

Polarisationsmikroskopie im DUV

N. Kerwien, J. Kauffmann, S. Meining, W. Osten, H. Tiziani

Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

<mailto:kerwien@ito.uni-stuttgart.de>

Die Oberflächeninspektion im tiefen UV findet ein immer breiteres Anwendungsfeld. Wir stellen ein Mikroskop vor, mit dem polarisationsoptische Messmethoden für die hochauflösende optische Metrologie im DUV bei $\lambda = 248$ nm realisiert werden können. Anhand von Messungen an Siliziumstrukturen wird der Einfluss der kurzen Wellenlänge und die Rolle der Polarisation auf die optische Bildentstehung im DUV diskutiert.

1 Einführung

Die Verkürzung der Wellenlänge in der optischen Metrologie vom sichtbaren in den tiefen ultravioletten Spektralbereich (DUV) ist nicht nur mit einem gesteigerten Auflösungsvermögen verknüpft, sondern vielmehr ändern sich bei diesen Wellenlängen auch die für die Bildentstehung verantwortlichen Kontrastmechanismen signifikant. Dies trifft im besonderen Maße auch für die Polarisations-eigenschaften des Lichtwellenfeldes zu. Ursache hierfür ist der sich stark ändernde Dispersionsverlauf vieler Materialien im DUV, da in diesem Bereich häufig Absorptionsresonanzen durchlaufen werden [1]. Ein bekanntes Beispiel ist Silizium, dessen dielektrischer Charakter im Infraroten und Sichtbaren bei Verkürzung der Wellenlänge in den DUV-Bereich zunehmend einem metallischen Verhalten weicht. Dies wiederum hat zu Folge, dass Polarisations-effekte für die optische Bildentstehung im Allgemeinen und damit für die Metrologie im Speziellen an Bedeutung gewinnen, was sich in starken Polarisationsabhängigkeiten bei der Linienbreitenmessung niederschlägt. Bei kürzeren Wellenlängen nimmt darüber hinaus die Streuempfindlichkeit deutlich zu, was sich ebenfalls auf die Polarisations-eigenschaften auswirkt. Im Folgenden soll anhand polarimetrischer Messungen der Einfluss der Polarisation auf die mikroskopische Bildentstehung im DUV demonstriert werden. Der zweite Abschnitt skizziert den verwendeten Aufbau, im dritten Abschnitt werden polarimetrische Messungen an Silizium vorgestellt.

2 Experimenteller Aufbau und Messprinzip

Basis des verwendeten Messsystems ist ein Leica DM RXE-Stativ, das für $\lambda = 248$ nm umgerüstet wurde. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau. Als Lichtquelle dient eine Quecksilber-Xenon Mischgaslampe mit nachfolgendem Monochromator ($\lambda = 248$ nm, $\Delta\lambda = 5$ nm). Im extern zugänglichen Köhlerschen Beleuchtungsstrahlengang befindet sich neben einer anpassbaren Aperturblinde eine Einheit zur Einstellung des Eingangspola-

risationszustandes der Beleuchtung. Da gängige polarisationsoptische Komponenten wie Folienpolarisatoren und Flüssigkristallphasenschieber, die in bisherigen Experimenten im VIS zum Einsatz kamen [2,3], im DUV nicht mehr verwendbar sind, wurde auf einen Glan-Thompson-Polarisator mit nachfolgendem, drehbarem $\lambda/4$ -Plättchen zurückgegriffen.

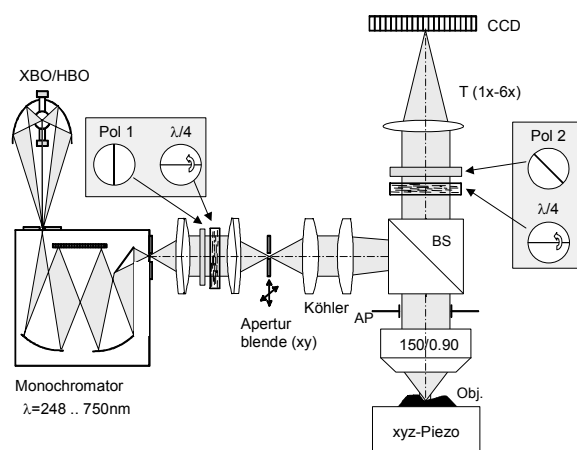


Abb. 1: Polarisationsoptischer Aufbau im DUV.

