

Charakterisierung von DOEs mittels DUV-Scatterometrie

Matthias Wurm*, Stefanie Bonifer*, Bernd Bodermann* und Michael Gerhard**
*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig
**Carl Zeiss SMT AG, Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Oberkochen
mailto:matthias.wurm@ptb.de

Durch vergleichende Messungen der optischen Wirkung von diffraktiven optischen Elementen (DOEs), die für Beleuchtungssysteme in der Halbleiterlithographie vorgesehen sind, können sowohl die Messgeräte als auch die DOEs selbst charakterisiert werden. Die Messungen wurden mit einem abbildenden und einem scatterometrischen Verfahren durchgeführt.

1 Einleitung

Die Güte optisch abbildender Systeme wird entscheidend bestimmt durch die Art und Qualität des Beleuchtungssystems. Streuscheiben und DOEs dienen hierbei häufig zur Strahlhomogenisierung und -formung (z. B. für strukturierte Beleuchtung). An die Beleuchtung von Belichtungssystemen (wafer steppern) oder optischen Messsystemen werden besonders hohe Anforderungen gestellt. Strahlformungselemente, die in solchen Systemen zum Einsatz kommen, erfordern eine hochgenaue funktionelle Charakterisierung bei der Arbeitswellenlänge. Bei der Carl Zeiss SMT und der PTB wurden zwei methodisch verschiedene Messsysteme zur Charakterisierung der Fernfelder optischer Strahlformungselemente aufgebaut. Zum Test dieser Messsysteme wurden vergleichende Messungen an verschiedenen derartigen Elementen durchgeführt.

2 Messplätze

Für Messungen an DOEs steht ein goniometrisches Scatterometer in der PTB [1] und ein abbildendes Messsystem bei Carl Zeiss SMT zur Verfügung. Bei Letzterem wird nach der Beleuchtung des DOEs das Fernfeld mittels einer Fourier-Linse auf einen 2D-CCD-Chip abgebildet. Der Dynamikbereich des Scatterometers umfasst sieben Größenordnungen. Die Winkelauflösung des Scatterometers ist durch die Strahltaile am Eintrittsspalt der Detektoreinheit gegeben und beträgt 0,26 mrad. Beide Systeme können u. a. für Messungen im tiefen UV (DUV) eingesetzt werden. Die im folgenden vorgestellten Messergebnisse wurden bei der Design-Wellenlänge der DOEs (193 nm) und bei senkrechter Inzidenz erzielt. Diese Konstellation entspricht dem Einsatzgebiet der DOEs in der Halbleiterlithographie.

3 Messergebnisse an einem Quadrupol-DOE

Die typische Fernfeldverteilung eines Quadrupol-DOEs ist in Abbildung 1 dargestellt. Von besonderem Interesse bei diesen Vergleichsmessungen ist

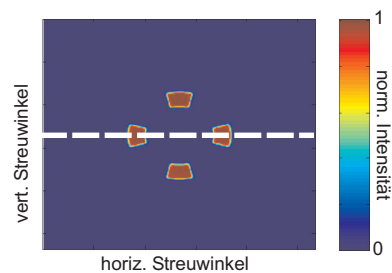


Abbildung 1 Quadrupol-DOE: Fernfeldmessung mit dem abbildenden System. Mit dem Scatterometer wurde entlang der gestrichelten Linie gemessen (nächste Abb.).

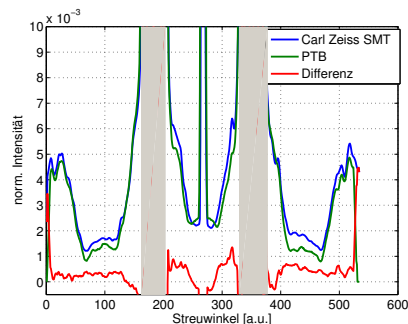


Abbildung 2 Quadrupol-DOE: Vergleich der Messergebnisse. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Polbereiche ausgegraut.

der Streulichtuntergrund zwischen den Polen, da er Aufschluss über systematische Einflüsse der Fourier-Linse auf das Messsignal liefert. Der Streulichtuntergrund besteht generell aus zwei Komponenten, die vom Messobjekt herrühren: Zum einen lässt sich auch theoretisch bei der Entwicklung eines DOEs eine gewisse Restintensität zwischen den Polen nicht verhindern. Dies würde ideale Bedingungen voraussetzen, die in der Realität nicht gegeben sind (unendlich ausgedehnte Beleuchtungswellenfront und DOE-Größe, absolute Monochromasie, unendliche Kohärenz). Zum anderen führen kleinste Fertigungsfehler zu einem weiteren Untergrundsignal. Die Summe beider Komponenten lässt sich mit dem Scatterometer direkt vermessen. Im ab-

bildenden System jedoch liefert die Fourier-Linse durch Oberflächen- und Volumenstreuung einen zusätzlichen Beitrag. Die Messergebnisse bestätigen die Erwartungen (Abb. 2): Im Bereich zwischen den Polen liegt das mit dem abbildenden System gemessene Signal im Mittel um 0,039 % (bezogen auf die mittlere Polintensität) über dem scatterometrisch gemessenen. Zudem liegen - wie erwartet - beide Messkurven etwas oberhalb der theoretischen Fernfeldverteilungskurve, die auf den Designdaten des DOEs basiert (nicht dargestellt).

