

# Strukturbreitenmessungen an einer phasenschiebenden Photomaske mittels verbessertem DUV-Scatterometer

Matthias Wurm, Stefanie Bonifer, Bernd Bodermann

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

[mailto: matthias.wurm@ptb.de](mailto:matthias.wurm@ptb.de)

Das DUV-Scatterometer der PTB wurde hinsichtlich des Dynamikbereichs, der Linearität und des Auswerteverfahrens zur Bestimmung der zu messenden Beugungseffizienzen weiterentwickelt. Ergebnisse, die mit dem Gerät an einer MoSi-Photomaske erzielt wurden, werden mit Messergebnissen zweier Messgeräte des AMTCs verglichen.

## 1 Einführung

Optische Scatterometer sind schnelle und nichtinvasive Messverfahren und daher sehr gut geeignet zur Charakterisierung dimensioneller Struktureigenschaften, welche essentiell sind zur Evaluierung der Abbildungsqualität einer Photomaske im Lithographieprozess.

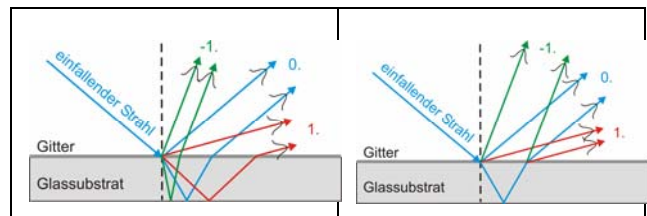
In der PTB wurde für Untersuchungen an Photomasken ein goniometrisches Scatterometer entwickelt und aufgebaut [1]. Es wird standardmäßig im tiefen UV (DUV) bei einer Wellenlänge von 193 nm unter Verwendung eines frequenzvervierfachen Ti:Sa-Lasers betrieben.

Mit diesem System wurden Messungen von Strukturbreiten (CD, critical dimension) auf einer phasenschiebenden MoSi-Photomaske durchgeführt. Es wurde damit insbesondere die Variation nominell gleicher Strukturbreiten in verschiedenen Feldern auf der Maske charakterisiert. Die Ergebnisse dieser Messungen werden präsentiert und verglichen mit Messergebnissen, die am Advanced Mask Technology Center (AMTC) in Dresden mittels eines kommerziellen spektroskopischen Scatterometers (n&k 5700-CDRT) sowie eines elektronenmikroskopischen Strukturbreitenmesssystems erzielt wurden.

## 2 Systemverbesserungen

In [1] und [2] wurde das DUV-Scatterometer der PTB ausführlich vorgestellt. Das Messprinzip beruht darauf, dass die Beugungseffizienzen von 1D-Gitterstrukturen vermessen werden und aus diesen dann auf die zugrundeliegende Struktur zurück geschlossen werden kann. Dazu gilt es das sogenannte inverse Beugungsproblem zu lösen. Um ein eindeutiges Ergebnis zu erzielen wird eine hohe Redundanz innerhalb der Messdaten benötigt, die durch eine Variation der Messparameter (z.B. Einfallswinkel, Polarisation) erreicht wird. Zur Auswertung wird DiPoG, ein finite-elementebasiertes Programm zur Lösung der Maxwell-

Gleichungen, benutzt, welches verschiedene Optimierungsalgorithmen implementiert hat.



**Abb. 1** Fehler erster Ordnung durch parasitäre Rückreflexe. a) Die transmittierten Beugungsordnungen werden wieder in den oberen Halbraum zurückreflektiert. b) Die transmittierte 0. Beugungsordnung erzeugt nach der Reflexion ein zusätzliches Beugungsmuster. Für die Störung der transmittierten Beugungsordnungen gilt Analoges.

Die Bestimmung der Beugungseffizienzen stellt die messtechnische Aufgabe dar. Bei der Untersuchung von Photomasken oder anderen Proben mit transparentem Substrat gilt es dabei den Einfluss von parasitären Reflexen, die an der Rückseite des Substrats entstehen, zu minimieren (siehe Abb. 1). Diese Minimierung erfolgt hierbei durch:

1. die Verwendung von p-polarisierter Strahlung, wodurch die Reflexintensität über einen großen Winkelbereich gering gehalten wird.
2. Vermeidung von Einfallswinkeln, die der Gleichung  $\theta_{in,m} = \sin^{-1}(m\lambda/p)$  genügen. Bei diesen Einfallswinkeln überlagert ein Störreflex das Messsignal komplett und ist räumlich nicht separierbar.
3. Einbeziehung der Störreflexe in die Fitfunktion für den Winkelscan und entsprechende Kompensation der parasitären Reflexe.

Bei der Nutzung eines gaußförmigen Eingangsstrahlprofils setzt sich die Fitfunktion (in NA-Koordinaten) aus der Summe von drei Gaußfunktionen (Messsignal und die in Abb. 2 erläuterten beiden Störreflexe) gefaltet mit der Spaltfunktion des Detektors zusammen. Die bestangepasste Amplitude für das Messsignal multipliziert mit dem Geometriefaktor  $\cos \theta_{in}$  ist dann nach Normierung

auf die Eingangsintensität ein Maß für die Beugungseffizienz.

Zur Detektion der Beugungsintensitäten werden zwei solar-blind Photomultiplier (PM) eingesetzt. Der eine dient zur Erfassung des Messsignal, der andere zur Referenzierung, um den Einfluss von Intensitätsfluktuationen des Lasers zu reduzieren. PMs weisen typischerweise über einen großen Bereich Sättigungseffekte auf und verhalten sich somit nur bedingt linear. Für die nachfolgenden Messungen wurden die PMs in einem Selbstkalibrierverfahren im Messsystem charakterisiert.

