

EUV-Lithographie- eine Herausforderung für die interferometrische Messtechnik

Günther Seitz, Stefan Schulte, Udo Dinger

Carl Zeiss SMT AG, 73446 Oberkochen

<mailto:g.seitz@zeiss.de>

Die EUV-Lithographie stellt extreme Anforderungen an Projektions-Optiken und Prüftechnik. Dieser Artikel gibt eine Übersicht über Probleme und Lösungen bei der interferometrischen Absolutmessung asphärischer EUV-Spiegel.

1 Einführung

Für Strahlung der Wellenlänge $\lambda=13.4$ nm sind keine optischen Materialien ausreichender Transparenz verfügbar. Daher müssen EUV-Objektive grundsätzlich als Spiegel-Systeme ausgelegt werden.

Abb. 2 zeigt ein EUV-Objektiv-Design mit 6 Spiegeln. Es handelt sich hier um ein Ringfeld-System mit einem Bildfeld von 26×2 mm². Eingesetzt werden hier ausschließlich außeraxiale Asphären mit Asphäritäten ≤ 20 μ m.

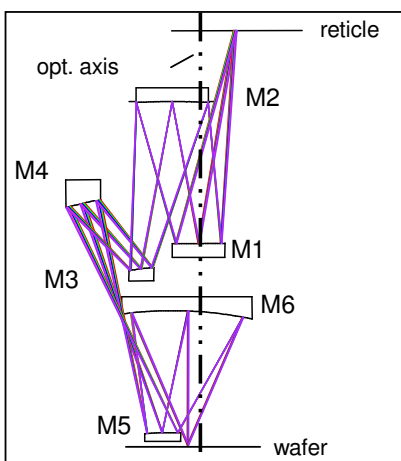


Abb. 1 EUV-Projektions-Objektiv (typisches Beispiel)

2 Anforderungen

Beugungsbegrenzte Abbildung erfordert Erfüllung des Maréchal-Kriteriums. Für den rms-Wellenfront-Fehler E_{AP} in der Austritts-Pupille des abbildenden Systems ist also zu fordern:

$$E_{AP} \leq \frac{\lambda}{14} \quad (rms)$$

Betrachtet man diesen Wellenfront-Fehler als Summe aller Spiegel-Fehler, so ist von jedem dieser 6 asphärischen Spiegel eine Oberflächen-Genauigkeit von besser als 0.2 nm rms zu fordern !

Derartige Absolut-Genauigkeiten können auf Flächen makroskopischer Dimensionen nur mit interferometrischer Messtechnik erreicht werden.

3 Fehler bei der interferometrischen Asphären-Messung

Abb. 2 skizziert die wesentlichen Komponenten einer interferometrischen Anordnung zur Asphären-Messung. Ein Kompensations-System passt die vom Interferometer ausgehende ebene Wellenfront an die Oberflächen-Form der Asphäre an. Diese Wellenfront wird von der Asphäre reflektiert und nach abermaligem Durchlaufen des K-Systems vom Interferometer gemessen. In vielen Fällen ist jedoch eine perfekte Anpassung der Interferometer-Wellenfront an die Asphäre nicht möglich. Die zum Interferometer zurückpropagierende, sog. Rest-Wellenfront W_R , ist daher nicht eben und zeigt eine mehr oder weniger große Welligkeit.

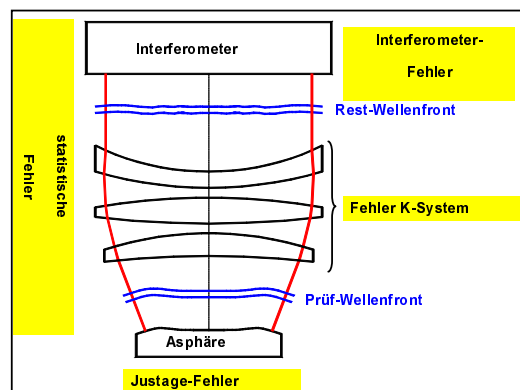


Abb. 2 Fehler bei der interferometrischen Asphären-Messung.

3.1 statistische Fehler

3.1.1 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit einer Oberflächen-Messung erhält man durch Differenzbildung zweier, voneinander unabhängig durchgeführter Messungen, wobei die Asphäre zwischen beiden Messungen in ihrem Justagezustand im Interferometer verbleibt. Zurückzuführen ist dieses „Messrauschen“ auf Luftschlieren, Laser Speckle, sowie Kamera-Rauschen. Erreicht werden hier Reproduzierbarkeiten von bis zu 30 pm RMS Oberfläche.

3.1.2 Wiederholbarkeit

Die Wiederholbarkeit wird analog zur Reproduzierbarkeit ermittelt, wobei jedoch die Asphäre zwischen beiden Messungen aus dem Interferometer entnommen und neu justiert wird. Erfasst werden damit insbesondere Veränderungen der Asphären-Oberfläche, hervorgerufen durch die veränderten Kräfte-Einwirkungen. Erreicht werden hier Wiederholbarkeiten von bis zu 50 pm RMS Oberfläche.