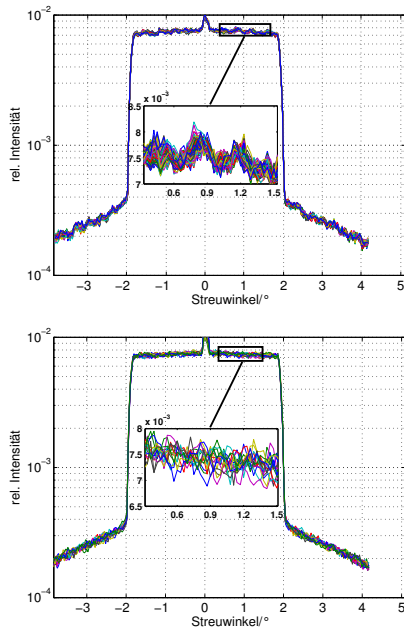


Abbildung 3 Fernfeldverteilungen bei Variation des Messpunktes. Oben: 64 Messpunkte innerhalb eines $1,25 \text{ mm}^2$ großen quadratischen Feldes. Unten: 16 zufällig gewählte Messpunkte.

4 Messergebnisse an einem Top-Hat-DOE

Anhand von Messungen an einem Top-Hat-DOE wurde die Messpositionsabhängigkeit auf die Fernfeldverteilung untersucht. Dazu wurden 64 Einzelmessungen in einem $1,25 \text{ mm}^2$ quadratischen Feld durchgeführt (Abb. 3 oben). Die gemessenen Signaturen sind weitestgehend unbeeinflusst von den gewählten Messpunkten. Insbesondere weisen sie keine Periodizität auf, wie es der Aufbau des DOEs nahe gelegt hätte. Bei zufällig über das gesamte DOE verteilten Messpunkten variieren die Signaturen jedoch sehr stark - bis $\pm 5\%$ (Abb. 3 unten). Daraus kann gefolgert werden, dass signifikante Änderungen der Fernfeldverteilungen erst ab Messpunktabständen auftreten, die größer sind als der Messfleckdurchmesser (3 mm). Genaueren Aufschluss über die Messpunktsabhängigkeit der Fernfeldverteilung liefert eine Intensitätsmessung bei festen Detektionswinkel und bei Variation der Messpunkte entlang einer Linie (Abb. 4). Dessen Ortsfrequenzamplitu-

denspektrum weist die Messkurve als $1/f$ -dominierte Verteilung aus. Es können keine markanten Ortsfrequenzen beobachtet werden. Dies wäre typisch, wenn sogenannte Stitching-Fehler bei der Herstellung des DOEs aufgetreten wären. Die spektrale Analyse des Messsignals bestätigt zudem, dass sich die Einzelmessungen auf sinnvolle Weise mitteln lassen. Abbildung 5 zeigt die gemittelten Fernfeldverteilungen von PTB und Carl Zeiss SMT in hervorragender Übereinstimmung. Es ist zu erwarten, dass durch Hinzunahme weitere Messpunkte die Fernfeldverteilung noch glatter wird. Dies entspräche dann der Fernfeldverteilung bei vollflächiger Ausleuchtung des DOEs.

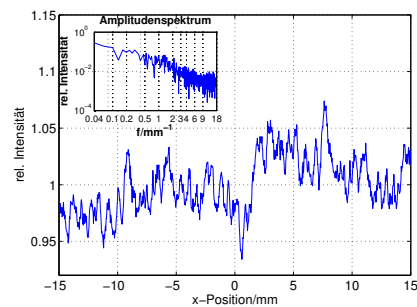


Abbildung 4 Intensität unter einem Detektionswinkel von $-0,9^\circ$ als Funktion des Messortes auf dem DOE.

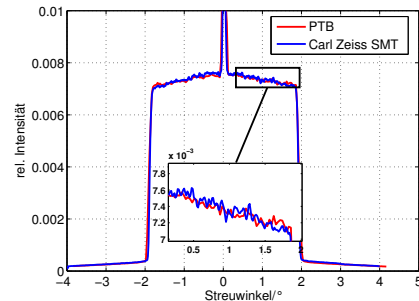


Abbildung 5 Vergleich der gemittelten Fernfeldverteilungen. Aufgenommen mit dem PTB-Scatterometer und am Carl Zeiss SMT Messplatz (16 bzw. 12 Einzelmessungen).

5 Fazit

Beide Messsysteme sind hervorragend geeignet zur hochgenauen Charakterisierung von DOEs bei 193 nm. Das abbildende System erlaubt schnelle 2D Messungen. Das Scatterometer bietet einen großen Dynamikbereich, eine hohe Winkelauflösung und vermeidet systeminhärentes Streulicht, da keine zusätzlichen Optiken benötigt werden.

Literatur

- [1] Matthias Wurm, Frank Pilarski and Bernd Bodermann, Rev. Sci. Instrum. **81** 023701 (2010)