

# Entwicklung eines Müller-Matrix-Mikroskops für Messungen an Einzelstrukturen

Jana Grundmann, Tim Käseberg, Bernd Bodermann

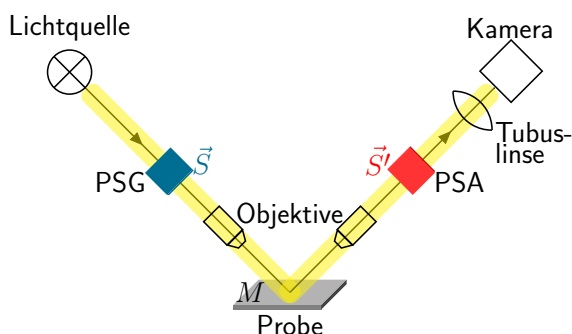
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany

mailto:jana.grundmann@ptb.de

Ein Müller-Matrix-Mikroskop ist für abbildende ellipsometrische Messungen in Reflexion und Transmission entwickelt worden. Ein solches Gerät kann im Vergleich zu einem nicht abbildenden Ellipsometer nicht-periodische Strukturen untersuchen, die deutlich kleiner als die Beleuchtungspunktgröße sind. Erste Messungen an Einzelstrukturen zeigen vielversprechende Ergebnisse.

## 1 Einleitung

In einem herkömmlichen Müller-Matrix-Ellipsometer wird die zu untersuchende Probe mit Licht eines bekannten Polarisationszustands beleuchtet. Die Änderung des Polarisationszustands bei der Reflexion oder Transmission des Lichts an der Probe wird gemessen und analysiert, um auf diese Weise die optischen Eigenschaften der Struktur zu analysieren. Die Polarisationszustände des einfallenden und des reflektierten Lichts werden über die Stokes-Vektoren  $\vec{S}$  und  $\vec{S}'$  dargestellt und die Transformation der beiden Vektoren mit der Müller-Matrix  $M$  beschrieben:  $\vec{S}' = M\vec{S}$  [1]. Mit einem solchen Ellipsometer können insbesondere auch die Größen von periodischen Nanostrukturen bestimmt werden, wobei für die Auswertung des Signals über die gesamte Beleuchtungspunktgröße auf der Probe integriert wird.



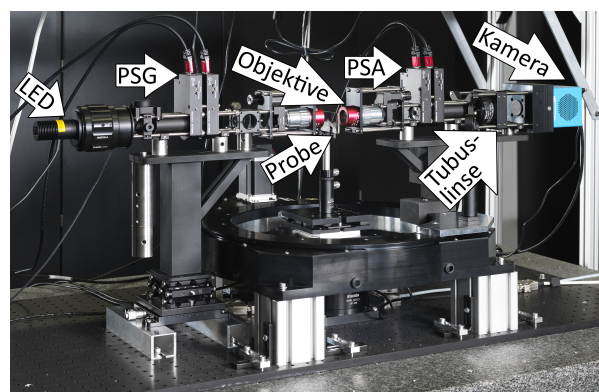
**Abb. 1** Prinzipskizze eines abbildenden Müller-Matrix-Ellipsometers in Reflexion, PSG: polarization state generator, PSA: polarization state analyzer

Durch Kombination eines Müller-Matrix-Ellipsometers mit den Bestandteilen eines Licht-Mikroskops, entsteht ein abbildendes Müller-Matrix-Ellipsometer (IMME) und durch Implementation einer senkrechten Beleuchtungs- und Abbildungsgeometrie auch der Spezialfall eines Müller-Matrix-Mikroskops (MMM). Die Prinzipskizze eines IMME ist in Abb. 1 dargestellt. Mit einem solchen Gerät wird die Müller-Matrix pixelweise bestimmt, wodurch kleinere Strukturen als die Beleuchtungspunktgröße und nicht-

periodische Strukturen analysiert werden können.

## 2 Aufbau des Müller-Matrix-Mikroskops

Der realisierte Aufbau des als MMM nutzbaren IMME ist in Abb. 2 dargestellt und besteht aus einer Beleuchtungs- und einer Analyse-Seite. Auf der Beleuchtungs-Seite befinden sich als Strahlungsquelle eine LED mit einem Kollimator, der aus einem Polarisator und einer  $\lambda/4$ -Platte bestehende Polarization State Generator (PSG) sowie ein als Kondensor fungierendes Objektiv. Die Analyse-Seite besteht aus einem Objektiv, dem aus einer  $\lambda/4$ -Platte und einem Polarisator bestehenden Polarization State Analyzer (PSA), einer Tubuslinse und der Kamera. Die Analyse-Seite sowie die Probe befinden sich jeweils auf einem Rotationsversteller, sodass das Gerät im Einfallswinkelbereich  $37,5^\circ$  bis  $90^\circ$  als IMME, aber auch, wie im Bild dargestellt, im Transmissions-Modus sowie in normaler Inzidenz in Reflexion als MMM genutzt werden kann.



**Abb. 2** Foto des aufgebauten Müller-Matrix-Mikroskops

Bei dem hier realisierten System handelt es sich um eine dual-retarder compensator Konfiguration. Während einer Messung drehen sich die beiden  $\lambda/4$ -Platten mit unterschiedlichen, aber harmonischen Winkelschritten, wodurch das gemessene Signal moduliert wird. Dabei dreht sich die  $\lambda/4$ -Platte des PSA pro Schritt fünfmal so weit wie die des PSG. Alle  $5^\circ$  der vorderen  $\lambda/4$ -Platte werden Daten

aufgenommen. Die Müller-Matrix wird anschließend durch eine Fourier-Analyse des gemessenen Signals berechnet [2].