Mit einer zweistufigen Sättigungsfunktion gemäß Gleichung (1) können die Detektoren beschrieben werden.

$$I_{out} = I_{O_2} \left( 1 - \exp \left[ \frac{-U^{b_2}}{I_{O_2}} \cdot I_{O_1} \left( 1 - \exp \left[ \frac{-U^{b_1}}{I_{O_1}} \cdot I_{in} \right] \right) \right] \right) \quad (1)$$

$I_{O_1}$  und  $I_{O_2}$  sind dabei die Sättigungsniveaus,  $U$  die angelegte Spannung und  $b_1$  und  $b_2$  sind die Verstärkungskoeffizienten. Mit dieser Kalibrierung kann über einen Dynamikbereich von acht Größenordnungen gemessen werden.

### 3 Messergebnisse

Das DUV-Scatterometer wurde zur Bestimmung von Linienbreiten auf 72 nominell identischen Feldern einer phasenschiebenden MoSi-Maske eingesetzt. Die Messungen werden verglichen mit Daten des AMTC, die an derselben Maske mit einem Rasterelektronenmikroskop (CD-SEM) sowie einem spektroskopischen Scatterometer gemessen wurden [3]. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

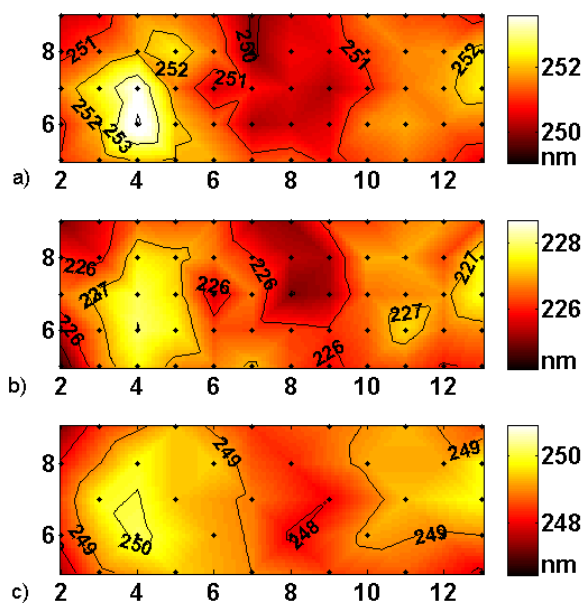
Der Vergleich der Messergebnisse zeigt, dass die beiden optischen Systeme sich im Mittelwert nur gering unterscheiden. Zu den elektronenmikroskopischen Ergebnissen beträgt der mittlere Abstand jedoch mehr als 20 nm. Hier muss angemerkt werden, dass das CD-SEM zwar mittels eines CD-Maskennormals kalibriert wurde, jedoch für einen anderen Maskentypen (Chrom-auf-Glas-Masken). Ein systematischer Offset-Fehler bei Nutzung mit einem anderen Maskentyp konnte daher erwartet werden.

Die Korrelation der Messergebnisse ist gut aber bei weitem nicht perfekt. Es wird beim Vergleich von Messgerät zu Messgerät jeweils ein Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von etwa 0.7 erzielt.

Den größten systematischen Fehlereinfluss auf die Messergebnisse hat sicherlich das verwendete Geometriemodell. Um die Messergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurde in allen Fällen das selbe Strukturmodell mit senkrechten Kan-

ten gewählt. Frühere Untersuchungen [2] haben jedoch bereits gezeigt, dass sich das Fit-Ergebnis verbessert, wenn der Kantenwinkel ebenfalls optimiert wird. Hierbei ergaben sich für die Kantenwinkel Werte im Bereich von  $84^\circ$ . Zudem weisen die Scatterogramme bei Annäherung an den Randbereich der Maske auf zunehmende Strukturasymmetrien hin, die noch nicht vollständig verstanden sind.

Da sich Strukturdetails (bzw. die Verwendung eines zu einfachen Strukturmodells) sehr unterschiedlich auf die verschiedenen Messsysteme auswirken, lassen sich die beobachteten verbleibenden kleinen Abweichungen sowie diese noch nicht optimale Korrelation der Ergebnisse sehr wahrscheinlich auf im Modell noch nicht erfasste Strukturdetails zurückführen. Eine weitere Verbesserung der Übereinstimmung der Messergebnisse wird bei Verwendung eines komplexeren Strukturmodells erwartet.



**Abb. 2** CD-Messungen an nominell identischen Feldern. Ergebnisse erzielte mit dem a) DUV-Scatterometer (PTB), b) CD-SEM und c) spektroskopischen Scatterometer.

### Literatur

- [1] M. Wurm et al., Rev. Sci. Instrum. **81** (2010), 2, 023701-1-023701-8
- [2] M. Wurm, S. Bonifer, B. Bodermann, *Deep ultraviolet (DUV) scatterometer for dimensional characterization of nanostructures: system improvements and test measurements*, Meas. Sci. Technol. (2011) in print
- [3] J. Richter, J. Rudolf, B. Bodermann, J. C. Lam, *Comparative scatterometric CD measurements on a MoSi photo mask using different metrology tools*, Proc. SPIE, 7122, 71222U-1 (2008)