Die Abbildung erfolgt über ein Leica DUV-Objektiv 150x/0.9. Die Nachvergrößerung ist in Stufen zwischen 1x und 6x wählbar. Der Polarisationszustand des vom Objekt ausgehenden Lichtwellenfeldes wird nach dem PSCA-Prinzip (Polarisator-Sample-Compensator-Analyser) in Kombination mit einem fourieranalytischen Verfahren vermessen [4,5]. Hierbei wird eine Sequenz von Bildern für unterschiedliche Stellungen eines über einen Drehtisch ansteuerbaren $\lambda/4$ -Retarders mit nachfolgendem Polarisator im Abbildungsstrahlengang aufgenommen. Die pixelweise Auswertung des Bilderstapels führt auf ein lineares Gleichungssystem, dessen Lösung die orts aufgelöste Kohärenzmatrix (Gleichung 1) liefert. Im Grenzfall hoher Vergrößerungen, wie sie in der hochauflösenden Mikroskopie vorherrschen, beschreibt die 2D-Kohärenzmatrix den partiell kohärenten Polarisationszustand des von der untersuchten Struktur ausgehenden Lichtwellenfeldes vollständig. Hier-

aus lassen sich unterschiedliche Größen (z.B. Polarisations- und Kohärenzgrad, relative Phase, etc.) ableiten [6], die für die optische Bildentstehung und deren quantitative Auswertung von Bedeutung sind.

$$\underline{J} = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle E_x E_x^* \rangle & \langle E_x E_y^* \rangle \\ \langle E_x^* E_y \rangle & \langle E_y E_y^* \rangle \end{pmatrix} \quad (1)$$

Auf Basis dieses Formalismus lassen sich polarisationsinduzierte Wechselwirkungseffekte in der hochauflösenden Mikroskopie innerhalb eines Messzyklus erfassen und deren Einfluss im mikroskopischen Bild verstehen und quantifizieren. Dies soll im folgenden Abschnitt anhand eines schmalen Grabens in Silizium demonstriert werden.

3 Messbeispiel

Bei der untersuchten Struktur handelt es sich um zwei breite, balkenförmige Erhebungen in Silizium (Höhe 160 nm), die durch einen 330 nm breiten Graben getrennt werden. Die Beleuchtung erfolgte linear polarisiert unter 45° relativ zur Grabenkante mit voller Apertur (NA = 0.9). Mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Verfahren wurde orts aufgelöst die Kohärenzmatrix \underline{J} bestimmt. In Abbildung 2 sind die Hauptdiagonalelemente von \underline{J} sowie die Gesamtintensität $I = J_{xx} + J_{yy}$ (zur besseren Vergleichbarkeit um den Faktor $\frac{1}{2}$ skaliert) längs eines Schnittes über die Doppelbalkenstruktur dargestellt.

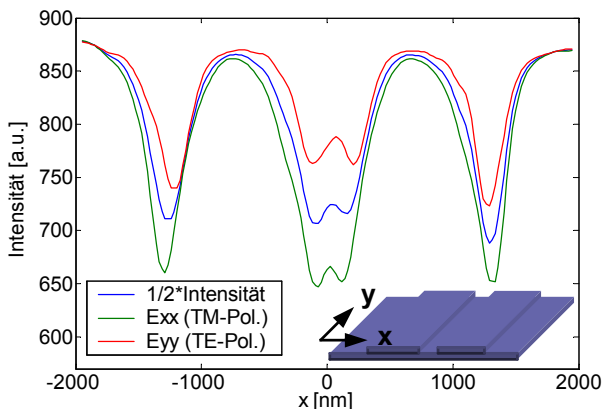


Abb. 2: Hauptdiagonalelemente der Kohärenzmatrix. Deutlich zu sehen ist die Abhängigkeit des Kontrastes der Kantenbilder sowie der Position der Intensitätsminima in Abhängigkeit von der Polarisation.

