なる。

図 1 は、NA 0.25, 6 枚系の EUV 投影光学系を、露光波長 ($\lambda=13.5$ nm) と紫外光 ($\lambda=266$ nm) で波面収差を測定した場合の差分波面の予測例である¹⁾。露光波長換算で 11.5 m λ (0.16 nm rms) の差異が発生しており、可視光による調整だけでは十分ではなく、露光波長での波面収差の検証は必須である。

2. 露光波長における波面収差評価技術

2.1 海外の状況

EUV リソグラフィーの露光波長波面計測技術は、1990 年代の初期に、米国 Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) において開発が始まった。1997 年に設立された EUV Limited Liability Co. (EUV-LLC) により、EUV リソグラフィーの開発が加速され、LBNL が担当した露光波長波面収差計測技術も長足の進歩を遂げた。以下、LBNL が開発した露光波長干渉計について解説する。

前述のように、極紫外領域では、利用できる光学素子に関する制約があり、実用的なレーザーがないため、可干渉距離が非常に短い光源しか利用できない。さらに、要求される精度が非常に厳しいため、要求を満たす物理的な参照面の製作は困難である。このような制約のもとで利用でき

*EUVA 波面計測研究室 (〒321-3298 宇都宮市清原工業団地 23-10)

**EUVA 波面計測研究室 (〒228-0828 相模原市麻溝台 1-10-1)

E-mail: hasegawa.masanobu@canon.co.jp

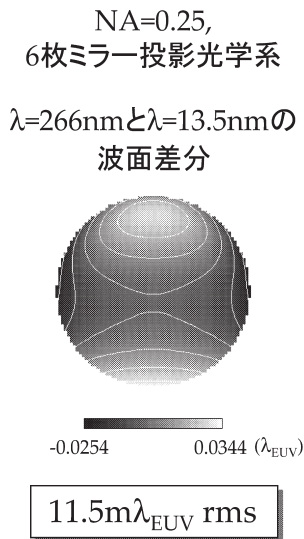


図1 露光波長干渉計と紫外光干渉計による計測波面の差分計算例。

る計測方法の候補は、光路差が小さい共通光路干渉計（コモンパス干渉計）でかつ参照面の不要な、点回折干渉計（point diffraction interferometer: PDI）とシアリング干渉計（lateral shearing interferometer: LSI）である。

LBLNは、phase-shifting point diffraction interferometer (PS/PDI)²⁾と呼ばれる点回折干渉計と、cross-grating lateral shearing interferometer (CGLSI)³⁾と呼ばれるシアリング干渉計を開発した。PS/PDIは、回折限界 ($\lambda/(2NA)$) 以下の微小なピンホールから発生する理想に近い球面波を参照波面として利用しており、 $NA=0.1$ の光学系に対し、ピンホール射出波面の精度が $\lambda/200$ (0.065 nm) 以下であることが確かめられた⁴⁾。ピンホールサイズは、量産用のEUVステッパーの $NA (=0.25)$ に対しては直径30 nm以下となる。EUVの吸収が大きいニッケル (Ni) を用いた場合、ピンホールの板厚は120 nm以上が必要である。このような高アスペクト比のピンホールの製作に必要な、高度な技術も合わせて同研究所で開発している。

CGLSIは、いわゆるツールボット干渉計 (Talbot interferometer)⁵⁾ である。被検光学系から出たビーム光路中に、焦点面から d^2/λ (d は格子定数) 離れた位置に二次元回折格子を置くことで、撮像面に形成される高コントラスト干渉縞を利用するものである。形成される干渉縞は、 X, Y 2方向に横シアしたシアリング干渉縞になっており、これを解析することにより被検波面の波面を復元する。これら2つの干渉測定方式は、 $NA=0.3$ の露光実験機 (micro exposure tool: MET)⁶⁾ のアライメントに利用された。

