

Fourier-Scatterometrie zur Charakterisierung von sub-Wellenlängen Zwei-Photonen-Polymerisations-strukturierten Kreuzgittern

Valeriano Ferreras Paz*, Sandy Peterhänsel*, Karsten Frenner*, Wolfgang Osten*, Kotaro Obata**, Aleksandr Ovsianikov**, Boris Chichkov**

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 9, 70569 Stuttgart

**Nanotechnology Department, Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, 30419 Hannover

mailto:ferreras@ito.uni-stuttgart.de

Die Methode der scannenden Weißlicht-Interferenz-Fourier-Scatterometrie und ihre Anwendung zur Charakterisierung von periodischen sub-lambda Gittern wird aufgezeigt. Dabei wird die Sensitivität der Methode bei verschiedenen Strukturparametern ermittelt sowie mit der klassischen Fourier-Scatterometrie in Simulation und ersten Messungen verglichen.

1 Einführung

In vielen technischen Anwendungen werden mittlerweile Strukturelemente mit Dimensionen unterhalb von 100 nm verwendet wie z.B. Strukturen aus der Halbleiterindustrie [1] aber auch photonische Kristalle und künstliches Gewebe. Ein Laserschreibverfahren, das praktisch beliebige 3D-Strukturierung in diesen Dimensionen erlaubt, ist die Zwei-Photonen-Polymerisation (2PP). Die Charakterisierung solcher Strukturen stellt die Messtechnik vor eine neue Herausforderung, da klassische Mikroskopie-Verfahren aufgrund der Abbeschen Auflösungsgrenze eine direkte Abbildung nicht mehr zulassen und andere Verfahren wie Elektronen- oder Rasterkraftmikroskopie zu aufwendig sind.

2 Scatterometrie

Die Scatterometrie hat sich in diesem Bereich als eine der wichtigsten Methoden etabliert. Sie wird dabei als Oberbegriff für mehrere indirekte (nichtabbildende) optische Messverfahren zur Rekonstruktion von periodischen Strukturen auch unterhalb der Abbeschen Auflösungsgrenze, verwendet. Das Prinzip beruht darauf, durch Vergleich von gemessenen und simulierten Spektren von polarisationsoptischen Größen die gewünschten Strukturparameter zu rekonstruieren [2]. Eine Form der Scatterometrie ist die sogenannte Fourier-Scatterometrie. Dabei wird die Probe durch ein hochaperturiges Mikroskop-Objektiv beleuchtet. Betrachtet wird dann die Pupillenebene des Objektivs. Dort enthält jeder Punkt die Beugungsinformation der zugehörigen Beleuchtungsrichtung. Somit ist es im Gegensatz zu anderen Scatterometrie-Anordnungen möglich, ohne einen mechanischen Scan die Beugungsinformation aus einem großen Winkelbereich in einer Aufnahme zu erfassen. Zur Rekonstruktion der Strukturparameter wird dann ein Vergleich von Messung und Simulation herangezogen. Die Fourier-Scatterometrie lässt sich durch Hinzunahme eines Referenz-

strahlengangs und Weißlicht um die Weißlicht-Interferometrie erweitern. In einem Interferenz-Aufbau nach Linnik interferieren dann die Pupillenebenen von Objekt- und Referenzstrahlengang und werden über eine Betrand-Linse auf eine CCD-Kamera abgebildet. Zusätzlich zur Beugungsinformation kann dadurch Information über die Phase gewonnen werden. Die Weißlicht-Interferenz wird verwendet um zusätzliche topographische Information zu erhalten. Das Prinzip dieser kombinierten Messmethode ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