3.2 systematische Fehler

3.2.1 Nicht rotationssymmetrische Fehler

Zur Ausmittlung der nicht rotationssymmetrischen Fehler misst man die Asphäre in N Drehstellungen. Die Messdaten werden im Auswerte-Rechner zurückgedreht und aufgemittelt. (s. Abb. 3) Ausgemittelt werden dadurch alle nicht rotationssymmetrischen Fehler von Interferometer- und K-System bis auf ganzzahlige Vielfache der Azimutal-Ordnung N, also $k \cdot N$ mit $k \in \mathbb{N}$.

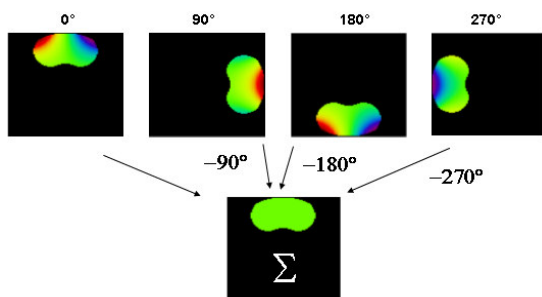


Abb. 3 Ausmittlung nicht rotationssymmetrischer Fehler von Interferometer/K-System bei $N=4$ Drehstellungen

3.2.2 Rotationssymmetrische Fehler

3.2.2.1 Fehler K-System

Die rotationssymmetrischen Fehler des K-Systems gehen auf die Messfehler bei der Qualifizierung des K-Systems zurück, wobei sich die erreichten Messgenauigkeiten typischerweise in folgenden Größenordnungen bewegen:

Krümmungs-Radien	$\Delta R/R^2 \leq 10^{-7}/\text{mm}$
Mittendicken:	1 μm
Luft-Abstände	2 μm
Brechzahl	$\Delta n \leq 5 \cdot 10^{-6}$
Oberflächen-Form	0.1 nm RMS

Tab. 1 Typische Messgenauigkeiten bei der Qualifizierung von K-Systemen

3.2.2.2 Interferometer-Fehler

Linearer Fehler: Das Interferometer wird durch Messung eines Plan-Kalibrier-Normals bekannter Oberfläche im Parallelstrahlengang kalibriert. Die dabei erreichte Genauigkeit ist durch die Genauigkeit des Kalibrier-Normals gegeben. Erreicht werden hier Genauigkeiten von 0.1 nm rms.

Fehler durch Abbildungs-Maßstab: Der Abbildungs-Maßstab β des Interferometers ist nur mit einer Genauigkeit $\Delta\beta$ bekannt, weshalb die Rest-Welle mit entsprechend fehlerhafter Lateral-Koordinate gemessen wird. Das führt zu was zu einem Mess-Fehler proportional zu $\Delta\beta/\beta$. Mit unserem derzeit eingesetzten Verfahren erreichen wir hier Genauigkeiten von $\Delta\beta/\beta \leq 10^{-5}$.

Retrace-Error: Das Interferometer wurde mit einer planen Wellenfront kalibriert, misst jedoch eine Rest-Wellenfront W_R endlicher Welligkeit. Daraus resultiert ein Fehler E_{iR} , proportional zum Quadrat des maximalen Restweller-Gradienten:

$$E_{iR} \sim \left(\max \left(\frac{d}{dr} W_R(r) \right) \right)^2$$

Bei einem nach üblichen Toleranzen qualifizierten Interferometer beträgt dieser Retrace-Error unter Annahme einer Restwelle von 100 nm Z9 (Zernike-Koeff.) etwa 0.1 nm rms Wellenfront.

4 Ergebnisse

Eine „kooperative“, d. h. gut kompensierbaren Asphäre kann so mit einem Absolut-Fehler von nur 0.16 nm RMS gemessen werden.

Überprüft wurde das an einer Asphäre (konvex, CA: 54 mm, Asphärität 3.8 μm) durch Vergleichsmessungen am Lawrence Livermore National Lab (LLNL). Diese Messungen wurden mit einem Point-Diffraction-Interferometer durchgeführt. Dabei ergab sich eine Übereinstimmung der Ergebnisse von 0.25 nm rms, wie in Abb. 4 dargestellt. Unter der Annahme statistischer Unabhängigkeit der Fehler beider Interferometer kann so ein Interferometer-Fehler von nur 0.18 nm rms angegeben werden.

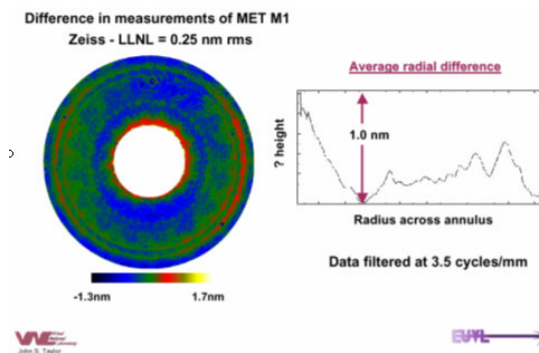


Abb. 4 Differenz der Messungen LLNL/Carl Zeiss

Literatur

- [1] J. S. Taylor, G. E. Sommargren, D. W. Phillion, S. L. Baker, D. W. Sweeney, E. M. Gullikson, U. Dinger, G. Seitz, P. Kuerz, R. M. Hudyma, „Fabrication and metrology of high-NA imaging optics for the EUV micro-exposure tool (MET)“, 3rd International workshop on EUV Lithography, Matsue, Japan (2001), paper O 4-1