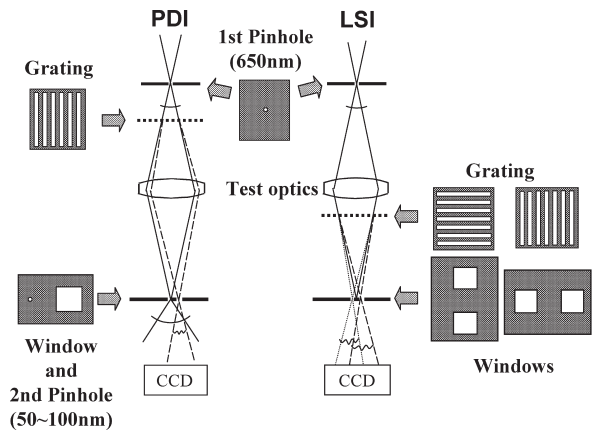


図2 PDIとLSIの測定原理。

2.2 国内の開発状況

国内では、1998年よりASETのEUV研究室で、LBLNと同じPDIを中心にして基礎研究が始まった⁷⁾。2002年にはNEDOの基盤技術研究促進事業に採択され、現在は、EUV波面計測研究室で研究が進められている⁸⁾。

EUVでも、PDIとLSIの2つの干渉計を中心に検討を行っている。図2に、PDIおよびLSIの測定原理を示す。EUVでは、LBLNと異なり、回折格子によって波面を分割し、必要な次数を次数選択窓で選択するLSIを提案している⁹⁾。像面に置いた2つの窓によって+1次と-1次の回折光を選択して干渉させることで、良好なコントラストでシアリング干渉縞を得ることができる。

以上のような基本的なPDIおよびLSIのほかにも、さまざまな派生型の計測方法が考えられる。筆者らは、これら派生型も含めて、もっともよい計測方法を選択するために、6つの測定方法を比較検討することとした^{10,11)}。この比較を行うために、6つの測定モードで測定できる実験干渉計を構築した (図3)¹²⁾。この実験干渉計は、光源に兵庫県立大学のNewSUBARU放射光施設の長尺アンジュレーター (long undulator) を利用しており、装置は施設内に設置されている。各種の測定モードの切り替えは、光学素子を交換することによって実現している。

各測定モードの比較実験は現在実施中であるが¹³⁾、最近得られたPDIとLSIの結果について簡単に報告する。図4に、PDIとLSIで測定された結果を示す。図4(a), (b)はPDIおよびLSIで測定された結果である。また、(d)に、測定された収差の輪帯ツェルニク係数を示す。LSIでは非点収差が測定しにくいいため、図中でも非点収差は除いて評価している。それぞれの測定再現性は、0.05 nm rms程度と良好であった。図に示すように、まったく異なる測定原理を用いているにもかかわらず、測定された波面形状の形

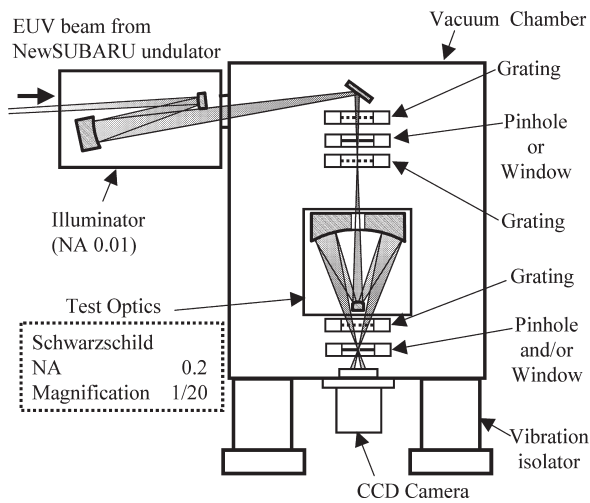


図3 実験干渉計.