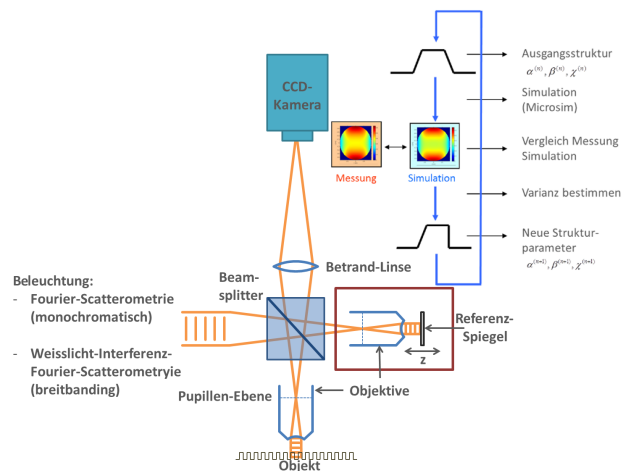


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Messprinzips der Weißlicht-Interferenz-Fourier-Scatterometrie

3 Simulationsbasierte Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe von Simulationen (MicroSim [3]) wurde die Anwendbarkeit der Methode für die Charakterisierung von verschiedenen Liniengittern untersucht: photosensitives (2pp strukturiertes) Material auf einem Glassubstrat, das selbe Material auf einem Silizium Substrat und Elektronenstrahl-strukturierter Resist auf Silizium. Die Linien hatten eine Breite (CD) von 50 bzw. 100 nm, einen Abstand (Pitch) von 100 bzw. 200 nm, eine Höhe von ebenfalls 100

nm und einen Seitenwandwinkel (SWA) von 87°. Mit Hilfe der Simulationen wurde dann die Empfindlichkeit der Methode auf Änderungen dieser Parameter untersucht. Es ist jedoch nicht nur nötig, dass die Methode empfindlich auf die Änderung der einzelnen Strukturparameter ist, sondern dass dabei die Messgrößen bei Änderung verschiedener Parameter möglichst wenig korrelieren. Nähere Details zur Definition der Sensitivität über die sogenannte 3 σ -Unsicherheiten bei der Parameterrekonstruktion sowie die Definition der zugehörigen Kovarianzmatrix (Korrelationen), sind in [4] zu finden.

CD/Pitch [nm]	50 / 100		100 / 200	
Methode	FS	SWL	FS	SWL
CD [nm]	0.032	0.038	0.061	0.074
Höhe [nm]	0.164	0.050	0.071	0.055
SWA [°]	0.162	0.138	0.122	0.287

Tabelle 1 Sensitivität (3 σ -Unsicherheiten)

Parameter	CD		Höhe	
CD/Pitch [nm]	100 / 200		100 / 200	
Methode	FS	SWL	FS	SWL
CD [nm]	1.00	1.00	-0.87	-0.15
Höhe [nm]	-0.87	-0.15	1.00	1.00
SWA [°]	0.85	-0.12	-0.92	-0.86

Tabelle 2 Parameter-Korrelationen (Kovarianz-Matrix)

In Tab. 1 und 2 sind nun die Ergebnisse für die Methode der scannenden Weißlicht-Interferenz-Fourier-Scatterometrie (SWL, grün) und der klassischen Fourier-Scatterometrie (FS, gelb) für eine Simulation an einem Liniengitter aus photosensitivem Material (2pp-strukturiert) auf Silizium aufgelistet. Die Ergebnisse lassen sich prinzipiell auch auf die anderen untersuchten Strukturtypen übertragen. Die SWL-FS zeigt größtenteils ähnliche Sensitivitäten wie die FS, ist jedoch deutlich empfindlicher auf Höhenvariationen und zeigt stark reduzierte Parameterkorrelationen von CD/Höhe und CD/SWA (rot hervorgehoben). Bei durchsichtigen Substraten ist aufgrund der reduzierten reflektierten Intensität kein Sensitivitätsgewinn zu verbuchen.