Wie der direkte Vergleich zeigt, kommt es aufgrund des unterschiedlichen Wechselwirkungsverhaltens der Eigenpolarisationen der Struktur zu deutlichen Abweichungen in den jeweiligen Intensitätsverläufen. So ergibt sich für TE-Polarisation ein geringerer Kontrast des Intensitätsprofils im Vergleich zur TM-Polarisation, was auf Verdrängungseffekte des TE-polarisierten Lichtes an den Siliziumflanken zurückzuführen ist. Diese Annahme wird durch die Tatsache untermauert, dass in

TE-Polarisation aufgrund der Kantenverdrängung und des Proximity-Effektes ein verringertes Eindringvermögen des Lichtes in die Grabenstruktur resultiert. Dies reduziert im Vergleich zu den singulären Kanten weiter den Kontrast. In TM-Polarisation hingegen ist dieser Effekt deutlich weniger ausgeprägt. Das unterschiedliche Wechselwirkungsverhalten ist auch die Ursache für die differierenden Positionen der Intensitätsminima, die üblicherweise zur Kantendetektion reiner Phasenobjekte herangezogen werden. Sie weichen im vorliegenden Fall um ca. 50 nm voneinander ab, was eine polarisationsabhängige Variation der Linienbreitenmessung um ca. 100 nm bedeutet.

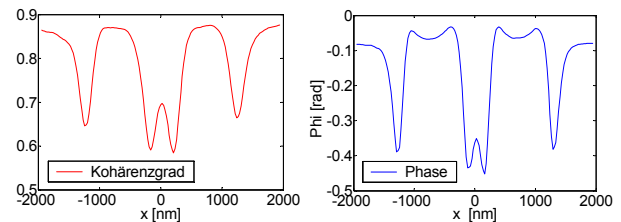


Abb. 3: Nebendiagonalelement J_{xy} . Links: Kohärenzgrad, rechts: Effektive relative Phasendifferenz.

Neben dem reinen (polarisationsabhängigen) Intensitätsprofil, das von den Hauptdiagonalelementen von \underline{J} repräsentiert wird, können insbesondere auch die Nebendiagonalelemente der Kohärenzmatrix für die quantitative Bildinterpretation und optische Metrologie herangezogen werden. Als Maß für die wechselseitige Korrelation der Polarisationszustände in x- und y-Richtung spiegeln sie direkt die Unterschiede im Wechselwirkungsverhalten der (Eigen-) Polarisationen mit der Struktur wider und sind daher auch im optischen Bild an einzelnen Strukturmerkmalen lokalisiert. Abbildung 3 zeigt die relative Phasenretardierung der Eigenpolarisationen, sowie den Kohärenzgrad, der die depolarisierende Wirkung der Strukturkanten im optischen Bild deutlich macht.

Literatur

- [1] P.Y. Yu, M. Cardona, "Fundamentals of Semiconductors", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1996.
- [2] M. Totzeck, H. Jacobsen, H.J. Tiziani, "Edge localization of sub-wavelength structures using polarization interferometry and extreme-value criteria", Applied Optics 39, 6295-6305 (2000).
- [3] N. Kerwien, E. Rosenthal, M. Totzeck, W. Osten, H.J. Tiziani, "Mueller matrix microscopy for high-resolution inspection of 2D-microstructures", EOS Topical Meeting Advanced Imaging Techniques, Delft 2003.
- [4] R.M.A. Azzam, N.M. Bashara, "Ellipsometry and Polarized Light", North Holland Publishing Company, Amsterdam 1977.
- [5] G.G. Fuller, "Optical Rheometry of Complex Fluids", Oxford University Press, New York 1995.
- [6] M. Born, E. Wolf, "Principles of Optics", 7th Edition, Cambridge University Press, Cambridge 1999.