はよく一致している。図4(c)に両者の差分を示す。両者の差分もまだ十分小さいとはいえないが、0.34 nm rms という一致精度が得られた。両者の差異を詳細に解析することで誤差要因を特定し、さらなる精度向上をねらいたい。

以上のように、未だ開発途上ではあるが、目標精度に近づきつつある。さらなる高精度化をはかることで、EUVリソグラフィー用投影光学系の高精度波面収差測定を実現させたい。

本稿では、極紫外線リソグラフィーにおける露光波長干渉計の開発状況について紹介した。EUVA波面計測プロジェクトは、基盤技術研究促進事業の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託により行われた。本研究にご助言およびサポートをいただいた兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の西部正人助教授およびスタッフの方々、および電気通信大学武田光夫教授に感謝いたします。また、本研究は、大内千種、岡田政志、加藤正磨、大滝桂、朱郁葱、柳志強、長谷川隆行、関根義之、大久保彰律の諸氏により遂行されています。

文 献

- 1) 関根義之ほか：“EUV投影光学系における多層膜の影響”，第63回応用物理学学会学術講演会講演予稿集(2002)p.638.
- 2) H. Medeck *et al.*: “Phase-shifting point diffraction interferometer,” *Opt. Lett.*, **21** (1996) 1526.

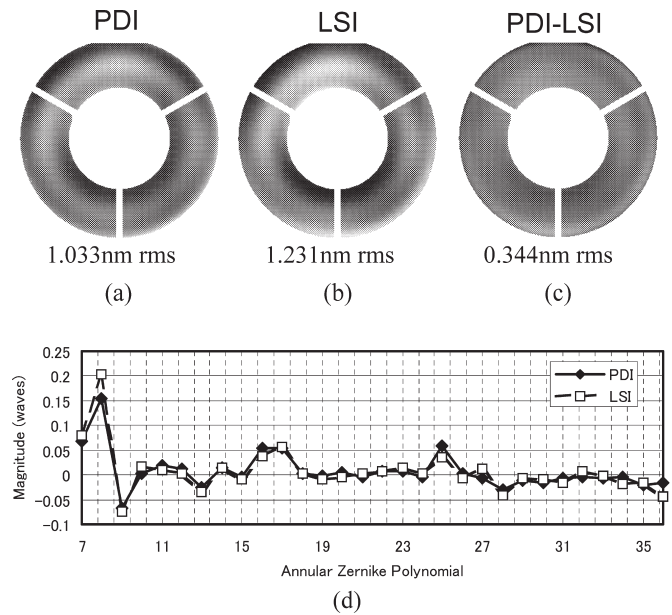


図4 PDIとLSIの比較.

- 3) P. Naulleau *et al.*: “Extreme ultraviolet carrier-frequency shearing interferometry of a lithographic four-mirror optical system,” *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18** (2000) 2939-2943.
- 4) K. A. Goldberg *et al.*: “Honing the accuracy of extreme ultraviolet optical system testing: At-wavelength and visible-light measurements of the ETS Set-2 projection optic,” *Proc. SPIE*, **4688** (2002) 329-337.
- 5) M. Takeda *et al.*: “Lateral aberration measurements with a digital Talbot interferometer,” *Appl. Opt.*, **11** (1984) 1760.
- 6) K. A. Goldberg *et al.*: “EUV interferometry of the 0.3 NA MET optic,” *Proc. SPIE*, **5037** (2003) 69-74.
- 7) K. Sugisaki *et al.*: “ASET development of at-wavelength phase-shifting point diffraction interferometer,” *Proc. SPIE*, **4688** (2002) 695-701.
- 8) 村上勝彦ほか：“ASETにおけるEUV波面計測技術開発計画”，第63回応用物理学学会学術講演会予稿集(2002)p.637.
- 9) Y. Zhu *et al.*: “Shearing interferometry for at wavelength wavefront measurement of extreme-ultraviolet lithography projection optics,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 5844-5847.
- 10) K. Murakami *et al.*: “Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes,” *Proc. SPIE*, **5037** (2003) 797-807.
- 11) Z. Liu *et al.*: “Double-grating lateral shearing interferometer for extreme ultraviolet lithography,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 3718-3721.
- 12) T. Hasegawa *et al.*: “EUV Wavefront Metrology System in EUVA,” *Proc. SPIE*, **5374** (2004) 797-807.
- 13) M. Hasegawa *et al.*: “Recent progress of EUV Wavefront Metrology in EUVA,” *Proc. SPIE 49th Annual Meeting*, **5533** (2004) 27-36.

(2004年10月16日受理)