4 Experimentelle Realisierung

Zur Verifikation der aus den Simulationen gewonnenen Erkenntnissen, wurde ein Messaufbau realisiert [4]. In einem ersten Schritt wurden damit die Pupillenbilder bei verschiedenen Positionen des Referenzspiegels aufgenommen und mit den Simulationen verglichen (Abb. 2 und 3). Als Objekt diente dabei ein Liniengitter das mit Elektronenstrahlolithographie mit einer CD von 200 nm und einer Periode von 400 nm geschrieben wurde. Die Bilder zeigen bereits eine gute Übereinstimmung, jedoch sind die Unterschiede noch zu groß um eine Rekonstruktion aus einer Bibliothekssuche durch Vergleich von Messung und Simulation durchzuführen. Weitere Kalibrierschritte werden dazu nötig sein.

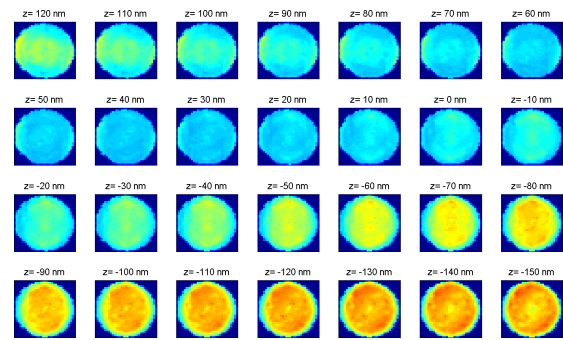


Abbildung 2 gemessene Pupillenbilder bei einem Scan des Referenzspiegels (z-Position)

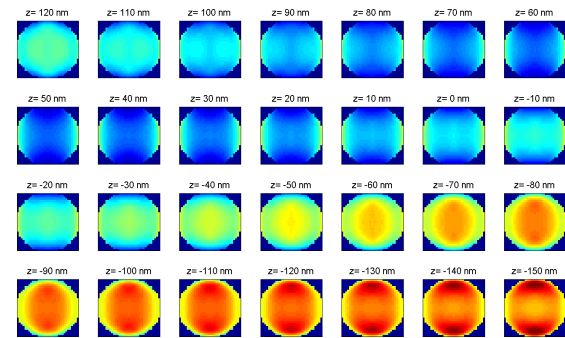


Abbildung 3 simulierte Pupillenbilder bei einem Scan des Referenzspiegels (z-Position)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination von Weißlichtinterferometrie und Fourier-Scatterometrie erweist sich als eine gute Alternative zu anderen scatterometrischen Methoden. Sie zeigt eine deutlich höhere Empfindlichkeit auf die Topographie/Höhe der Struktur sowie geringere Parameterkorrelationen als die klassische Fourier-Scatterometrie. Im weiteren Verlauf des Projektes wird die experimentelle Verifikation der Rekonstruierbarkeit der Strukturparameter angestrebt.

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung dieser Arbeiten im Rahmen des Schwerpunktprogrammes SPP1327 "Optisch erzeugte Sub-100 nm Strukturen für biomedizinische und technische Applikationen".

Literatur

- [1] W. Osten, V. Ferreras Paz, K. Frenner, T. Schuster, and H. Bloess, "Simulations of Scatterometry Down to 22 nm Structure Sizes and Beyond with Special Emphasis on LER," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1173, pp. 371–378 (AIP, 2009).
- [2] C. J. Raymond, *Scatterometry for Semiconductor Metrology*, pp. 477–513 (CRC Press, 2001).
- [3] M. Totzeck, "Numerical simulation of high-NA quantitative polarization microscopy and corresponding near-fields," *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* **112**(9), 399–406 (2001).
- [4] V. Ferreras Paz, S. Peterhänsel, K. Frenner, W. Osten, A. Ovsianikov, K. Obata, and B. Chichkov, "Depth sensitive Fourier-Scatterometry for the characterization of sub-100 nm periodic structures," *Proceedings of SPIE* **8083**, 80,830M–80,830M–9 (2011).