### 3 Messungen an Einzelstrukturen

Bei den mit dem Müller-Matrix-Mikroskop untersuchten Einzelstrukturen handelt es sich um rechteckige PMMA-Strukturen mit einer Größe von  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  auf einem Silizium-Substrat. Aufgrund der kleinen Strukturgröße und einer nicht-periodischen Fortsetzung der Struktur ergibt sich bei herkömmlichen Ellipsometrie-Messungen kein signifikanter Unterschied in der Müller-Matrix zwischen Messungen an der Struktur und am Substrat. Aus diesem Grund wird hier die Müller-Matrix-Mikroskopie angewendet.

Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Abb. 3 dargestellt. Im  $m_{11}$ -Element wird hier der Ausschnitt des Kamerabildes dargestellt, der für die Auswertung verwendet wurde. In der Ellipsometrie werden alle Elemente der Müller-Matrix auf das  $m_{11}$ -Element normiert, weswegen in diesem Element keine weiteren Informationen durch das Ersetzen mit dem Kamerabild verloren gehen.

In einigen Elementen der Nebendiagonalen sind die Kanten der Strukturen durch unterschiedliche Polarisationszustände hervorgehoben. Mit diesem Messprinzip werden also lokale Polarisations-eigenschaften der Strukturen aufgezeigt, die eine zusätzliche Information über die Struktur liefern, die mit herkömmlicher Ellipsometrie nicht erhalten werden.

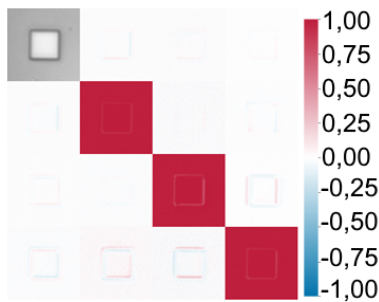


Abb. 3 Müller-Matrix-Bild der  $(5\ \mu\text{m})^2$  großen Struktur

Aufgrund von residualen Temperaturschwankungen während der Messung driftet die Struktur etwas. Das Ergebnis aus Abb. 3 ist daher einer Software-Korrektur für diese thermische Drift unterzogen worden. In Abb. 4 ist ein zeitlicher Verlauf über acht Stunden von der Temperatur im Laborraum und der x-,y-Position der untersuchten Struktur dargestellt. Die Temperatur nimmt während dieser Zeit exponentiell um  $0,65^\circ\text{C}$  ab. Nachdem sich die Richtung der Drift der Struktur in x- und y-Richtung zu Beginn verändert, folgt ein exponentieller Anstieg um  $12\ \mu\text{m}$  in x-Richtung und  $22\ \mu\text{m}$  in y-Richtung. Der Grund für diesen Verlauf liegt in einer Aufwärmung des Laborraums vor der Messung durch Aufenthalt

mehrerer Personen im Raum, die die Justage der Probe durchführen. Für die Messung wird der Laborraum verlassen und die Temperatur nimmt ab. Nach ca. sechs Stunden ist die Temperatur in etwa stabil, die Position schwankt aber weiterhin um etwa  $100\ \text{nm}/\text{min}$ . Dies ist bei einer aktuellen Messdauer von sieben Minuten signifikant im Ergebnis zu erkennen. Aus diesem Grund ist eine Software-Korrektur dieser Drift durchgeführt worden, indem in jedem gemessenen Bild einer Messreihe die Struktur detektiert wird und jedes Bild auf den Schwerpunkt der detektierten Struktur zentriert wird.

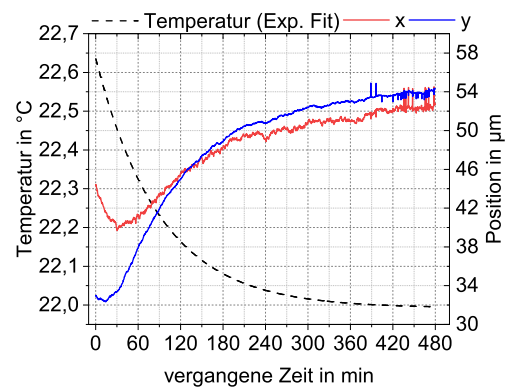


Abb. 4 Temperaturverlauf und Probenposition über acht Stunden Messdauer

### 4 Diskussion und Ausblick

Ein Müller-Matrix-Mikroskop für Messungen in Reflexion und Transmission ist entwickelt worden. Die Müller-Matrix-Mikroskopie ist geeignet, um Strukturen auszuwerten, die zu klein sind für die herkömmliche Ellipsometrie und keine periodischen Eigenschaften aufweisen. Erste Messungen an Einzelstrukturen ergeben bereits vielversprechende Ergebnisse, die allerdings noch thermische Driften enthalten, die in einem ersten Schritt mit einer Software-Lösung beseitigt wurden.

In Zukunft soll die thermische Drift noch weiter minimiert werden, indem unter anderem die Messdauer weiter gesenkt wird und die Umgebungsbedingungen im Laborraum stabiler gehalten werden. Außerdem soll eine systematische Analyse des Einflusses der Strukturform auf die einzelnen Müller-Matrix-Elemente durchgeführt werden. Weiterhin sollen noch Messungen an Strukturen durchgeführt werden, deren Abmaße in der Nähe der Auflösungsgrenze des Systems liegen.

#### Literatur

- [1] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland Publishing Co., 1977).
- [2] D. Goldstein, *Polarized Light*, chap. 28.2.1 (New York: Marcel Dekker, 2003).